

Etude de l'interface sol-structure dans les milieux granulaires à l'aide d'un nouvel appareil de cisaillement annulaire

Patrick Lerat

▶ **To cite this version:**

Patrick Lerat. Etude de l'interface sol-structure dans les milieux granulaires à l'aide d'un nouvel appareil de cisaillement annulaire. Matériaux. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1996. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-00520678⟩

HAL Id: tel-00520678

https://pastel.hal.science/tel-00520678v1

Submitted on 24 Sep 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

X

THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Géotechnique

présentée à

l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

par

Patrick LERAT

Etude de l'interface sol – structure dans les milieux granulaires à l'aide d'un nouvel appareil de cisaillement annulaire

Centre d'Enseignement et de Recherche en Mécanique des Sols

(CERMES, ENPC-LCPC)

Soutenue le vendredi 13 décembre 1996 devant le jury composé de :

M. Jean-Pierre MAGNAN	Président
M. Marc BOULON M. Ioannis VARDOULAKIS	Rapporteurs
M. Michel JEAN M. Jack LANIER	Examinateurs
M. François SCHLOSSER	Directeur de thèse

10

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé à réaliser ce travail ainsi que les membres du jury pour leur participation.

A Pierre, Marion et Hugo

RESUME

De nombreux ouvrages de génie civil nécessitent une bonne connaissance du mode de transmission des efforts de la structure vers le sol. Ce transfert se fait à travers une fine couche de sol, appelée interface. Un nouvel appareil, l'appareil de cisaillement simple annulaire a été développé pour analyser le comportement d'interface entre un matériau granulaire et un élément de structure en acier.

Dans un premier temps, nous proposons une description détaillée de ce nouvel appareil. Le principe de l'essai à l'appareil de cisaillement simple annulaire consiste à cisailler la partie interne d'un échantillon de sol annulaire par un cylindre métallique en rotation. Les effets de bord sont très réduits et la perte de matériau est nulle. Des capteurs de contrainte totale ont été développés pour permettre une mesure locale de la contrainte radiale au sein de l'interface.

Ensuite, des essais sous sollicitation monotone sont présentés, réalisés sur des échantillons de sable d'Hostun RF et de gravier d'Hostun 14~10. Une synthèse met en évidence l'influence des différents paramètres contrôlant le comportement de l'interface : la pression radiale initiale de confinement, les conditions aux limites, l'état de compacité de l'échantillon et la rugosité de l'élément de structure.

La visualisation du mouvement des grains au sein de la couche d'interface a été menée à partir des trois études : visualisation directe au cours d'essais sur le gravier 14~10, réalisation d'essais sur des rouleaux de Schneebeli, avec une configuration adaptée de l'appareil et simulation numérique par éléments distincts avec le logiciel L.M.G.C. Cette approche, au niveau microscopique, met en exergue le rôle fondamental de la microstructure du milieu, dans la formation de la couche d'interface où les grains subissent de grands déplacements tangentiels et de fortes rotations.

A la fin de ce mémoire est présentée une synthèse des premiers essais réalisés sous sollicitation cyclique. Le rôle primordial de l'amplitude de cisaillement a été mis en évidence.

ABSTRACT

Many civil engineering problems involve interaction between soil and structural elements. The load transfer takes place in a very thin zone of soil, called interface. A new apparatus, the ring simple shear apparatus, has been developed in order to investigate the behaviour of interface between a granular material and a steel structural element.

In a first time, a detailed description of this new apparatus is presented. The principle of the test with the ring simple shear apparatus consists to shear the intern part of a ring soil sample by a steel cylinder in rotation. The end effects are reduced and the loss of material is nil. Normal stresses are directly measured at the interface with specifically designed cells. Then, monotonous test are described, performed with Hostun RF sand and Hostun 14~10 gravel samples. A synthesis underlines the main factors which affect the interface behaviour : initial radial external pressure, limit conditions, density of the sample and roughness of the structural element.

A visualisation of the grain motion inside the interface has been performed with three studies : direct visualisation during test with 14~10 gravel, realisation of test with Schneebeli roll sample, with an adapted configuration of the apparatus and numerical simulation with a distinct element code, called LMGC. This approach, at a microscopic level, shows the fundamental role of the media microstructure in the formation of the interface, where grains undergo large displacements and rotation.

At this end of this work, a synthesis of first cyclic tests is presented. The major part of the amplitude of shearing is analysed.

INTRODUCTION GENERALE 1

I. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES 5

I.1. EXEMPLE D'OUVRAGES DE GENIE CIVIL : LES SOUTENEMENTS REALISES EN SOL RENFORCE 6

I.1.1. Présentation 6

I.1.2. Mise en évidence de la dilatance lors d'un cisaillement sol - inclusion 7

I.1.3. Définition des coefficients de frottement 8

I.1.4. Paramètres influençant le frottement sol - inclusion 11

I.1.4.1 La compacité du milieu granulaire 11

I.1.4.2 L'état de surface de l'inclusion 12

I.1.4.3 La contrainte normale initiale sur l'inclusion 12

I.1.5. Extension à la mobilisation du frottement latéral des fondations profondes 13

I.2. APPAREILS DE MESURE DU COMPORTEMENT D'INTERFACE 17

I.2.1. Appareils de mesure in situ 17

I.2.1.1 Le rhéotest 18

I.2.1.2 Le "borehole shear test" 18

I.2.1.3 Le "frictiomètre" 20

I.2.1.4 Le phicomètre 23

I.2.1.5 L'appareil de cisaillement simple annulaire de terrain 25

I.2.2. Appareils de mesure au laboratoire 27

I.2.2.1 La boîte de cisaillement direct plan modifiée 28

I.2.2.2 L'appareil d'arrachement à symétrie de révolution 44

I.2.2.3 La boîte de cisaillement annulaire 48

I.2.2.4 L'appareil de cisaillement simple 61

I.2.2.5 L'appareil de cisaillement tridimensionnel 67

I.2.2.6 L'appareil de cisaillement (simple ou direct) double 69

I.2.2.7 L'appareil biaxial "modifié" et le modèle de silo plan 72

I.2.2.8 Autres appareillages ou méthodes 77

I.3. CONCLUSION 80

II. L'APPAREIL DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE 82

II.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 83

II.2. DESCRIPTION DE L'APPAREIL 84

II.2.1. Présentation de la partie mécanique 85

II.2.1.1 Description du sous-ensemble motorisation et fût 85

II.2.1.2 Description du sous-ensemble intermédiaire 88
II.2.1.3 Description du sous-ensemble partie supérieure 89
II.2.2. Présentation de la partie entourant l'échantillon 92
II.2.2.1 Description du clou 92
II.2.2.2 Description des capteurs de pression totale 95
II.2.2.3 Description du confinement vertical de l'échantillon 101
II.2.2.4 Description du confinement radial de l'échantillon 102
II.2.3. Présentation du module électronique et informatique 102
II.2.3.1 Métrologie liée à l'appareil de cisaillement simple annulaire 102
II.2.3.2 Interface électronique - informatique et acquisition et traitement des données 104
II.2.3.3 Le logiciel générateur d'application Viewdac 105
II.3. PROCEDURE EXPERIMENTALE 108
II.3.1. Fabrication de l'échantillon 108
II.3.1.1 Préparation des échantillons de sable lâche 109
II.3.1.2 Préparation des échantillons de sable dense 109
II.3.1.3 Préparation d'échantillon à densité intermédiaire 111
II.3.2. Application du vide au sein de l'échantillon 115
II.3.3. Assemblage des pièces mécaniques 117
II.3.4. Saturation et consolidation de l'échantillon 117
II.3.5. Début de l'essai et cisaillement de l'échantillon 119

III. ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE MONOTONES 122

III.1. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES 123
III.1.1. Le sable d'Hostun RF 123
III.1.2. Le gravier d'Hostun 14~10 126
III.2. PROGRAMME D'ESSAIS 129
III.2.1. Essais sur le sable d'Hostun RF 130
III.2.2. Essais sur le gravier d'Hostun 14~10 130
III.3. PRESENTATION DES RESULTATS 131
III.3.1. Essais sur le sable d'Hostun RF 133
III.3.1.1 Essai à volume constant 133
III.3.1.2 Essai à pression radiale constante 135
III.3.2. Essais sur le gravier d'Hostun 14~10 139
III.3.2.1 Essai à volume constant 139
III.3.2.2 Essai à pression radiale constante 140
III.3.3. Reproductibilité des essais et erreurs 141

III.4. SYNTHESE DES RESULTATS ET ANALYSE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES 148
III.4.1. Résultats obtenus avec le sable d'Hostun RF *148*
III.4.1.1 Influence de la pression radiale initiale 148
III.4.1.2 Influence des conditions aux limites 166
III.4.1.3 Influence de l'état de compacité de l'échantillon 168
III.4.1.4 Influence de la rugosité de l'interface 173
III.4.2. Résultats obtenus avec le gravier d'Hostun 14~10 ..... *177*
III.4.2.1 Influence de la pression radiale initiale 178
III.4.2.2 Influence des conditions aux limites 188
III.4.2.3 Influence de l'état de compacité de l'échantillon 188
III.4.2.4 Influence de la rugosité de l'interface 193
III.4.3. Influence de la granulométrie *197*
III.5. CONCLUSION 201

IV. VISUALISATION DU MOUVEMENT DES GRAINS AU SEIN DE LA COUCHE D'INTERFACE 203

IV.1. INTRODUCTION 204
IV.2. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES 205
IV.2.1. Techniques de visualisation *205*
IV.2.1.1 La photoélasticité 206
IV.2.1.2 La radiographie par rayons X 206
IV.2.1.3 La stéréophotogrammétrie 206
IV.2.2. Bandes de cisaillement et couches d'interface : épaisseur caractéristique *207*
IV.2.2.1 Bandes de cisaillement 207
IV.2.2.2 Couches d'interface 208
IV.2.3. Conclusion *211*
IV.3. RESULTATS OBTENUS A PARTIR DES ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 211
IV.3.1. Introduction *211*
IV.3.2. Procédure expérimentale et dépouillement des essais *213*
IV.3.3. Programme d'essais *215*
IV.3.4. Interprétation des résultats *216*
IV.3.4.1 Analyse de la rotation des grains au sein de l'interface 216
IV.3.4.2 Mouvement des grains : déplacements tangentiels et déplacements normaux 217
IV.3.5. Conclusion *222*
IV.4. UTILISATION DU MATERIAU ANALOGIQUE DE SCHNEEBELI 224
IV.4.1. Etude bibliographique *224*

IV.4.2. Essais à l'appareil de cisaillement simple annulaire *226*
IV.4.2.1 Utilisation d'un appareil de Couette 226
IV.4.2.2 Modification de l'appareil de cisaillement simple annulaire 227
IV.4.2.3 Matériaux utilisés 228
IV.4.2.4 Résultats des essais 230
IV.4.2.5 Modélisation des essais de cisaillement simple annulaire par le logiciel L.M.G.C. 234
IV.5. CONCLUSION **239**

V. ESSAIS SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE : PREMIERS RESULTATS 241

V.1. INTRODUCTION **242**
V.2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE **243**
V.3. ESSAIS SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE REALISES A L'APPAREIL DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE **251**
V.3.1. Asservissement de l'appareil de cisaillement simple annulaire *251*
V.3.2. Programme d'essais *252*
V.3.3. Résultats et interprétation *253*
V.3.3.1 Essais sur le sable d'Hostun RF 253
V.3.3.2 Essais sur le gravier d'Hostun 14-10 268
V.4. CONCLUSION **280**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 282

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 286

ANNEXES 300

INTRODUCTION GENERALE

"The fundamental assumptions of the traditional earth-pressure theories cannot, in fact, stand even superficial examination. The fundamental error was introduced by Coulomb, who purposely ignored the fact that sand consists of individual grains, and who dealt with the sand as if it were a homogeneous mass with certain mechanical properties. Coulomb's idea proved very useful as a working hypothesis for the solution of one special problem of the earth-pressure theory, but it developed into an obstacle against further progress as soon as its hypothetical character came to be forgotten by Coulomb's successors. (...) . The way out of the difficulty lies in dropping the old fundamental principles and starting again from the elementary fact that the sand consists of individual grains".

Terzaghi, K. (1920). Old earth-pressure theories and new test results. Engineering News Records, 85, n°14 (d'après Rowe, 1962).

L'essai de Coulomb de 1773, présenté à l'Académie Royale des Sciences à Paris et intitulé "Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture", s'intéresse à l'étude de la poussée d'un massif de sol sur un mur de soutènement. Il a assimilé le massif pulvérulent à un milieu continu dans lequel toutes les contraintes obéiraient uniquement à la loi du frottement :

$$\tau \leq \sigma_n \tan\varphi$$

où τ est la composante de cisaillement ,
σ_n la composante normale de la contrainte et
φ l'angle de frottement apparent du milieu.

Ce principe a largement été développé et appliqué aux problèmes d'interaction sol - structure, domaine particulier de l'étude du contact entre deux corps. Le frottement entre le sol et la structure, dans le cadre de cette théorie, obéit à un modèle de Coulomb rigide plastique adapté :

$$\tau \leq \sigma_n \tan\delta$$

où δ est l'angle de frottement sol - structure.

En réalité, la transmission des efforts de la structure vers le sol se fait à travers une fine couche de sol en contact avec la structure, appelée couche d'interface ou communément interface. Des mécanismes particuliers entrent en jeu dans son comportement : des gradients de déplacements et des rotations de grain importants sont accompagnés de fortes variations volumiques. Comme l'a indiqué Terzaghi dans la citation introductive. la nature particulière du sol, formé de particules identifiables. doit être prise en compte dans la rhéologie de la couche d'interface.

Le comportement mécanique des interfaces a fait l'objet de nombreuses études tant au niveau expérimental, que théorique ou numérique. Cependant, la plupart des études expérimentales menées ne permettent pas de réaliser un essai où les critères suivants soient respectés simultanément :

- conditions aux limites parfaitement contrôlées,
- effets de bords suffisamment faibles pour ne pas invalider les résultats obtenus,
- grands déplacements de cisaillement possibles sans perte de matériau,
- visualisation du mouvement des grains dans l'échantillon et, en particulier, dans la couche d'interface,
- mesure de la composante normale de la contrainte au sein de la couche d'interface,
- possibilité d'effectuer des chargements monotones ou cycliques selon différents chemins.

Nous nous proposons, dans ce travail, de développer un nouvel appareillage pour l'étude des interfaces entre une structure rigide et un milieu granulaire, en nous efforçant de respecter l'ensemble de ces critères.

Ce mémoire comporte cinq parties.

Dans le premier chapitre, à caractère bibliographique, nous identifions le phénomène d'interface à partir de l'étude des soutènements réalisés en sol renforcé. Le rôle primordial du comportement de l'interface dans la stabilité globale de l'ouvrage est mis en relief. Puis nous passons en revue les différents dispositifs conçus pour la mesure du comportement d'interface. Après une description des appareils utilisés sur le terrain, nous analysons en détail les appareillages de laboratoire en présentant les avantages et les inconvénients de chaque procédé. Cette étude est très importante pour la conception d'une nouvelle méthode, qui vise à d'améliorer les techniques existantes.

L'appareil de cisaillement simple annulaire est présenté dans le second chapitre. Son principe de fonctionnement est de faire tourner un cylindre métallique, modélisant l'élément structural, dans un échantillon de sol annulaire. Nous décrivons successivement sa partie mécanique, la partie confinant l'échantillon, puis le module électronique et informatique. Enfin, la procédure expérimentale suivie pour effectuer un essai de cisaillement simple annulaire est exposée.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des essais de cisaillement simple annulaire sous chargement monotone. Ce chapitre se compose de quatre parties : la présentation des deux matériaux d'Hostun utilisés, le sable RF et le gravier 14~10, le programme d'essais expérimentaux, les résultats et enfin, une synthèse mettant en évidence l'influence des différents paramètres contrôlant le comportement de l'interface.

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéressons à la visualisation du mouvement des grains au sein de la couche d'interface. Après des rappels bibliographiques sur les techniques de visualisation du mouvement des grains au sein d'un échantillon et les épaisseurs caractéristiques des bandes de cisaillement et couches d'interface trouvées, nous présentons les résultats obtenus à partir d'essais de cisaillement simple annulaire sur des échantillons de graviers 14~10. Ce travail est complété par une étude sur un matériau analogique de Schneebeli, comprenant des essais à l'appareil de cisaillement simple annulaire et une modélisation numérique par éléments distincts. Cette approche, au niveau microscopique, met en exergue le rôle fondamental de la microstructure du milieu.

L'objet du cinquième chapitre est d'étudier le comportement des interfaces sous sollicitation cyclique. Comme le montre l'étude bibliographique initiale, très peu de travaux ont été menés dans ce domaine. Les premiers essais effectués à l'appareil de cisaillement simple annulaire sont présentés et analysés. Ces premiers résultats permettent d'approcher le comportement particulier de l'interface sol-structure sous ce type de sollicitation, et de définir les directions selon lesquelles cette étude devra être complétée.

I. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

I. ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES **5**

I.1. EXEMPLE D'OUVRAGES DE GENIE CIVIL : LES SOUTENEMENTS REALISES EN SOL RENFORCE 6

I.1.1. Présentation *6*

I.1.2. Mise en évidence de la dilatance lors d'un cisaillement sol - inclusion *7*

I.1.3. Définition des coefficients de frottement *8*

I.1.4. Paramètres influençant le frottement sol - inclusion *11*

I.1.4.1 La compacité du milieu granulaire 11

I.1.4.2 L'état de surface de l'inclusion 12

I.1.4.3 La contrainte normale initiale sur l'inclusion 12

I.1.5. Extension à la mobilisation du frottement latéral des fondations profondes *13*

I.2. APPAREILS DE MESURE DU COMPORTEMENT D'INTERFACE 17

I.2.1. Appareils de mesure in situ *17*

I.2.1.1 Le rhéotest 18

I.2.1.2 Le "borehole shear test" 18

I.2.1.3 Le "frictiomètre" 20

I.2.1.4 Le phicomètre 23

I.2.1.5 L'appareil de cisaillement simple annulaire de terrain 25

I.2.2. Appareils de mesure au laboratoire *27*

I.2.2.1 La boîte de cisaillement direct plan modifiée 28

I.2.2.2 L'appareil d'arrachement à symétrie de révolution 44

I.2.2.3 La boîte de cisaillement annulaire 48

I.2.2.4 L'appareil de cisaillement simple 61

I.2.2.5 L'appareil de cisaillement tridimensionnel 67

I.2.2.6 L'appareil de cisaillement (simple ou direct) double 69

I.2.2.7 L'appareil biaxial "modifié" et le modèle de silo plan 72

I.2.2.8 Autres appareillages ou méthodes 77

I.3. CONCLUSION 80

A travers la présentation rapide d'un type d'ouvrage largement utilisé en génie civil, les ouvrages de soutènement en sol renforcé, nous allons aborder la problématique du contact entre le sol et une inclusion, contact qui se produit dans une fine couche de sol, appelée interface et qui permet de développer un frottement latéral primordial pour la pérennité de ces ouvrages.

Ensuite, nous étudierons successivement des appareils de mesure du comportement d'interface *in situ* et au laboratoire ; puis nous analyserons les principaux résultats obtenus qui nous servirons de référence dans l'interprétation des essais obtenus à l'appareil de cisaillement simple annulaire.

I.1. Exemple d'ouvrages de génie civil : les soutènements réalisés en sol renforcé

I.1.1. Présentation

Le renforcement des sols englobe un certain nombre de techniques (comme la Terre Armée ou le clouage) qui visent à améliorer la résistance d'un massif de sol par l'inclusion en son sein de barres ou tiges.

Par exemple, dans le cas du clouage des sols, la réalisation du mur de soutènement en déblai se fait par phases successives (recommandations Clouterre 1991, figure I-1):

- terrassement d'une hauteur de l'ordre de 1 ou 2 mètres
- mise en place de clous subhorizontaux ou inclinés
- réalisation d'un parement (béton projeté armé ou pose d'éléments préfabriqués).

De façon générale, l'inclusion introduite dans le sol peut travailler en traction ou compression, mais également en flexion. Si l'effort de flexion est dû généralement au

mouvement différentiel de deux zones de sol, créant une contrainte normale à l'axe de l'inclusion qui tend à le fléchir et à le cisailler, les efforts de traction ou de compression résultent eux de la contrainte de cisaillement τ parallèle à la surface de l'inclusion. Cette interaction prépondérante, qui est celle qui nous intéresse dans cette étude, nécessite un frottement mobilisable entre le sol et l'inclusion important.

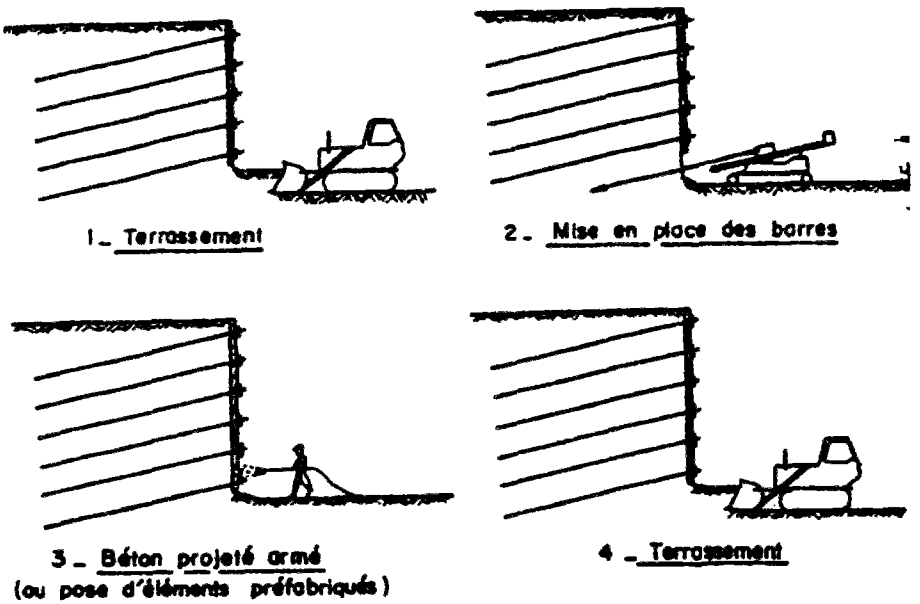


Figure I-1. *Phase d'exécution d'un mur en sol cloué (recommandation Clouterre 1991)*

I.1.2. Mise en évidence de la dilatance lors d'un cisaillement sol - inclusion

O. Reynolds (1885) a observé et analysé, pour la première fois, qu'un échantillon de sable dense soumis à un cisaillement augmente de volume à la rupture (et appela dilatance ce phénomène) et que, vice versa, un échantillon de sable lâche a un volume qui diminue à la rupture. Ces concepts concernant le cisaillement d'échantillon de sol, donc le frottement sol-sol, largement analysés depuis (Rowe, 1962 ; Lee et Seed, 1967 ; etc.), ont été étendus au frottement sol-inclusion.

L'expérience de la Terre Armée (Alimi et *al.*, 1977; Schlosser et Elias, 1978) a montré le caractère tridimensionnel du frottement latéral le long d'une inclusion sollicitée en

traction. D'après Schlosser et Guilloux (1981), "la mise en traction (ou en compression) de l'inclusion produit dans le sol des contraintes de cisaillement τ dont les valeurs ne sont significatives que dans une zone limitée autour de l'inclusion. Dans cette zone, le sol a tendance à augmenter de volume par suite de la dilatance, mais s'en trouve en partie empêché par le reste du sol. Il en résulte une augmentation importante de la contrainte normale σ sur le pourtour de la zone de cisaillement et par suite à la surface de l'inclusion" (figure I-2).

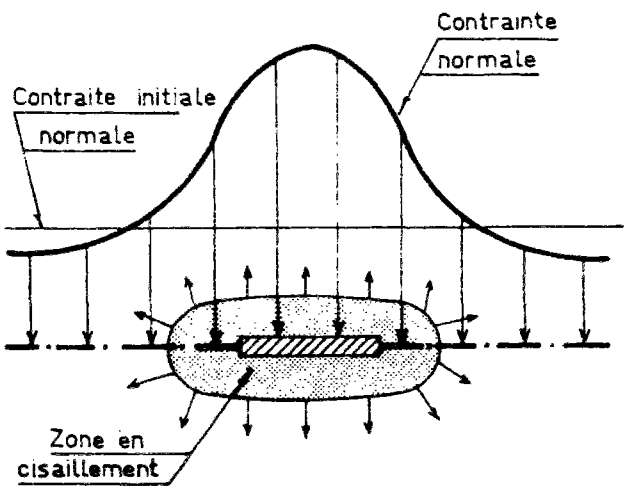


Figure I-2. *Influence de la dilatance sur le frottement sol - inclusion (d'après Schlosser et Guilloux, 1981)*

I.1.3. Définition des coefficients de frottement

Wernick (1978 a, b) a mis expérimentalement en évidence cette augmentation de la contrainte radiale lors d'essais d'arrachement d'inclusions cylindriques dans un massif de sable (D_{50} = 0,33 mm). La surface de l'inclusion est rendue rugueuse par collage de sable. Des mesures sont effectuées sur la surface de l'inclusion par l'intermédiaire de capteurs de contrainte totale et au sein du massif de sable par des capteurs télémétriques placés à différentes profondeurs et à différents rayons. La figure I-3 montre une augmentation de la valeur de la contrainte radiale à la surface de l'inclusion pouvant atteindre 6 à 8 fois sa

valeur initiale. Cette figure représente également la diminution de cette valeur en fonction de la distance radiale, la zone d'influence étant limitée à 4 diamètres.

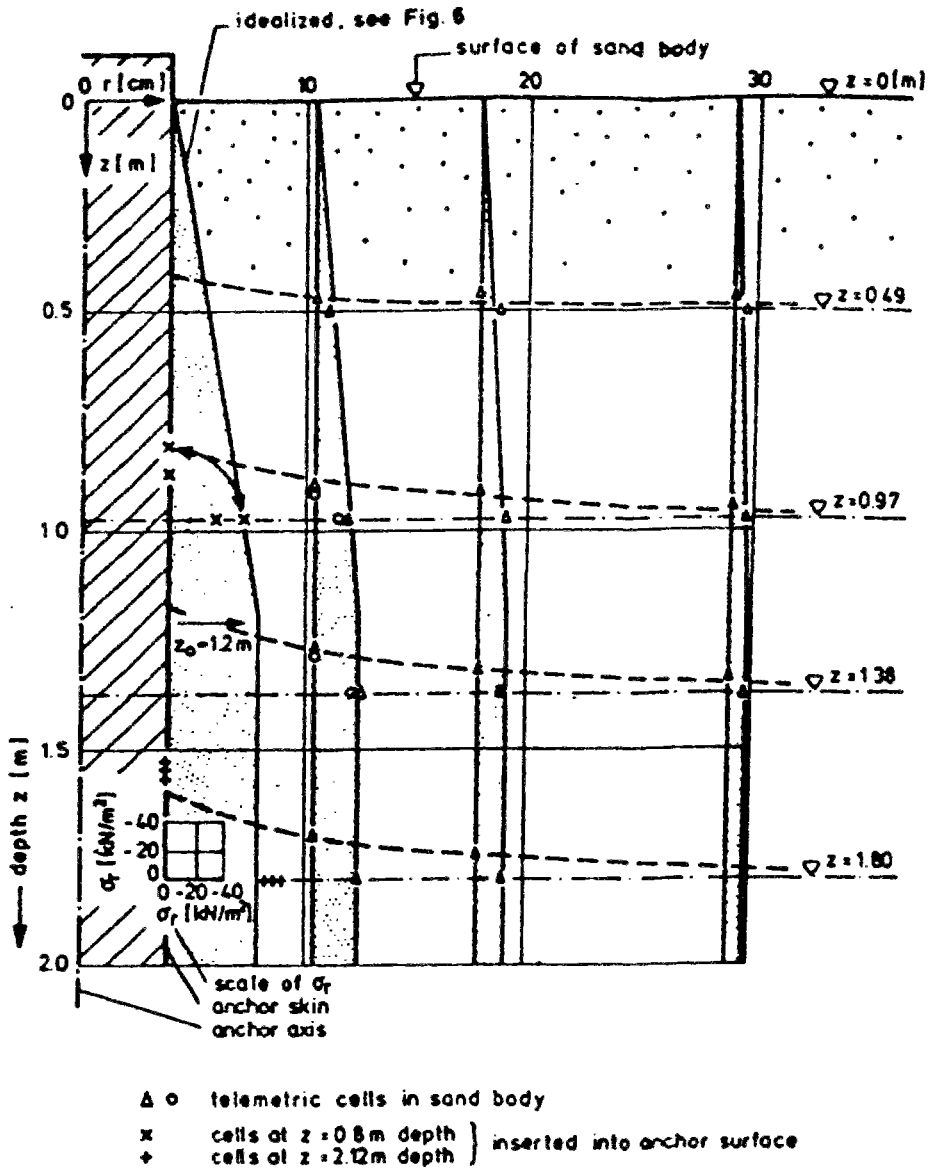


Figure I-3. *Contraintes normales au maximum de la capacité portante fonction de la profondeur z et du rayon r (d'après Wernick, 1978 b)*

Plumelle (1979), à partir d'essais de traction de tirants passifs en place enterrés dans un remblai de sable de Fontainebleau, montre une augmentation $\Delta\sigma$ de la contrainte normale

au voisinage de l'inclusion pouvant atteindre 4 fois sa valeur initiale (figure I-4). Il faut également noter que la zone d'influence se limite également à 3 ou 4 diamètres.

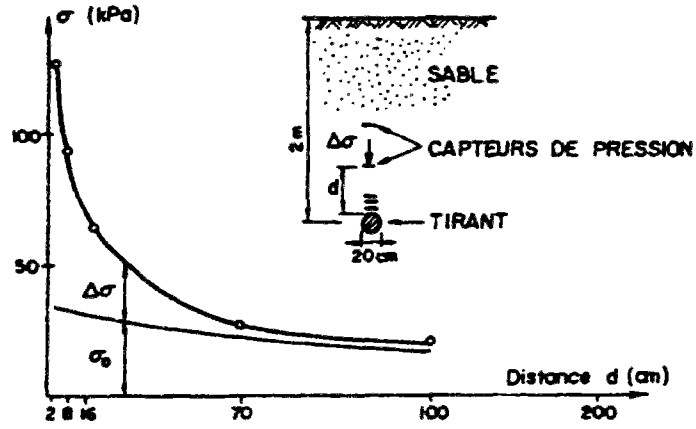


Figure I-4. *Augmentation de la contrainte normale due à la dilatance empêchée autour d'une inclusion en traction (Plumelle (1979) d'après Clouterre 1991).*

A partir de ces observations, un coefficient de frottement apparent μ* (Alimi et *al.*, 1977) a été défini par :

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

pouvant être fortement supérieur au coefficient de frottement réel μ :

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

où τ_{max} est la contrainte de cisaillement maximale

σ_0 la contrainte normale initiale

et $\Delta\sigma(\tau_{max})$ l'accroissement de contrainte normale.

Il convient de noter que μ, défini pour la valeur de τ_{max}., n'est pas forcément le maximum de la valeur $\tau/\sigma(\tau)$.

I.1.4. Paramètres influençant le frottement sol - inclusion

Schlosser et Guilloux (1981) ont mis en évidence trois paramètres principaux influençant le coefficient de frottement apparent μ^* et le frottement latéral τ_{max}. Ces facteurs seront les paramètres clés de toute notre étude bibliographique et du programme expérimental que nous avons réalisé.

I.1.4.1 La compacité du milieu granulaire

Les essais de traction de bandes métalliques, réalisés dans des sols à faibles et à fortes compacités (figure I-5), montrent l'importance du rôle de la densité dans la mobilisation du coefficient de frottement apparent du sol. Pour de faibles densités, le pic est marqué et obtenu pour de faibles déplacements. Pour de grands déplacements, le pic est plus atténué et est obtenu pour de plus grands déplacements.

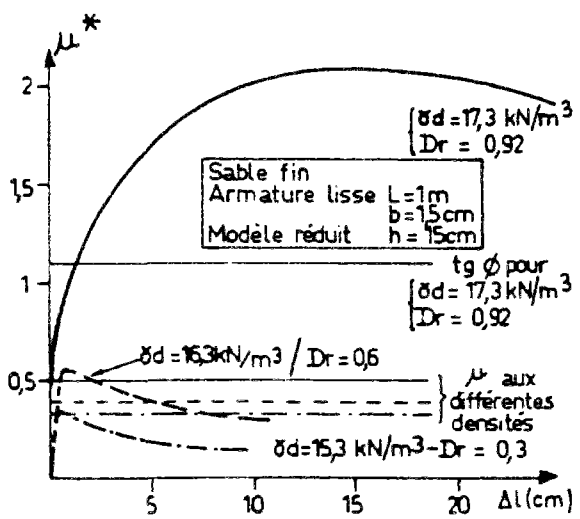


Figure I-5. *Influence de la compacité sur le coefficient de frottement apparent (d'après Schlosser et Guilloux, 1981)*

I.1.4.2 L'état de surface de l'inclusion

Des essais d'extraction d'armatures lisses et nervurées, dans des ouvrages en Terre Armée, ont montré que, pour les armatures nervurées, μ^* est plus élevé que pour des armatures lisses et que le pic, moins marqué, est atteint pour de plus grands déplacements (50 mm contre 5 mm, figure I-6).

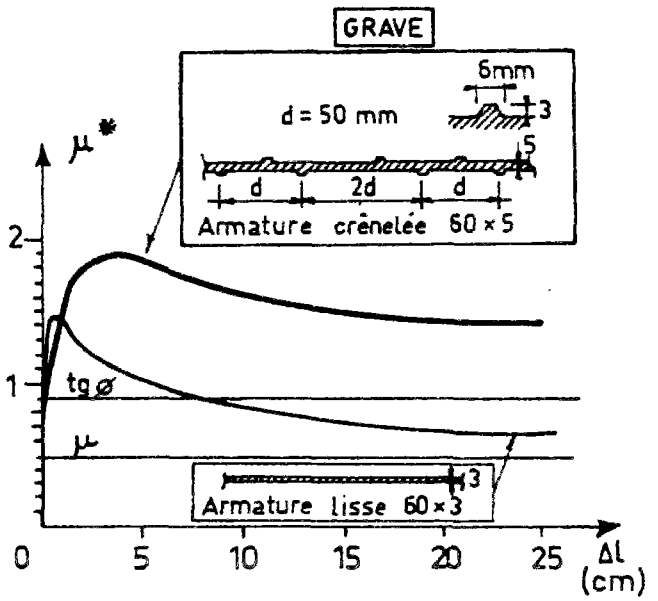


Figure I-6. *Influence de l'état de surface de l'inclusion sur le coefficient de frottement apparent (d'après Schlosser et Guilloux, 1981)*

I.1.4.3 La contrainte normale initiale sur l'inclusion

Le coefficient de frottement apparent diminue quand la contrainte normale initiale augmente. Il peut atteindre des valeurs relativement importantes (5 à 10) pour des valeurs de σ_0 inférieures à 50 kPa. Pour des valeurs supérieures à 100 kPa, il atteint un palier égal à la valeur de la tangente de l'angle de frottement interne dans le cas d'une inclusion cannelée dans un massif dense (figure I-7).

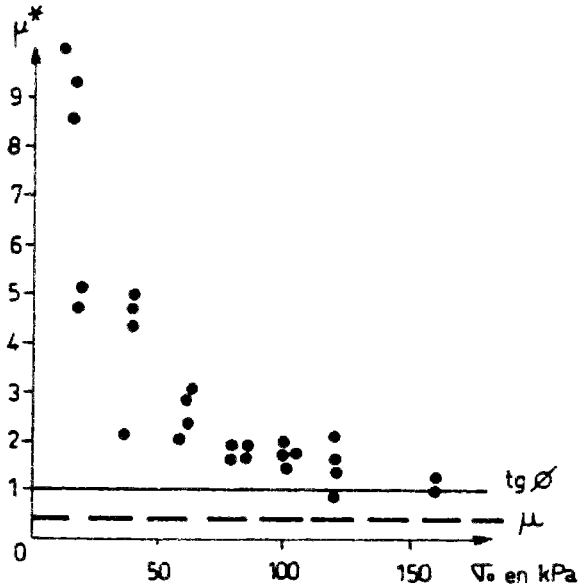


Figure I-7. *Influence de la contrainte normale initiale sur le coefficient de frottement apparent (d'après Schlosser et Guilloux, 1981)*

I.1.5. Extension à la mobilisation du frottement latéral des fondations profondes

Les mécanismes de transfert de charge d'un pieu isolé (fondation profonde ou micropieu (pieu foré de diamètre inférieur à 250 mm)), qui nous permettent, entre autres, une estimation de la courbe charge - déplacement en tête du pieu, font intervenir la mobilisation du frottement latéral en fonction du déplacement (loi de mobilisation souvent notée t-z)et la mobilisation de l'effort en pointe du pieu en fonction du déplacement (loi de mobilisation souvent notée q-z).

Différentes méthodes existent pour estimer cette courbe charge - déplacement :

- des méthodes globales, ne faisant pas apparaître le rôle de chacune des deux lois de mobilisation mais donnant directement le tassement global du pieu à partir des caractéristiques du sol et l'emploi d'abaques (Poulos et Davis, 1990).

- des méthodes reposant sur les fonctions de transfert de charge, comme les méthodes empiriques liées à l'utilisation du pressiomètre (Baguelin et *al.*, 1978) ou du pénétromètre (Bustamante et *al.*, 1991).

Nous allons présenter la mobilisation du frottement latéral d'un pieu unique, disposé verticalement et chargé axialement dans un sable pulvérulent, à partir de deux études.

Mokrani (1991) a réalisé des essais de chargement axial statique de pieux modèles instrumentés en utilisant la chambre d'étalonnage développée à l'I.M.G.. Celle-ci permet des enfoncements importants dans des conditions de confinement correspondant à celles des pieux réels.

L'utilisation de jauges extensométriques, collées sur la surface externe du fût, a permis la mesure de la déformation axiale en différentes positions le long du pieu, et donc de calculer le frottement latéral sur différentes sections du pieu. La surface métallique lisse du pieu a été rendue rugueuse par collage de grains de sable de la même nature que le matériau d'essai. La figure I-8 met en évidence l'influence de la surcharge verticale et celle du type de mise en place sur la mobilisation du frottement latéral.

Les courbes de frottement latéral moyen, pour les pieux moulé et battu, sont caractérisées par l'obtention d'un pic, suivi d'un palier de frottement. Pour le pieu battu, le pic de contrainte est très marqué, ce qui est dû à une augmentation de la contrainte normale au fût liée au système de battage, qui densifie le massif de sol. Pour le pieu foncé, le frottement latéral moyen atteint directement une valeur constante.

Dans le cas des pieux moulés, dont la configuration technologique se rapproche le plus des essais de cisaillement d'interface au laboratoire, l'auteur attribue le léger radoucissement marquant l'apparition d'un palier de frottement à la contractance de l'interface et à la diminution de la contrainte normale en grands déplacements. Nous verrons dans notre étude que le comportement particulier de l'interface en grands déplacements intervient pour les déplacements largement supérieurs à 5 mm.

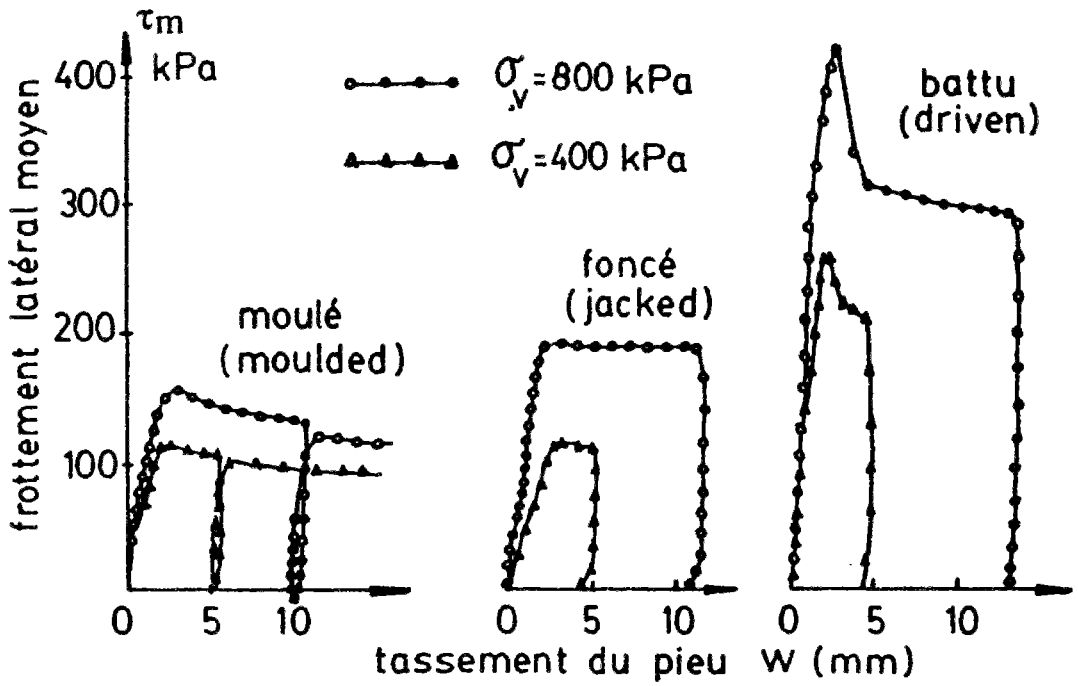


Figure I-8. *Influence de la surcharge verticale et du type de mise en place sur la mobilisation du frottement latéral (d'après Mokrani, 1991)*

Francis et *al.* (1996) ont réalisé, au CERMES, des essais de chargement de micropieux modèles isolés en mini chambre d'étalonnage. Le frottement latéral limite moyen a été obtenu par différence entre les charges limites globales obtenues sur les micropieux et les charges en pointe évaluées au mini pénétromètre , pour les mêmes conditions de massif.

Les courbes donnant le coefficient de frottement apparent en fonction de la contrainte de consolidation sont présentées sur la figure I-9.

A faibles contraintes (25 kPa), avec une interface rugueuse, le coefficient de frottement apparent atteint une valeur de 2. Selon la forme de la pointe, il est égal à 1,3 ou 1.8 pour de plus forte contrainte. Avec une interface lisse, sa valeur vaut 0.8 pour de faibles pressions de consolidation et descend à 0,2 pour 100 kPa de pression de consolidation. Un rapport de 3 à 8 apparaît selon la rugosité de l'interface.

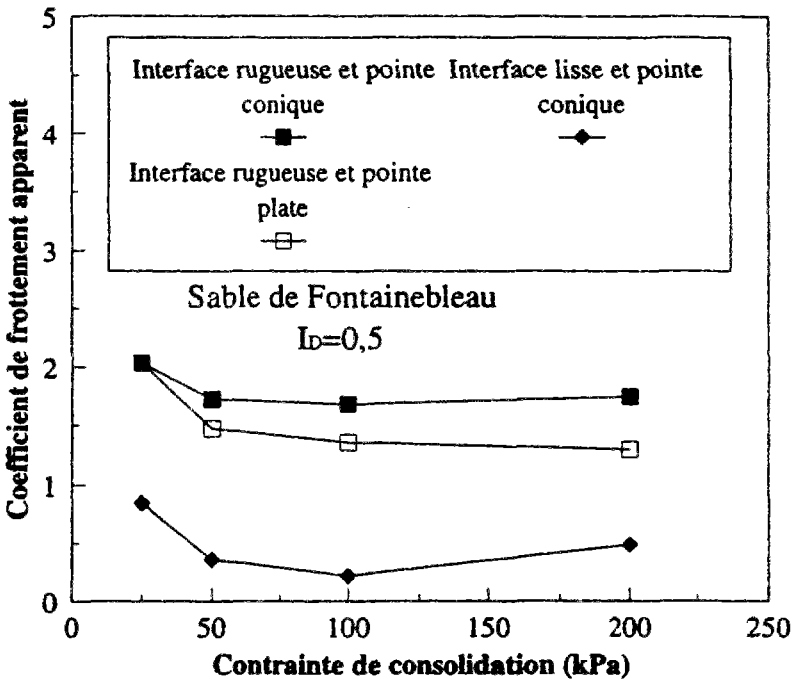


Figure I-9. *Coefficient de frottement apparent en fonction de la contrainte de consolidation (d'après Francis et al., 1996)*

I.2. Appareils de mesure du comportement d'interface

Dans cette partie, nous présentons les différents appareils et les différentes méthodes utilisés pour étudier le comportement d'interface entre une structure et un sol, tout d'abord *in situ* puis au laboratoire.

In situ, les appareils de cisaillement utilisés sont décrits, leurs avantages et leurs inconvénients présentés et quelques résultats typiques analysés. Au laboratoire, nous procédons de même, mais certains résultats majeurs seront présentés et analysés en détail car ils serviront d'éléments de référence et de comparaison dans l'interprétation des essais à l'appareil de cisaillement simple annulaire.

I.2.1. Appareils de mesure *in situ*

Un certain nombre d'appareils de mesure ont été développés pour essayer de déterminer directement, à partir d'un essai *in situ*, l'angle de frottement interne et la cohésion d'un sol. Ces appareils ont été conçus comme des essais de cisaillement direct localisé sol - sol, la surface de cisaillement étant imposée par la présence d'ailettes (rhéotest, essai de cisaillement dans un forage("borehole shear test")).

Par de simples modifications techniques, en gardant le principe et le mode opératoire de l'essai initial, il a été possible de passer d'une détermination de paramètres intrinsèques du sol à des paramètres d'interface sol - structure (par exemple, le phicomètre).

Enfin, d'autres appareils ont été développés pour mesurer directement les propriétés d'interface entre le sol et un élément représentant la structure ("frictiomètre" et appareil de cisaillement simple annulaire de terrain).

Dans ce paragraphe, nous allons tout d'abord présenter le rhéotest et le "borehole shear test". Bien que ne donnant pas de coefficients de frottement sol - appareil, nous

verrons que leurs principes de fonctionnement pourraient être appliqués pour les déterminer. Nous présenterons ensuite le frictiomètre puis le phicomètre, qui permettent d'accéder à la détermination du frottement latéral des pieux. Nous finirons en faisant un bref descriptif d'un appareil conçu mais non réalisé, l'appareil de cisaillement simple annulaire.

I.2.1.1 Le rhéotest

Biarez (1968) a présenté un "rhéotest de chantier", formé d'une trousse coupante inclinée vers l'intérieur, à l'envers des carottiers normaux pour ne pas perturber le sol extérieur (figure I-10). Sur la partie externe se trouve une enveloppe dilatable en caoutchouc qui permet d'appliquer une contrainte normale horizontale au terrain environnant. Cette enveloppe est équipée de quatre ailettes métalliques longitudinales d'une longueur de 250 mm qui servent à cisailler le sol par torsion. En connaissant les contraintes normales appliquées et en mesurant les composantes tangentielles, nous avons accès à la loi rhéologique approximative sur la surface de cisaillement. Nous obtenons directement la loi de Coulomb.

Les propriétés d'interface sol-sol obtenue incluent cependant les propriétés d'interface sol - ailette. Plus ces ailettes seront importantes en nombre et en largeur, plus nous obtiendrons des caractéristiques d'interface sol - acier. Il est donc concevable de modifier les caractéristiques géométriques du rhéotest, tout en gardant le protocole opératoire pour mesurer les propriétés d'interface sol - acier.

I.2.1.2 Le "borehole shear test"

L'essai de cisaillement dans un forage ("borehole shear test") a été développé pour mesurer directement sur les parois d'un forage les caractéristiques de résistance du sol (Lutenegger et *al.*., 1978; Lutenegger et Hallberg, 1981; Lutenegger, 1987 et Lutenegger et Timian, 1987).

La figure I-11 présente un schéma de cet essai. Deux plaques recouvertes d'arêtes vives sont placées diamétralement opposées sur les parois du trou de forage. Elles sont

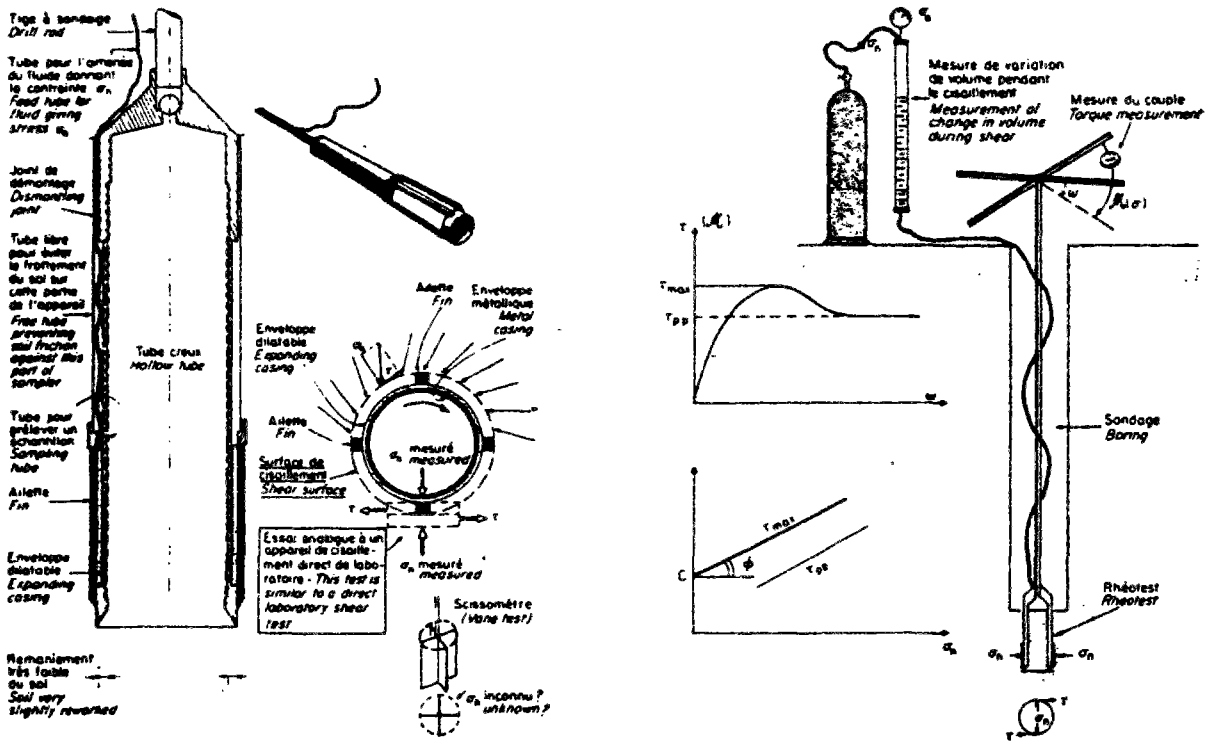


Figure I-10. *Utilisation du rhéotest pour la mesure immédiate sur le chantier de l'angle de frottement et de la cohésion (d'après Biarez, 1968)*

plaquées contre le sol par une pression de gaz connue qui permet de calculer la contrainte normale radiale appliquée au sol. Une contrainte de cisaillement est alors transmise aux plaques par arrachement vertical, la pression normale étant maintenue constante jusqu'à la rupture.

En répétant les essais avec différentes valeurs de la contrainte normale, une série de couple contrainte normale - résistance au cisaillement maximale est obtenue, ce qui permet de tracer l'enveloppe de rupture de Mohr - Coulomb. En fonction du temps entre deux essais (permettant ou non le drainage donc la dissipation des surpressions interstitielles), nous obtenons les caractéristiques à court terme ou à long terme du sol.

Comme dans le cas du rhéotest, cet essai pourrait être modifié. Il suffirait de remplacer les arêtes des plaques de cisaillement par une surface à rugosité contrôlée et de

respecter la même procédure expérimentale pour déterminer les caractéristiques d'interface sol - plaque.

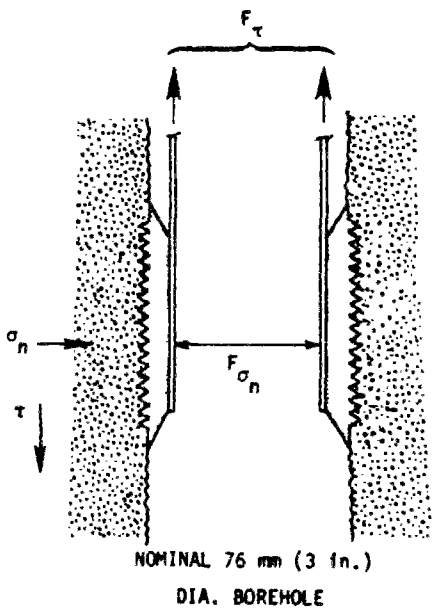


Figure I-11. *Schéma de l'essai de cisaillement sur les parois d'un forage (d'après Lutenegger et Hallberg, 1981).*

I.2.1.3 Le "frictiomètre"

Le frictiomètre a été conçu par Kishida, Fukaya et Hanzawa (Kishida et *al.*, 1986) pour répondre à un manque d'appareillages utilisables *in situ* pour prédire le frottement latéral le long des pieux, particulièrement dans le cas de sables denses et d'argiles raides. Contrairement à une détermination par essai de chargement de pieu, dont le coût est considérable, l'essai au frictiomètre a été développé pour être maniable et utilisable dans les investigations de routine.

a. Description et procédure expérimentale

La figure I-12 présente un schéma du frictiomètre. De forme cylindrique, d'un diamètre de 100 mm, il peut être décomposé en trois parties : un sabot de battage d'une longueur de 100

mm à sa base inférieure, un manchon de mesure d'une longueur de 100 mm en partie centrale et un élément supérieur d'une longueur de 600 mm.

Un trou de forage est réalisé jusqu'à la profondeur désirée et tubé (diamètre de 116 mm). Ensuite, un pré-forage de diamètre 76-86 mm est réalisé sur une profondeur supplémentaire de 500 à 1000 mm. Le frictiomètre est alors introduit dans le sol, de façon statique (argile molle) ou dynamique (sable ou argile raide), sur une profondeur de 300 mm selon le pré-forage.

Le manchon de frottement est alors mis en rotation par une manivelle et le couple nécessaire à la rotation et l'angle de rotation sont enregistrés. La rugosité du manchon de mesure peut être changée pour évaluer l'influence de celle-ci sur le frottement obtenu. La rugosité est déterminée par les mêmes paramètres que Yoshimi et Kishida (1981, a) que nous étudierons par la suite (paragraphe I.2.2). Une correction est apportée au frottement latéral obtenu pour prendre en compte la différence de rugosité entre le pieu réel et le manchon de mesure.

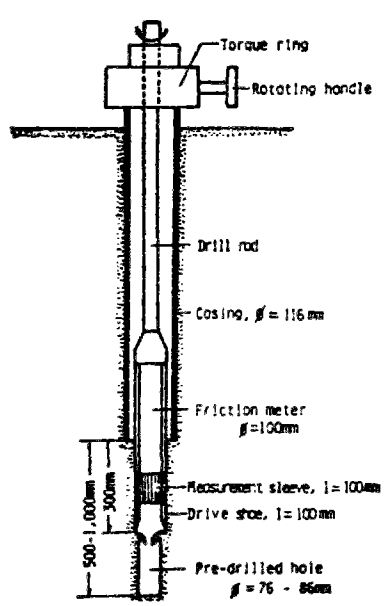


Figure I-12. *Schéma du "frictiomètre" (d'après Kishida et al., 1986)*

b. Résultats d'essais

Des comparaisons ont été effectuées entre les résultats d'essais d'arrachement de pieux et les résultats d'essais au frictiomètre.

La figure I-13 (a) présente le frottement obtenu en fonction de l'angle de rotation pour deux rugosités différentes sur les deux sites d'essais. Nous observons l'importance de la rugosité sur l'allure des courbes obtenues. Pour une rugosité faible ($R_{max.}$ = 2 µm), les courbes atteignent de façon quasi linéaire une valeur maximale puis nous avons un palier de frottement. Pour une rugosité importante ($R_{max.}$ = 430 µm), il est regrettable que le frottement obtenu dépasse les capacités de l'appareil.

Les pieux d'essais sont des pieux en acier de diamètre 400 mm et ayant une rugosité de 40 µm. Les conditions géologiques et les dimensions de chaque pieu d'essai sont présentées à la figure I-13 (b).

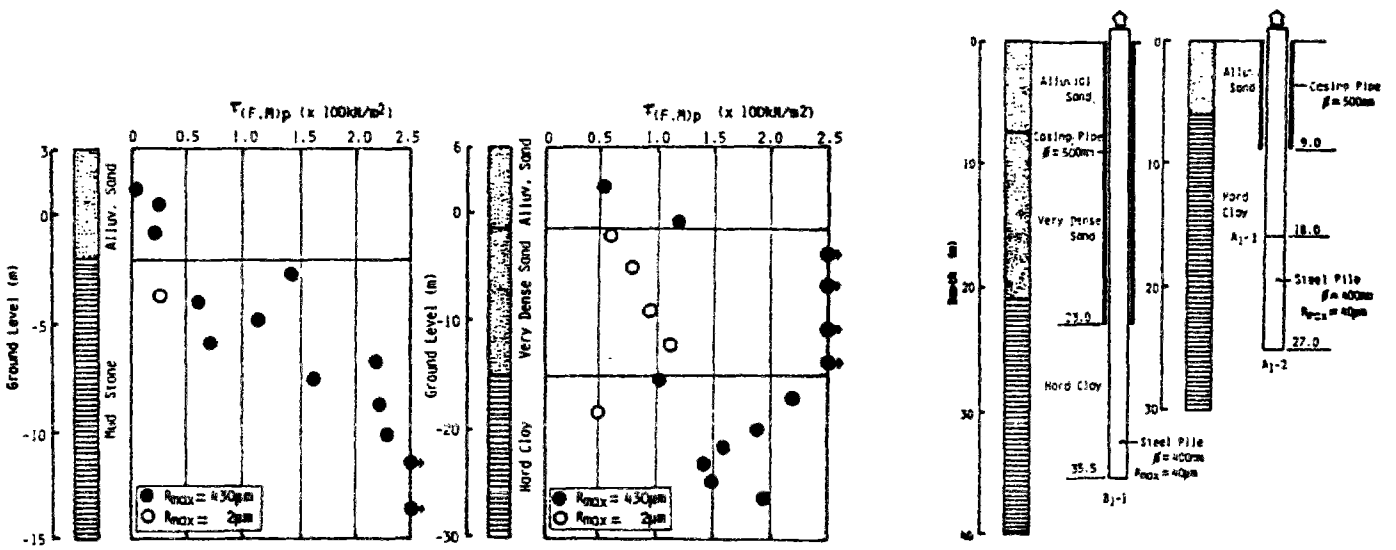


Figure I-13. *(a) Résultats d'essais au frictiomètre (b) schéma des conditions géologiques et des pieux d'essais (d'après Kishida et al., 1986).*

Les valeurs de frottement ultime obtenues par les essais d'arrachement et à l'aide d'essais au frictiomètre sont présentées au tableau I-1. Pour obtenir les valeurs à partir du frictiomètre, des essais de laboratoire complémentaires sont nécessaires : il faut obtenir la

courbe coefficient de frottement - rugosité à partir d'essais de cisaillement direct à la boîte de cisaillement modifiée (qui sera présentée au paragraphe I.2.2) sur un échantillon de sol en contact avec le pieu, pour pouvoir apporter la correction relative à la différence de rugosité entre le manchon de mesure et le pieu.

Les résultats obtenus à l'aide du frictiomètre sont très proches de ceux obtenus sur pieux réels. Cependant, ils nécessitent une connaissance du coefficient de frottement en fonction de la rugosité, d'où des essais de laboratoire complémentaires.

Les auteurs concluent en notant l'utilité du frictiomètre pour les sols durs, comme du sable dense ou de l'argile raide, une sondeuse standard étant seulement nécessaire.

Tableau I-1. *Comparaison des valeurs de charge obtenues au frictiomètre et par les essais d'arrachement de pieux (d'après Kishida et al., 1986).*

Pieu n°	Longueur (m)	Frictiomètre	Essai d'arrachement
A1-1	9	1590 kN	1600 kN
A1-2	18	3170 kN	2800 kN
B1-1	12,5	2200 kN	1950 kN

I.2.1.4 Le phicomètre

Initialement, l'utilisation du phicomètre permet d'obtenir un angle de frottement et une cohésion mesurés *in situ* dans des sols où les essais classiques de laboratoire sont défaillants (Philipponnat, 1986). Les caractéristiques obtenues sont des caractéristiques à court terme, les caractéristiques à long terme pour des sols peu perméables se faisant à l'aide d'abaque.

A partir de cet essai phicométrique, Philipponnat et Zerhouni (1991, 1993) ont développé un nouvel essai *in situ*, l'essai de frottement latéral à volume constant. Il consiste à reproduire le comportement à l'arrachement d'une inclusion dans le sol.

a. Description et procédure expérimentale

La seule différence par rapport au phicomètre concerne la partie de mesure de la sonde dont la face extérieure ne comporte plus des anneaux mais est striée de manière régulière afin d'augmenter sa rugosité (figure I-14).

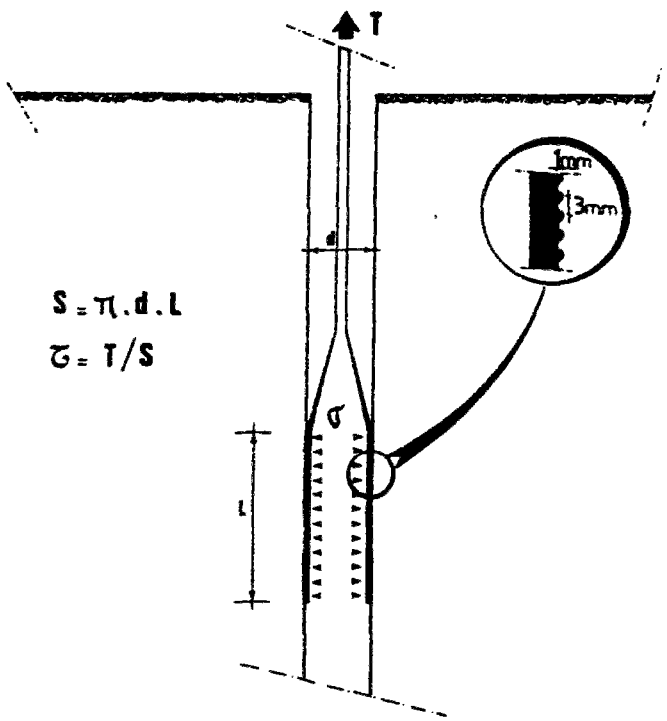


Figure I-14. *Principe de l'essai de frottement latéral à volume constant au phicomètre (d'après Philipponnat et Zerhouni, 1991).*

L'essai de frottement à volume constant consiste à descendre une sonde rugueuse dans un forage préalable d'environ 64 mm de diamètre puis de gonfler cette sonde à une pression initiale et d'appliquer une force d'arrachement verticale à une vitesse de 2 mm/min en maintenant le volume constant. L'effort axial et la pression normale appliquée au sol (déduite de la pression de sonde en tenant compte de la résistance de la membrane) sont mesurés au cours de l'essai. Plusieurs essais d'arrachement sont réalisés avec des pressions de sonde croissantes.

b. Résultats d'essais

La figure I-15 présente les résultats d'un essai effectué à 10,5 mètres de profondeur dans une craie sableuse. Pour une valeur assez faible de la pression initiale dans la sonde, nous

observons à l'interface une dilatance (courbe de frottement latéral également sans pic) alors que pour des valeurs de pression initiale de sonde supérieures, nous avons une contractance du sol autour de la sonde (baisse de la pression de sonde). Le graphique (d) nous montre des chemins de contrainte qui viennent s'aligner selon une droite qui permet de déterminer l'angle de frottement et l'adhérence sol - inclusion. Les rapports élevés du coefficient μ égal au rapport du frottement sur la pression normale (comme défini au paragraphe I.1.3) sont certainement dus à la forte rugosité de la sonde striée qui surestimerait les valeurs de frottement d'un pieu réel.

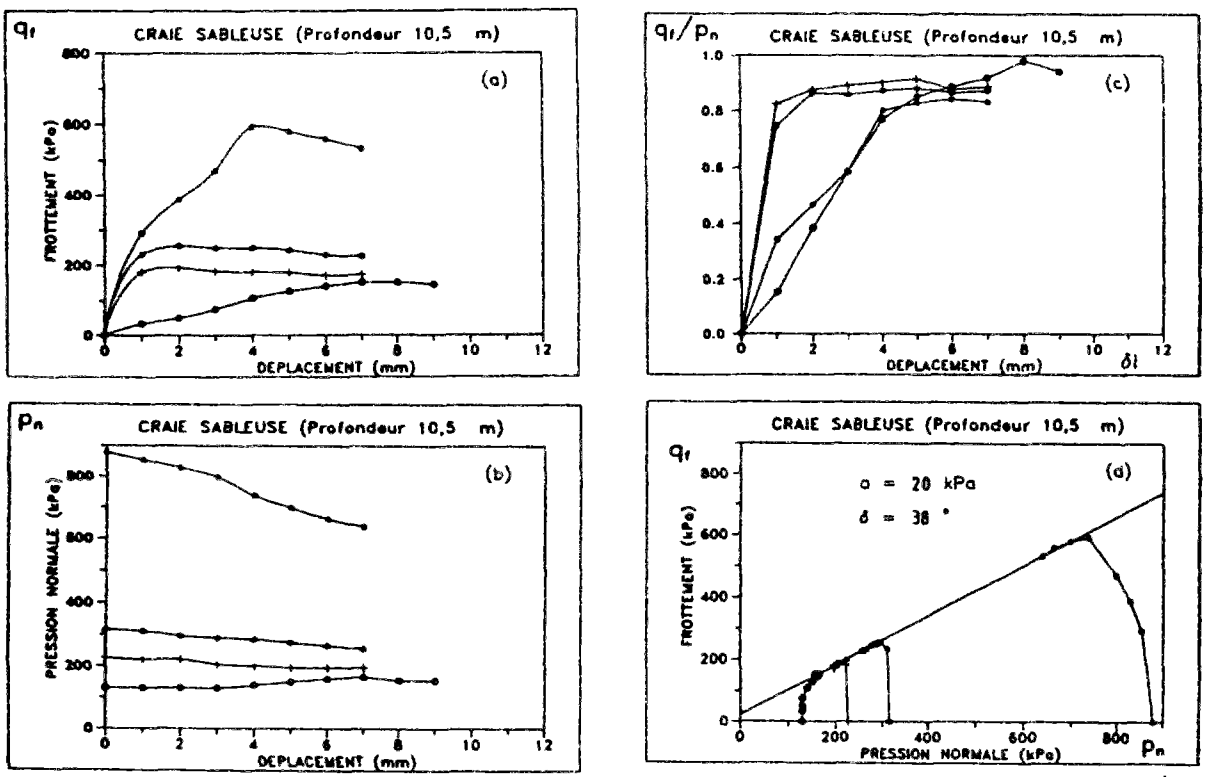


Figure I-15. *Essai de frottement latéral à volume constant dans la craie sableuse (d'après Philipponnat et Zerhouni, 1993).*

I.2.1.5 L'appareil de cisaillement simple annulaire de terrain

La demande de brevet sur le principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement simple annulaire de laboratoire (que nous présenterons au chapitre suivant) a été accompagnée d'une demande sur le principe de fonctionnement d'un dispositif de mesure pour l'évaluation

des propriétés d'interface entre un matériau solide et un matériau granulaire *in situ* (Belmont et *al.*, 1994).

> *Il convient de noter que si les principes de fonctionnement de cet appareil font l'objet d'une demande de brevet, cet appareil n'a pas encore été fabriqué et ne le sera peut être jamais.*

Les termes de l'abrégé sont les suivants (figure I-16):

> Un tube cylindrique de carottage 106 a pénétré dans le sol et contient une carotte 109 dudit terrain constituant le matériau granulaire. Un matériau central 101 a été descendu dans le tube 106 et est au contact du matériau granulaire d'interface 109A. En regard du noyau central 101, la paroi interne 106A du tube 106 est éventuellement revêtue d'une vessie gonflable 126 dont la face axiale 126A comporte une symétrie de révolution d'axe de révolution 105 confondu avec l'axe commun du tube 106 et du noyau central 101. La rugosité de la face 16A est par ailleurs la plus faible possible afin d'éviter le remaniement du sol carotté. Un moteur 102 d'entraînement en rotation relative du noyau central 101 par rapport au tube 106 et à la vessie 126 est relié au noyau central 101 par un arbre d'entraînement 103. [...] Les dispositifs de mesure conformes à l'invention permettent, de manière nouvelle, et ce quelques soient les conditions aux limites imposées, d'obtenir des déplacements, des déformations et des contraintes uniformes du matériau d'interface. [...]

Lors de la recherche d'antériorité par l'Institut National de la Propriété Industrielle, un dispositif de mesure *in situ* a été défini comme se rapprochant beaucoup, dans sa conception, de l'appareil de cisaillement simple annulaire de terrain. Nous allons rapidement présenter son principe de fonctionnement.

Henke et Henke (1986) présentent un dispositif de mesure de la dégradation et du potentiel de liquéfaction d'un sol. Une sonde, comportant deux cylindres concentriques, est introduite dans le sol à tester, en fond de forage par exemple (figure I-17). Le cylindre

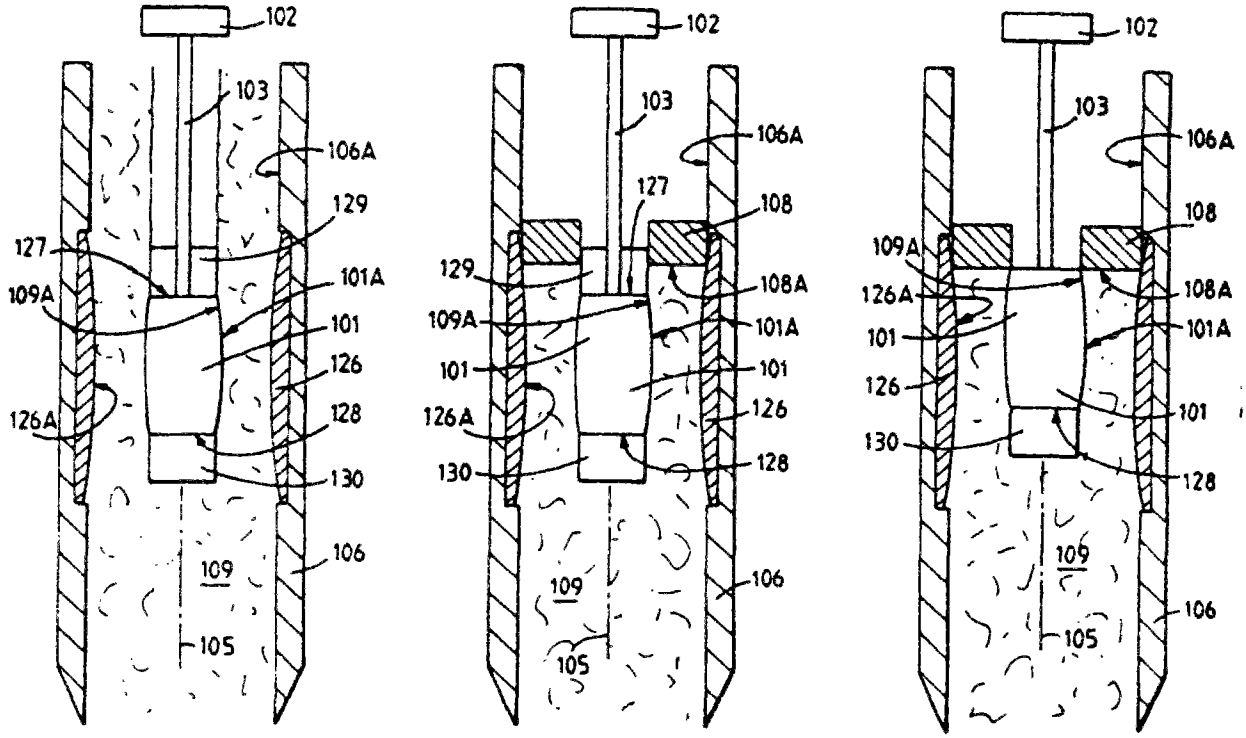


Figure I-16. *Dispositif de mesure pour l'évaluation des propriétés d'interface entre un matériau solide et un matériau granulaire (d'après Belmont et al., 1994).*

intérieur est mis en rotation par une impulsion (couple donné) ou par un oscillateur (couple sinusoïdal imposé), et le déplacement résultant est mesuré. La différence majeure avec l'appareil de cisaillement simple annulaire de terrain concerne le dispositif d'entraînement, en rotation dans notre cas et à couple imposé dans le cas présent. Des résultats intéressants montrent que cet appareil permet de mettre en évidence le potentiel de liquéfaction d'un sol, par mesure de la surpression interstitielle.

I.2.2. Appareils de mesure au laboratoire

Depuis les années 60, de nombreux types d'appareillages ont été développés. De la boîte de cisaillement direct plan modifiée aux derniers appareils utilisés, la complexité des essais n'a cessé d'augmenter : comme nous allons le voir, des essais où les paramètres sont bien contrôlés, nécessitent un équipement adapté sophistiqué.

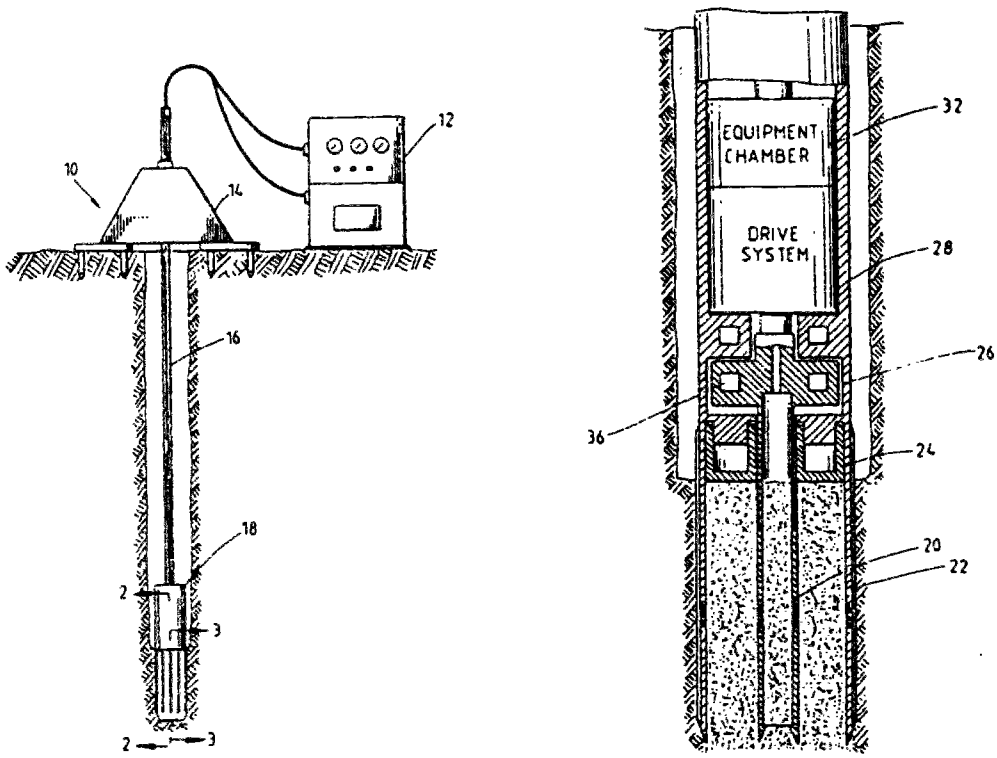


Figure I-17. *Dispositif de mesure du potentiel de liquéfaction d'un sol (d'après Henke et Henke, 1986)*

I.2.2.1 La boîte de cisaillement direct plan modifiée

Potyondy (1961) a utilisé une boîte de cisaillement direct pour mesurer le frottement superficiel entre un échantillon de sol et des matériaux de construction. Jusqu'à lors, les valeurs employées étaient les valeurs moyennes obtenues à partir d'essais en vraie grandeur, avec une prise en compte qualitative de facteurs tels que le type de matériaux de construction et son état de rugosité.

Le matériau de construction était placé dans la demi-boîte inférieure et le sol dans celle supérieure, la surface de cisaillement étant imposée.

Plusieurs centaines d'essais furent réalisés sur de l'acier, du bois et du béton (les matériaux de construction les plus employés) ayant de fortes et faibles rugosités, sur

différents types de sols (cohérents ou granulaires), à différentes densités, différentes teneurs en eau et sous différentes contraintes normales imposées.

Les résultats obtenus donnent le rapport entre l'angle de frottement superficiel et l'angle de frottement interne mais montrent également l'influence, pour les sols fins, de la cohésion sur l'adhérence (tableau I-2).

Tableau I-2. *Coefficients de frottement sol - matériaux de construction proposés (d'après Potyondy, 1961)*

Construction material			Sand		Cohesionless silt			Cohesive granular soil		Clay		
			0·06 < D < 2·0 mm		0·002 < D < 0·06			50% Clay + 50% Sand		$D \leq$ 0·06 mm		
	Surface finish of construction material		Dry	Sat.	Dry	Sat.		Consist. I. = 1·0–0·5		Consist. Index: 1·0–0·75		
			Dense		Dense	Loose	Dense					
			f/ϕ	f/ϕ	f/ϕ	f/ϕ	f/ϕ	f/ϕ	f_c	f/ϕ	f_c	$f_{c\,max}$
Steel	Smooth	Polished	0·54	0·64	0·79	0·40	0·68	0·40	—	0·50	0·25	0·50
	Rough	Rusted	0·76	0·80	0·95	0·48	0·75	0·65	0·35	0·50	0·50	0·80
Wood	Parallel to grain		0·76	0·85	0·92	0·55	0·87	0·80	0·20	0·60	0·4	0·85
	At right angles to grain		0·88	0·89	0·96	0·63	0·96	0·80	0·40	0·70	0·50	0·85
Concrete	Smooth	Made in iron form	0·76	0·80	0·92	0·50	0·87	0·84	0·42	0·68	0·40	1·00
	Grained	Made in wood form	0·88	0·88	0·96	0·62	0·96	0·90	0·58	0·80	0·50	1·00
	Rough	Made on adjusted ground	0·98	0·90	1·00	0·79	1·00	0·95	0·80	0·95	0·60	1·00

Pour mettre en pratique les résultats donnés, il suffit donc, pour un sol déterminé, de faire une analyse granulométrique et un essai de cisaillement classique à la boîte de Casagrande.

Cependant, cet essai présente de nombreux défauts. Tout d'abord, ceux de l'essai de cisaillement classique sable-sable sont toujours existants et même amplifiés selon la rugosité du matériau analysé et de nouveaux viennent s'y superposer.

- un pivotement de la boîte traduit la non - homogénéité amont - aval de l'échantillon, donc les contraintes et la densité sont hétérogènes au sein de l'échantillon et en particulier au niveau de la surface de cisaillement.

- même pour de petites déformations, des grains de sol viennent au niveau de contact entre les deux demi-boîtes, provoquant des frottements parasites supplémentaires et une perte de matériaux non négligeable pour de moyens et grands déplacements relatifs.

Malgré ces défauts incontestables, cet essai est celui qui a été le plus souvent utilisé pour mesurer des coefficients de frottements sol - matériau.

Mohan et Chandra (1961) ont réalisé des essais "d'adhésion" entre de l'argile et du béton avec une technique analogue à celle de Potyondy (1961). Ils comparèrent les résultats obtenus avec des essais d'arrachement de pieux *in situ*. Ces résultats montrent que la diminution du frottement est due en partie au ramollissement de l'argile adjacente au pieu et à une perte de l'adhésion entre le béton et le sol.

Butterfield et Andrawes (1972) ont étudié le frottement entre du sable et différents matériaux (plexiglas, verre et acier) et ont également réalisé des essais d'adhérence - glissement ("stick - slip") pour comparer les coefficient de frottement statique et cinétique. Comme Bowden et Tabor (1950), ils obtiennent un angle de frottement statique toujours supérieur à l'angle de frottement cinétique, typiquement d'une valeur de 2° (figure I-18). Ces résultats mettent également en évidence l'influence de la densité du sol (lâche et dense) ainsi que l'influence de la rugosité (verre, plexiglass et acier) du matériau.

Feda (1976), supposant que le cisaillement autour d'un pieu se faisait avec une très faible variation de volume, a réalisé des essais de cisaillement direct à volume constant pour déterminer le frottement latéral le long d'un pieu (figure I-19).

Pour essayer de remédier à certains défauts des essais à la boîte de cisaillement modifiée, Wernick (1978, b) a présenté un appareil de cisaillement direct où le piston de chargement ne peut plus pivoter mais uniquement se déplacer verticalement ("a true direct

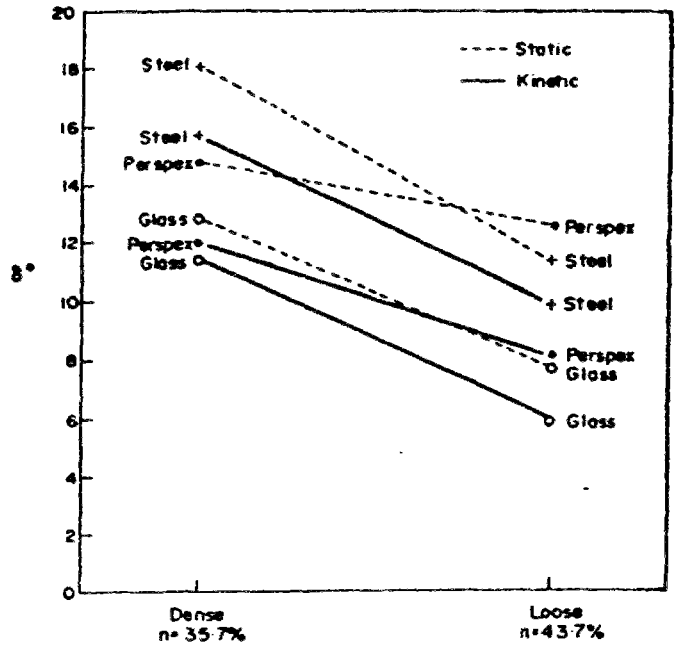


Figure I-18. *Valeurs de angles de frottement statique et cinétique pour du sable lâche et dense avec différents matériaux (d'après Butterfield et Andrawes, 1972)*

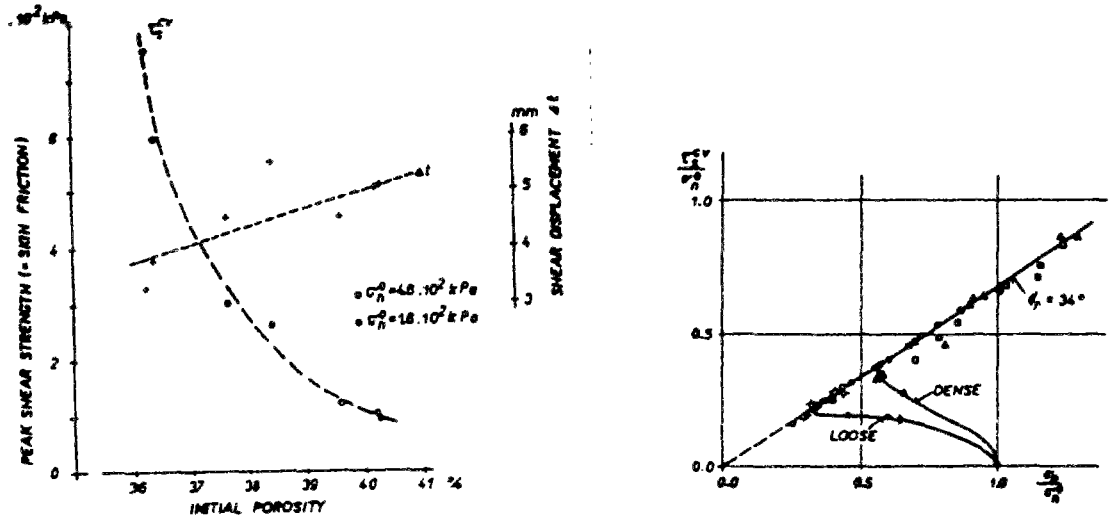


Figure I-19. *Essais de cisaillement direct à volume constant sur du sable : résultats et chemins de cisaillement (d'après Feda, 1976).*

shear apparatus", figure I-20). Nous pouvons cependant nous demander si l'adjonction de glissières pour annuler le pivotement du piston n'amplifie pas l'hétérogénéité de l'essai, le

déplacement du piston compensant partiellement, dans un essai sans modification, les différences amont - aval.

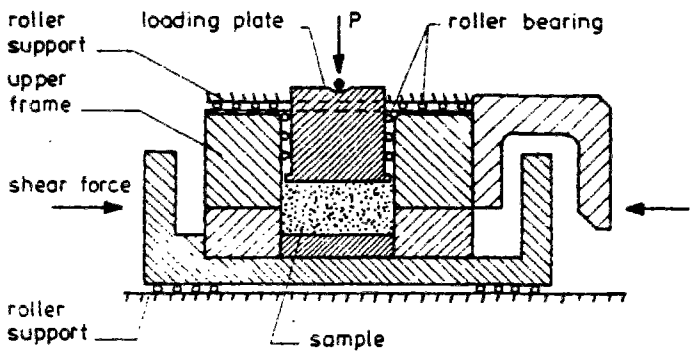


Figure I-20. *Schéma de "l'appareil de cisaillement direct vrai" (d'après Wernick, 1978 b)*

Kulhawy et Peterson (1979) ont analysé les résultats de 178 essais réalisés pour étudier les interfaces entre du sable et du béton. Différentes rugosités et différentes granulométries ont été utilisées. Pour les interfaces rugueuses, l'angle de frottement obtenu à l'interface (δ) est égal ou supérieur à l'angle de frottement interne du sable (ϕ), ce qui signifie que pour une structure présentant ces caractéristiques d'interface, la rupture pourrait se développer dans le massif de sol et non à l'interface. Pour des interfaces lisses, l'angle de frottement d'interface est inférieur à l'angle de frottement du matériau ($\delta = 0{,}9\ \phi$ en moyenne), ce qui signifie que la rupture se développe à l'interface. L'angle de frottement résiduel est égal à 95% de la valeur au pic pour les sables lâches et à 85% pour des sables denses.

Desai (1981) et Desai, Drumm et Zaman (1985) ont apporté de nouvelles modifications par rapport à l'essai standard pour la réalisation d'essais de cisaillement statiques et cycliques. Ils réfèrent cet appareil comme un appareil de cisaillement à multi-degrés de liberté ("a Cyclic Multi-Degree-Of Freedom shear device. CYMDOF") avec lequel des essais à contraintes et à déformations contrôlées peuvent être effectués (figure I-21).

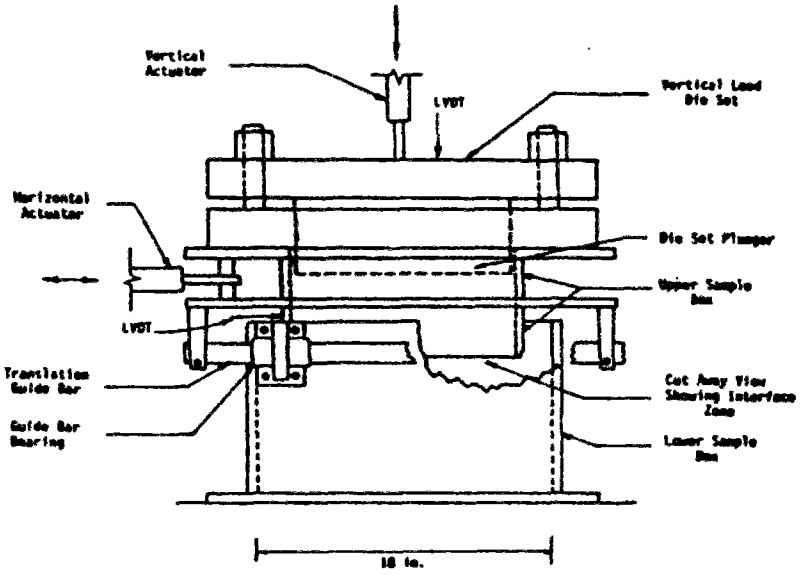


Figure I-21. *Schéma de l'appareil de cisaillement à multi-degrés de liberté (d'après Desai et al., 1985)*

Deux configurations de l'appareil sont possibles: la boîte de cisaillement en translation et l'appareil en torsion. Dans le cas de la boîte de cisaillement en translation, la demi-boîte inférieure, de section carrée 410*410 mm, contient le matériau rigide (béton, ballast, roche) et la demi-boîte supérieure, de section carrée 310*310 mm, contient l'autre matériau. Une membrane est mise autour de l'échantillon pour qu'il n'y ait plus de perte de matériau, notamment lors des essais cycliques. Une étude particulière a été menée pour mesurer les effets de la membrane sur les résultats obtenus: son influence dépend uniquement de la contrainte normale appliquée et de l'amplitude du déplacement mais pas de la densité du sol et du nombre de cycles effectués. Pour les essais réalisés, les auteurs considèrent l'influence de la membrane comme négligeable. Dans le cas de matériaux grossiers, type gravier ou ballast, la membrane n'est pas nécessairement utilisée.

L'appareil de cisaillement en torsion n'est pas très détaillé, seuls quelques tests de comparaison ayant été réalisés. Il forme un espace annulaire de diamètre extérieur 290 mm et d'une épaisseur de 60 mm. L'échantillon de sable, d'une hauteur de 130 mm, est placé dans la partie inférieure de l'espace annulaire et la partie en béton forme la partie supérieure de l'échantillon. Le chargement ou le déplacement (rotation), statique ou cyclique, est

appliqué selon une direction tangentielle à la partie supérieure ; les charges et les rotations résultantes sont mesurées.

La figure I-22 présente les résultats d'essais statiques réalisés sur du sable avec des indices de densité de 15, 65 et 80 pour-cent et mettent en évidence l'influence de la densité sur l'angle de frottement obtenu.

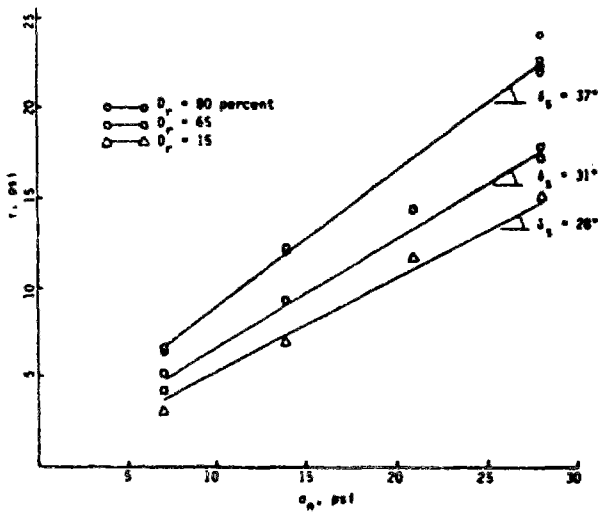


Figure I-22. *Enveloppe de rupture de Mohr - Coulomb pour des essais de cisaillement statique sur du sable (d'après Desai et al., 1985).*

Acar et *al.* (1982) ont réalisé des essais à contrainte normale constante pour analyser l'interface entre du sable quartzeux et de l'acier, du bois et du béton. Ils ont étudié la variation de la rigidité de cisaillement (valeur représentant la variation du cisaillement en fonction de la variation du déplacement, paramètre de l'élément d'interface dans la méthode des éléments finis présentée par Clough et Duncan, 1969) avec l'indice des vides et la densité relative pour formuler un modèle hyperbolique du comportement de l'interface, utilisable dans des calculs utilisant la méthode des éléments finis. La figure I-23 montre l'influence de la rugosité, de la contrainte normale et de l'indice de densité sur les résultats obtenus.

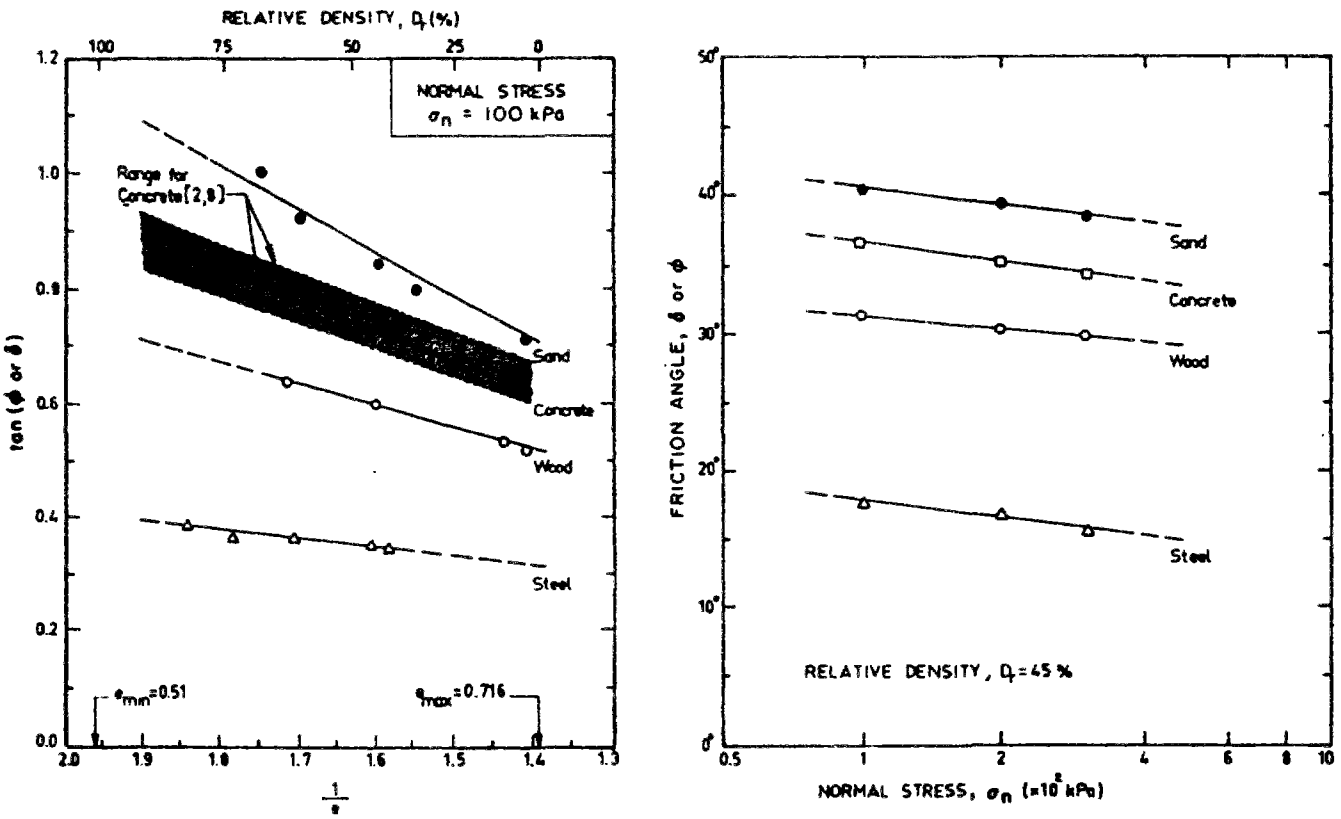


Figure I-23. *Variation du coefficient de frottement avec la contrainte normale et l'indice des vides pour différents matériaux (d'après Acar et al., 1982)*

Bosscher et Ortie (1987), à partir d'essais entre du sable et des échantillons de roche et de béton, ont analysé l'influence de la rugosité sur l'angle de frottement apparent à l'interface et ont conclu que cet angle approche l'angle de frottement interne du sable lorsque la rugosité augmente (figure I-24).

Airey et *al.* (1992), Al-Douri et Poulos (1992), Tabucanon et Airey (1992) et Tabucanon et *al.* (1995), de l'université de Sydney, ont utilisé une boîte de cisaillement direct modifiée (60mm*60mm) pour réaliser des essais de cisaillement d'interface statiques et cycliques. Les essais ont été réalisés à contrainte normale constante et à rigidité normale imposée. Les effets de la rugosité, de la rigidité normale, de la densité relative, de la contrainte initiale appliquée et de l'amplitude du déplacement cyclique ont été analysés. Les comportements observés dans ces essais sont similaires à ceux observés sur des essais sur

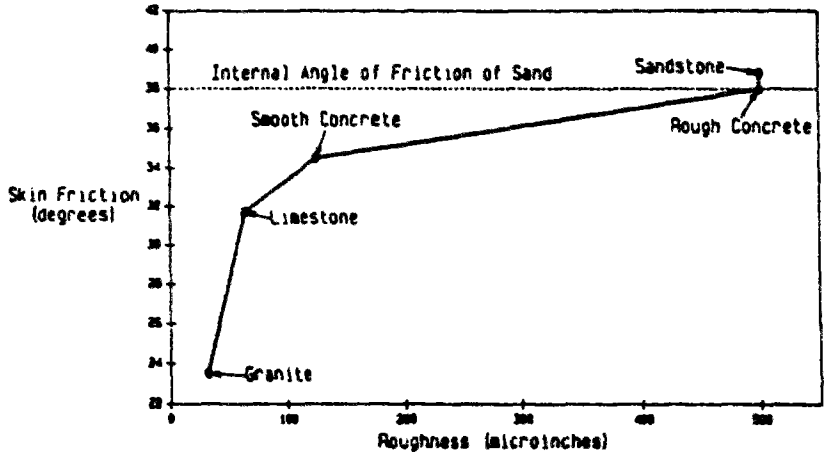


Figure I-24. *Variation du coefficient de frottement en fonction de la rugosité (d'après Bosscher et Ortie, 1987)*

pieux modèles et les résultats obtenus apportent des informations importantes sur les paramètres de résistance nécessaires pour le dimensionnement des fondations sur pieux. Les essais à rigidité normale imposée permettent de prendre en compte les effets des variations de volume dans le sol proche du pieu sollicité (résultats analogues à ceux obtenus par Boulon et Foray, 1986). Dans les sables denses, qui ont tendance à augmenter de volume lorsqu'ils sont cisaillés, le cisaillement et les contraintes normales développées sont supérieures pour des essais à rigidité normale imposée (par rapport à des essais à contrainte normale constante, qui sont des essais à rigidité nulle) et augmentent avec la rigidité (figure I-25). Dans le cas des sables lâches, qui se contractent lorsqu'ils sont cisaillés, les contraintes normales sont plus faibles et diminuent avec la rigidité.

Zong-Ze et *al.* (1995) ont utilisé une boîte de cisaillement de grande dimension (450 mm x 450 mm et échantillon de 80 mm de hauteur) pour réaliser une étude originale sur le déplacement du matériau granulaire le long de l'interface. Cette boîte a été équipée de fenêtres pour visualiser le déplacement au sein de l'interface entre l'échantillon de sable et le bloc de béton lors de l'essai de cisaillement (figure I-26).

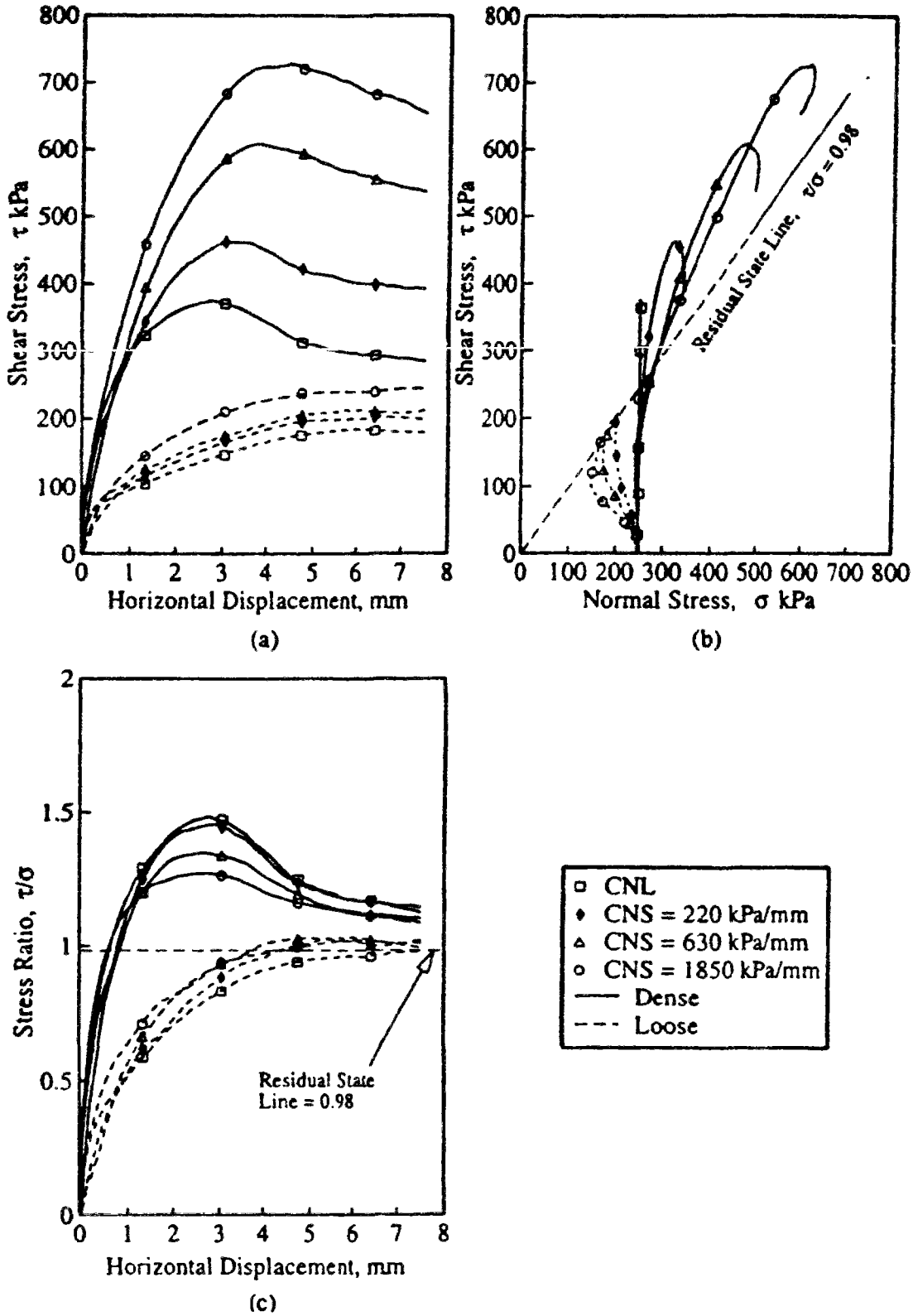


Figure I-25. *Résultats d'essais de cisaillement à rigidité normale imposée sur du sable de Bass Strait (d'après Tabucanon et al., 1995)*

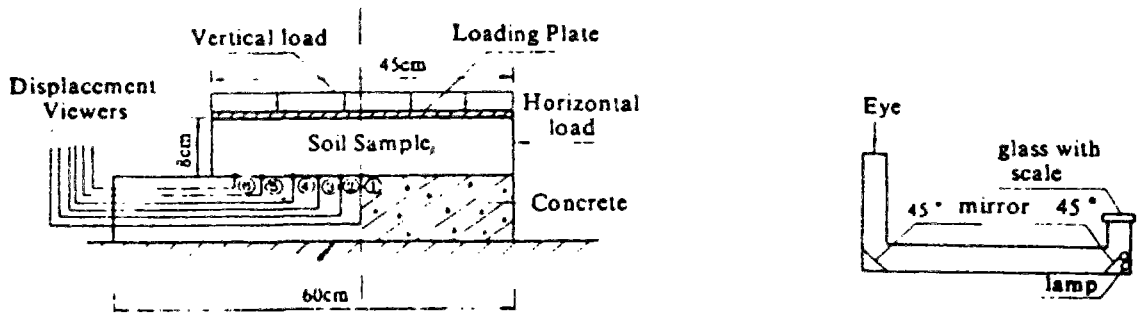


Figure I-26. *Appareil de cisaillement direct et structure d'une fenêtre de visualisation (d'après Zong-Ze et al., 1995)*

Les résultats obtenus, pour des contraintes normales relativement faibles, sur du sable moyennement dense et avec une rugosité d'interface mal déterminée par rapport au D_{50} sont présentés sur la figure I-27. Les déplacements au sein de l'échantillon se font progressivement de la partie extérieure vers l'intérieur. Ils ont pu ainsi corréler la longueur de la surface de rupture avec le déplacement tangentiel relatif et proposer une loi contrainte de cisaillement - déformation rigide plastique.

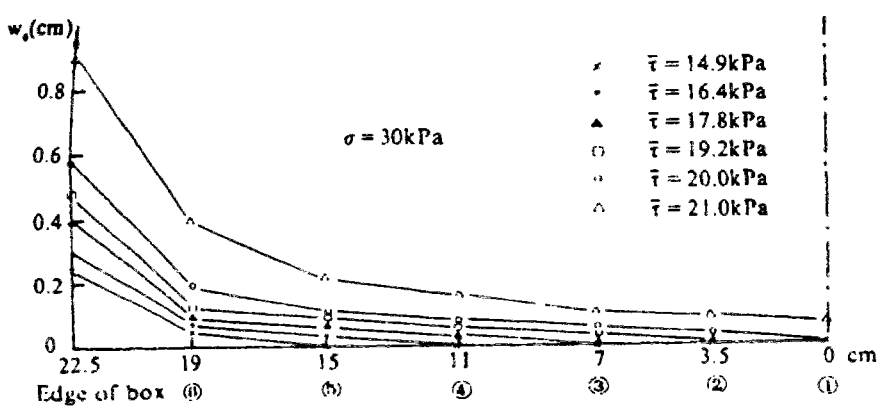


Figure I-27. *(a) Variation du déplacement le long de l'interface; (b) contrainte de cisaillement moyenne en fonction du déplacement relatif (d'après Zong-Ze et al., 1995)*

Sous la direction de M. Boulon, de nombreuses études ont été et sont réalisées au laboratoire 3S/IMG sur les essais de cisaillement d'interface. Le but de ces études est de

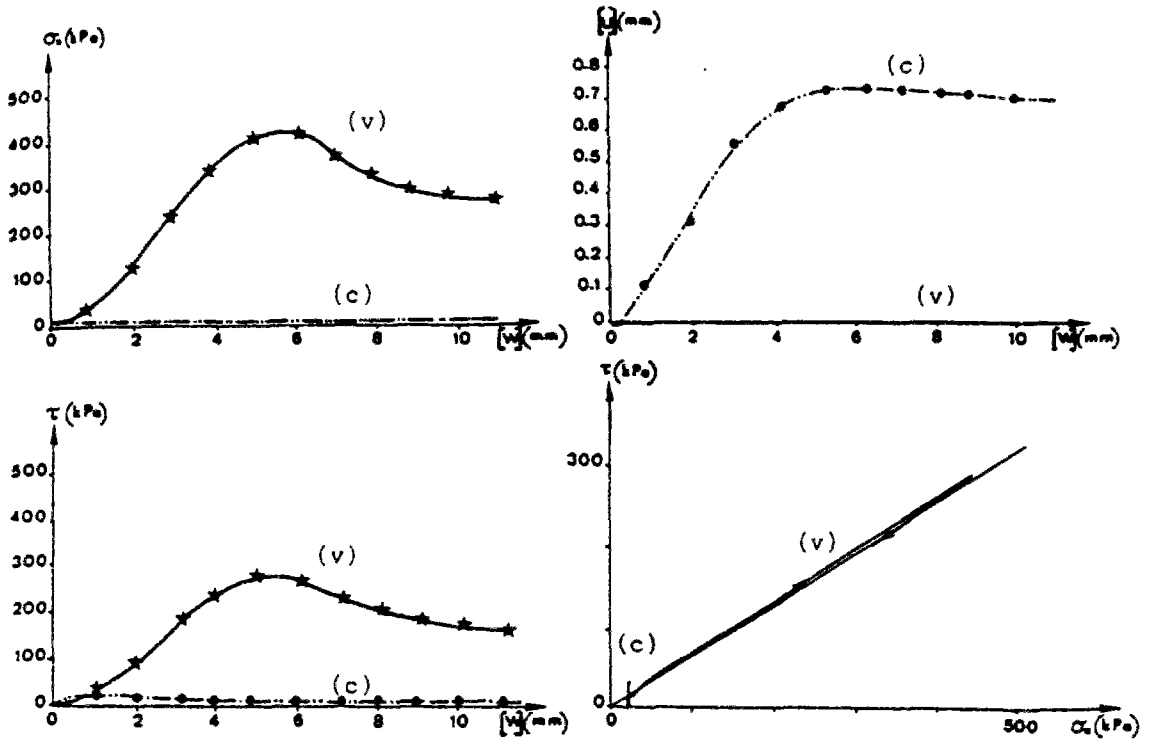
prévoir le frottement latéral des pieux et tirants d'ancrage, sous forme de loi d'interface, en utilisant la méthode des éléments finis (Boulon et *al.*, 1978; Boulon et *al.*, 1979; Boulon et Puech, 1984; Boulon, 1986; Boulon et *al.*; 1986; Boulon, 1991). Nous présenterons ici les résultats principaux obtenus à partir d'essais à la boîte de cisaillement direct modifiée.

Plytas (1985) a réalisé des essais de cisaillement direct à volume constant et à contrainte normale constante en faisant varier les différents paramètres contrôlant l'interface. Des résultats typiques sont présentés à la figure I-28 pour une interface rugueuse.

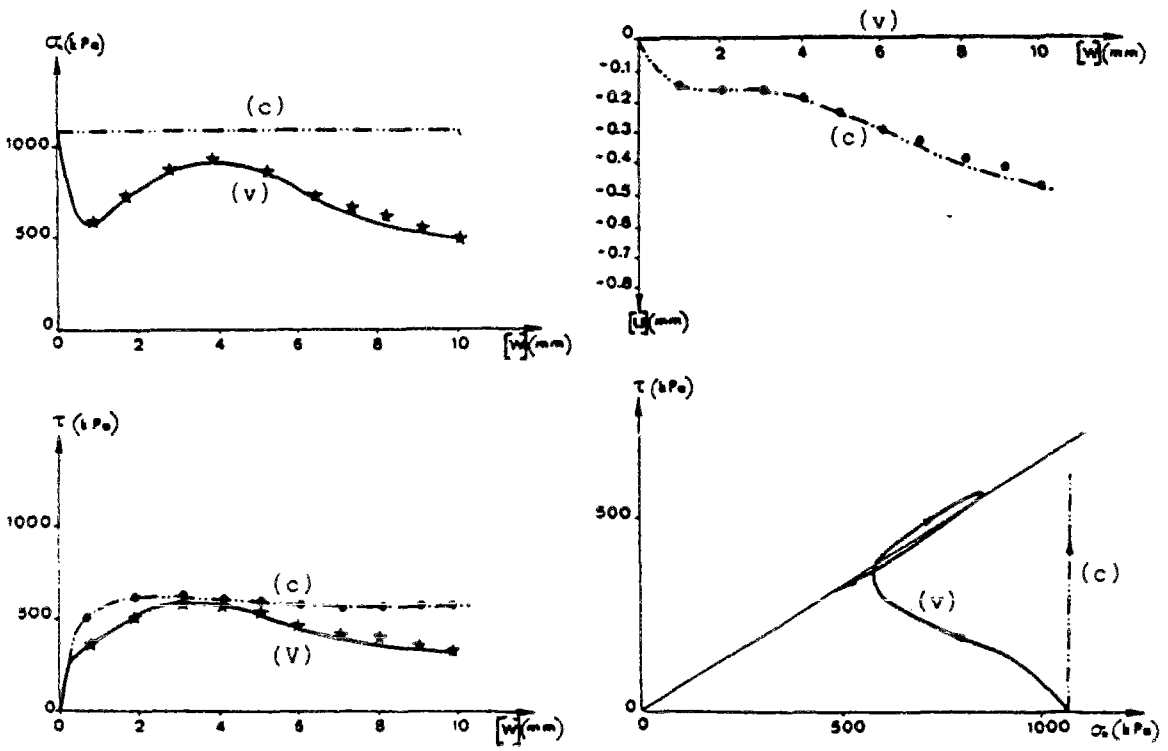
Pour de fortes densités (densité relative de 0,9) et une contrainte initiale faible (12,5 kPa), la contrainte normale pour l'essai à volume constant peut atteindre 30 fois sa valeur initiale et mobilise une contrainte de cisaillement 15 fois plus importante. Il est intéressant de noter que le chemin de contrainte, dans le cas de l'essai à volume constant, remonte la courbe intrinsèque résiduelle avant de redescendre le long de celle-ci. La pente de cette droite est de l'ordre de 0,60, beaucoup plus faible que la pente de 0,98 obtenue par Tabucanon et *al.* (1995). Une phase de contractance initiale est suivie d'une phase de dilatance, puis nous pouvons remarquer l'amorce d'une seconde phase de contractance. Boulon et *al.* (1986) interprètent cette décroissance après pic par trois phénomènes : rotation de la boîte, perte de matériau entre la plaque et la boîte et rupture des grains et production de particules fines durant le cisaillement mais concluent que leur incidence exacte ne peut être évaluée avec un appareillage aussi rudimentaire.

Pour de faibles densités (densité relative de 0,3) et une contrainte initiale élevée (1061 kPa), les valeurs au pic de cisaillement sont sensiblement égales. La phase de contractance observée pour l'essai à pression normale constante se caractérise par une diminution de la contrainte normale dans le cas de l'essai à volume constant.

Hoteit (1990) a réalisé des essais de cisaillement à l'aide d'un appareil de cisaillement direct à rigidité normale imposée par asservissement mécanique (figure I-29). L'échantillon de sol est installé dans une demi-boîte de section horizontale 200 mm*200 mm et de hauteur 100 mm. Un hublot de verre feuilleté latéral permet une visualisation de l'échantillon de sol



(a) densité forte, contrainte normale initiale faible.



(b) densité faible, contrainte normale initiale élevée.

Figure I-28. *Essais de cisaillement extrêmes sur sable d'Hostun: (c) essai à contrainte normale constante (v) essai à volume constant (Plytas, 1985 ; d'après Boulon, 1988 a)*

en cours d'essai. Il a utilisé deux sables de minéralogie différente (sable quartzeux d'Hostun, D_{50} = 0,74 mm et sable calcaire de Quiou, D_{50} = 0,40 mm), des densités forte et faible, des plaques rugueuse et lisse, des contraintes initiales variant entre 50 et 1416 kPa et des rigidités normales imposées variant entre 0 (essai à contrainte normale constante) et ∞ (essai à volume constant).

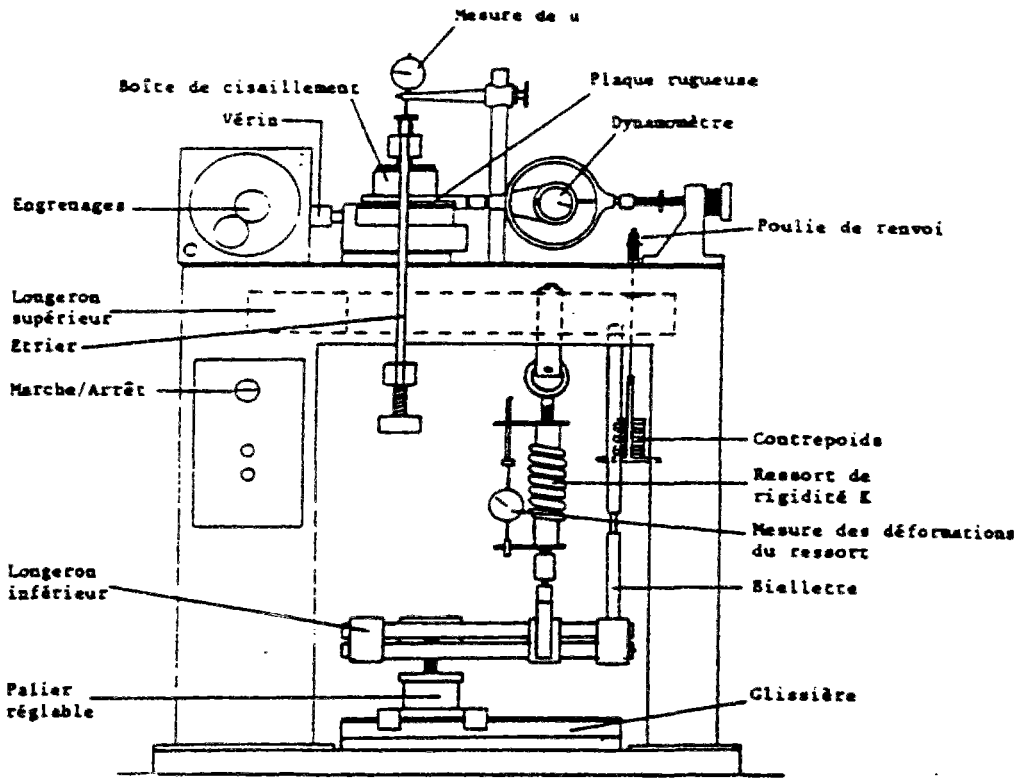


Figure I-29. *Appareil de cisaillement direct à rigidité normale imposée par asservissement mécanique (d'après Valin, 1985)*

La figure I-30 présente des résultats typiques (obtenus sur du sable d'Hostun dense avec une interface rugueuse et une pression normale initiale de 124 kPa). Ils mettent en évidence l'influence de la rigidité normale imposée sur le comportement de l'interface. Pour un essai à contrainte normale constante, nous voyons que le frottement mobilisé atteint un pic très faible puis reste sur un palier. Pour les essais à rigidité normale imposée non nulle, les contraintes de cisaillement et les contraintes normales atteignent un pic d'autant plus marqué que la rigidité est élevée avant de décroître avec l'augmentation du déplacement (seconde phase de contractance). Dans le plan (τ,σ), le chemin de contrainte suit un angle de

frottement mobilisé important (36°), atteint un maximum avant de redescendre selon un angle de frottement mobilisé plus faible (27°).

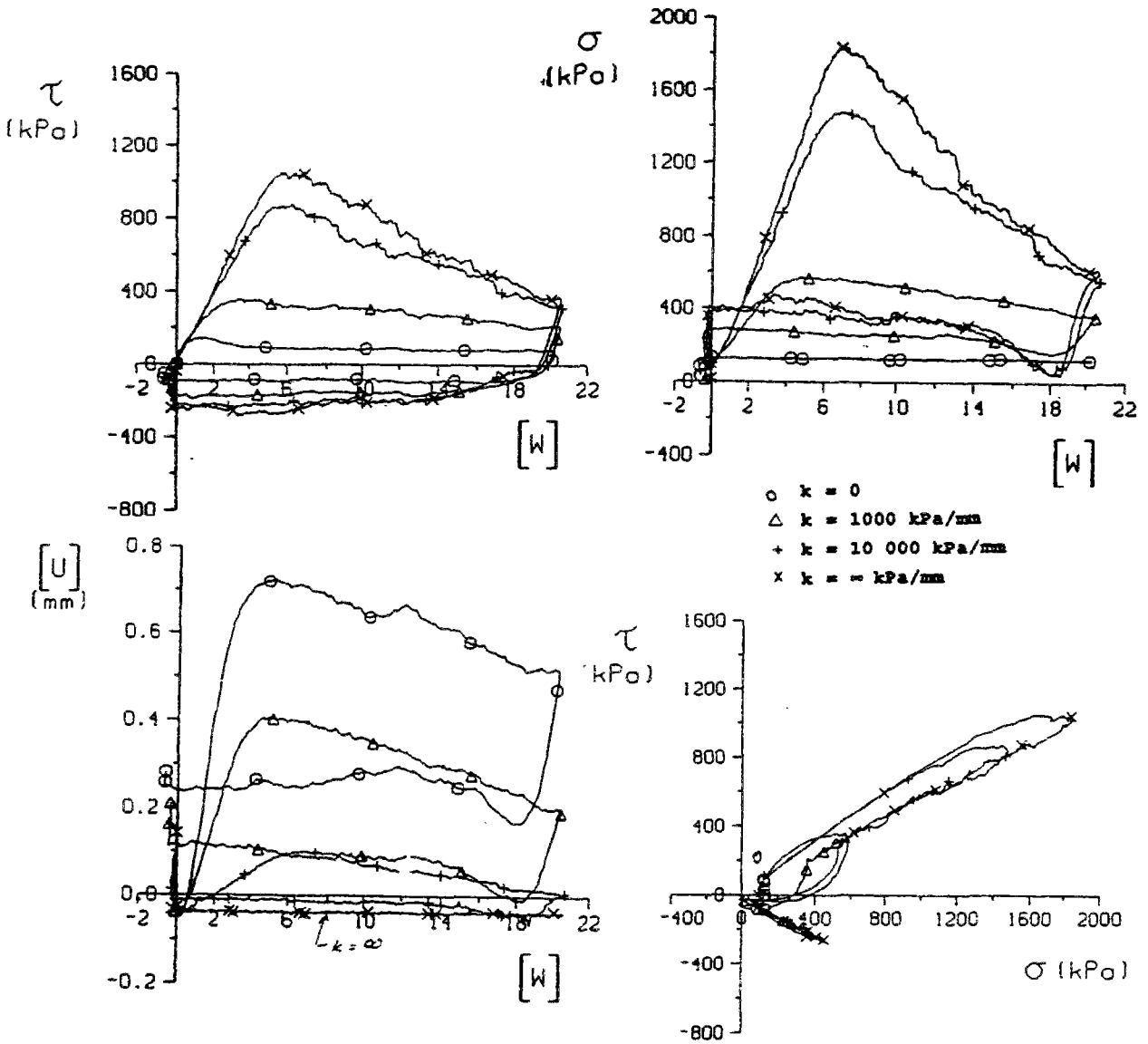


Figure I-30. *Essais de cisaillement à rigidité normale imposée sur du sable d'Hostun dense (contrainte normale initiale: 124 kPa, interface rugueuse, d'après Hoteit, 1990)*

La figure I-31 représente une synthèse des essais réalisés sur le sable d'Hostun avec une interface rugueuse. Les valeurs maximales de la contrainte de cisaillement $\tau_{max.}$ augmentent linéairement avec la contrainte initiale σ_{no} et avec la rigidité normale imposée k.

Pour un essai à volume constant, $\tau_{max.}$ est presque constant par rapport à σ_{no}. La contrainte normale maximale σ_{nmax} augmente fortement avec k pour de faibles valeurs de σ_{no}., traduisant l'effet de la dilatante empêchée dans un essai à volume constant. Pour de forte valeur de σ_{no} , σ_{nmax} tend vers des valeurs comprises entre 1 et 2 fois σ_{no} . La valeur du coefficient de frottement apparent μ^* est élevée pour de faibles valeurs de σ_{no} , confirmant les résultats obtenus par Schlosser et Guilloux (1981). Ceci découle directement des observations faites précédemment. Le déplacement vertical maximum décroît avec l'augmentation de la rigidité k et l'augmentation de σ_{no} ,ce qui confirme les variations de la valeur σ_{nmax} / σ_{no}.

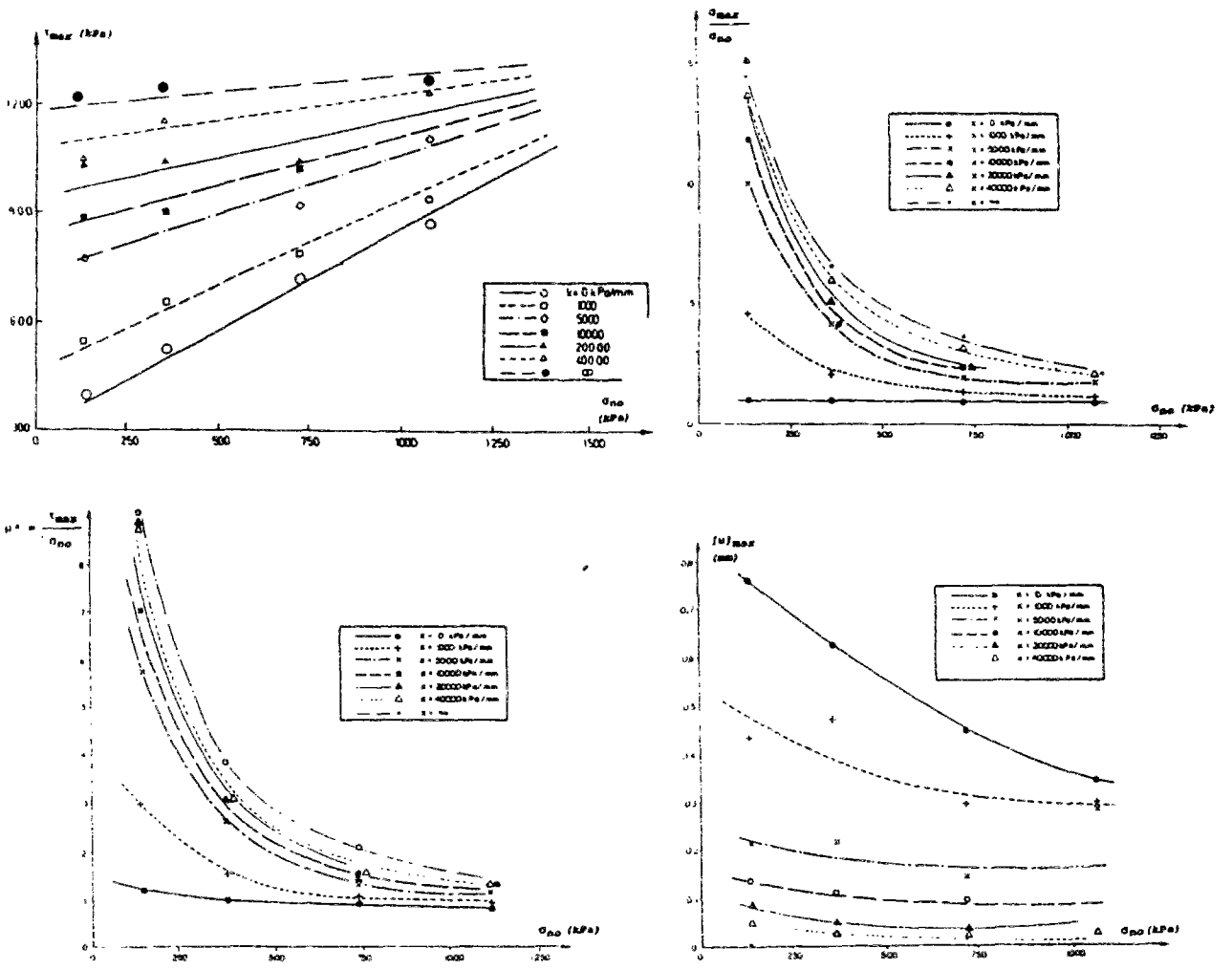


Figure I-31. *Synthèse des résultats des essais réalisés sur le sable d'Hostun dense avec une interface rugueuse (d'après Hoteit, 1990)*

Hoteit s'est également intéressé à la visualisation du champ de déformation au sein de l'échantillon lors d'un essai de cisaillement direct sol - plaque (visualisation rendue possible par le hublot de verre latéral). Cette étude expérimentale est basée sur des dépouillements stéréophotogrammétriques de faux relief (Desrues, 1984) mais également sur des observations directes de photographies et de films vidéo.

De cette analyse, Hoteit constate des concentrations des déformations au niveau des coins inférieurs de la boîte, ce qui confirme l'hétérogénéité de cet essai. Un cisaillement simple se développe au sein de l'échantillon, corroborant les résultats de Scarpelli et Wood (1982) obtenus lors d'un cisaillement direct sol - sol. Il apparaît ensuite deux zones au sein de l'échantillon: une zone active d'interface et une zone inerte seulement soumise à des contraintes verticales type compression oedométrique. L'épaisseur de la couche d'interface dépend de la densité initiale de l'échantillon et de la rugosité de la plaque, l'influence de la contrainte normale n'ayant pas été étudiée, les essais réalisés étant à contrainte normale constante de 100 kPa. Pour une interface lisse, pour une densité faible ou forte, l'épaisseur est de 0 à 1 grain. Pour une interface rugueuse, elle varie de 5 grains pour une faible densité à 10 grains pour une forte densité.

I.2.2.2 L'appareil d'arrachement à symétrie de révolution

Cet appareillage a été développé par Leonards et Gaffey à l'université Purdue (Lafayette, U.S.A.) et présenté par Brumund et Leonards (1973). Il est constitué d'un cylindre de sable placé à l'intérieur d'une cuve fermée par deux embases et soumis à une pression latérale par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc (figure I-32). L'échantillon est traversé par une inclusion rugueuse sollicitée axialement. Son analogie avec un essai d'arrachement d'inclusions ancrées *in situ* est intéressante. Trois types d'inclusions ont été utilisées: acier, ciment lisse et ciment rugueux.. Les auteurs s'en servent pour étudier le comportement statique et dynamique de l'inclusion. La sollicitation dynamique est transmise par un tube de choc générant des impulsions de l'ordre de 1 à 2 millisecondes.

Deux coefficients de frottement, l'un statique μ_s et l'autre dynamique μ_d, sont définis:

$$\mu_s = \frac{F_s}{N_s} \text{ et } \mu_d = \frac{F_d}{N_d} = \frac{F - m\,a}{N_s + \Delta N_s} \quad \text{(I-1)}$$

avec F_S : force de frottement statique; N_S : force normale statique appliquée à la surface de glissement; F_d : force de frottement dynamique; N_d : force normale dynamique appliquée à la surface de glissement; F : force dynamique appliquée à l'inclusion; m: masse de l'inclusion; a : accélération transmise à l'inclusion; ΔN_S : modification de la force normale statique due à l'application de la sollicitation dynamique.

Ce coefficient de frottement dynamique ne correspond pas au coefficient de frottement cinétique usuellement défini comme étant le coefficient de frottement pendant le glissement à l'interface (généralement inférieur au coefficient de frottement statique, comme dans le cas du frottement entre deux solides (Bowden et Tabor, 1950)). Les coefficients de frottement dynamique obtenus sont supérieurs aux coefficients de frottement statique, à cause de la différence du mode de sollicitation.

Le tableau I-3 présente les valeurs du coefficient de frottement statique obtenus.

Tableau I-3. *Valeurs moyennes des coefficient de frottement μ_s (d'après Brumund et Leonards, 1973)*

Rock Surface	"20-30" Sand[a]		"60-80" Sand[b]	
	Number of Tests	Average μ_s	Number of Tests	Average μ_s
Polished steel	8	0.34	7	0.50
Teflon coated steel	29	0.33	11	0.59
Graphite coated steel	4	0.24	4	0.39
Smooth mortar	34	0.60	3	1.05
Teflon coated smooth mortar	21	0.33	4	0.57
Graphite coated smooth mortar	28	0.32	4	0.61
Rough mortar	32	0.76	4	1.11

[a] tan ε = 0.84
[b] tan ε = 1.11

Cet appareillage présente de nombreux avantages (pas de perte de matériau, symétrie axiale, possibilité de déplacement relativement important) mais présente une forte dissymétrie amont - aval des champs de contraintes et une impossibilité de visualiser ou de mesurer les phénomènes qui se passent à l'interface.

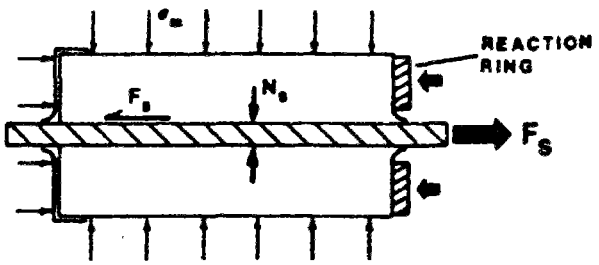


Figure I-32. *Appareil d'arrachement à symétrie de révolution (d'après Brumund et Leonards, 1973)*

Abderrahim et Tisot (1992, 1993) ont utilisé un mini-pressiomètre pour la mesure directe du frottement à l'interface sol pulvérulent - inclusion. Par ces caractéristiques géométriques (arrachement à symétrie de révolution), cet essai s'apparente à celui présenté précédemment et la méthodologie est proche de celle définie pour le phicomètre (paragraphe I.2.1). Le massif de sable est préparé à l'intérieur d'une buse en béton d'une hauteur de 0,85 m et de diamètre 0,50 m. Deux coussins gonflants, situés au sommet et à la base de la cuve, permettent l'application d'une contrainte verticale sur le sable (figure I-33).

Le mini-pressiomètre utilisé est composé à sa base d'une pointe, permettant la mise en place d'une sonde lanternée mono-cellulaire équipée d'un contrôleur pression-volume et de tiges de guidage. La sonde a un diamètre de 25 mm et une longueur utile de 285 mm, sa surface pouvant être lisse ou rugueuse (par collage de sable).

L'avantage de ce dispositif réside dans le fait que la contrainte normale à l'interface peut être contrôlée durant l'essai, ce qui permet de faire des essais d'arrachement à volume ou à contrainte normale constants. La figure I-34 présente des résultats obtenus lors d'essais à contrainte normale constante et à volume constant, sur du sable siliceux lâche, avec une sonde lisse.

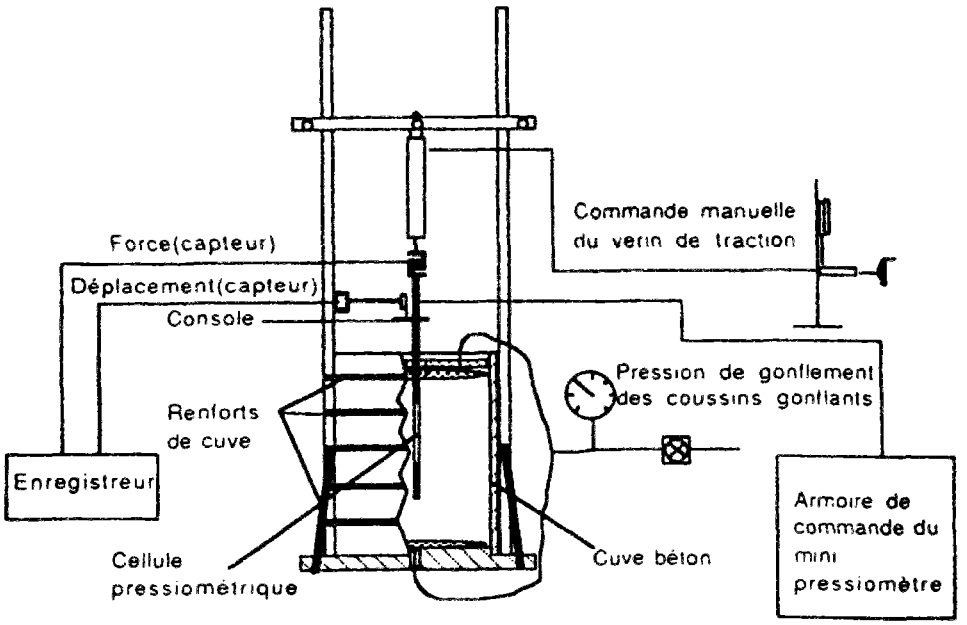


Figure I-33. *Dispositif expérimental des essais d'arrachement à l'aide du mini-pressiomètre (d'après Abderrahim et Tisot, 1992)*

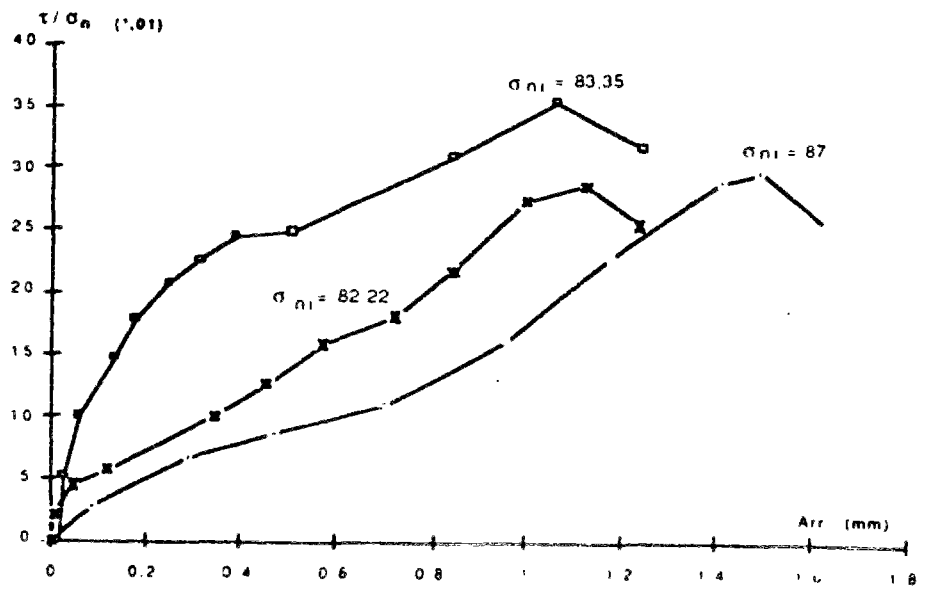


Figure I-34. *Résultats d'essais d'arrachement dans du sable siliceux lâche (a) à contrainte normale constante (b) à volume constant (d'après Abderrahim et Tisot, 1992)*

Ces essais, en plus des inconvénients énumérés précédemment, posent le problème de l'homogénéité du massif de sable, du mode d'application de la pression verticale et de la connaissance de la pression horizontale résultante.

I.2.2.3 La boîte de cisaillement annulaire

Après une présentation générale des appareils de cisaillement annulaire sol-sol, nous analyserons les appareils de cisaillement annulaire sol-structure, dont le principe de fonctionnement est identique mais où un demi-échantillon a été remplacé par un élément de structure.

a. Présentation des appareils de cisaillement annulaire sol - sol

Plusieurs formes d'appareils de cisaillement annulaire ont été développées, indépendamment, dans les années 30 par Gruner et Haefeli (1934), Cooling et Smith (1935, 1936), Hvorslev (1939) et Tiedemann (1937) pour étudier la résistance au cisaillement des sols. La figure I-35 présente ces différents types d'appareil de cisaillement annulaire qui serviront de référence à tous ceux développés postérieurement.

Ces appareils présentaient l'avantage, par rapport à l'appareil d'essai triaxial, de pouvoir mesurer la résistance au cisaillement d'un sol au delà de la rupture et pour de grands déplacements.

Yoshimi et Oh-Oka (1973) développèrent un appareil de cisaillement annulaire nouveau pour réaliser des essais de cisaillement simple avec des conditions de déformations planes. L'échantillon de sol est confiné dans un empilement d'anneaux qui peuvent glisser les uns sur les autres avec un frottement négligeable. Nous présenterons les caractéristiques de cet appareil par la suite car il sera repris pour faire des essais de cisaillement sable - métal

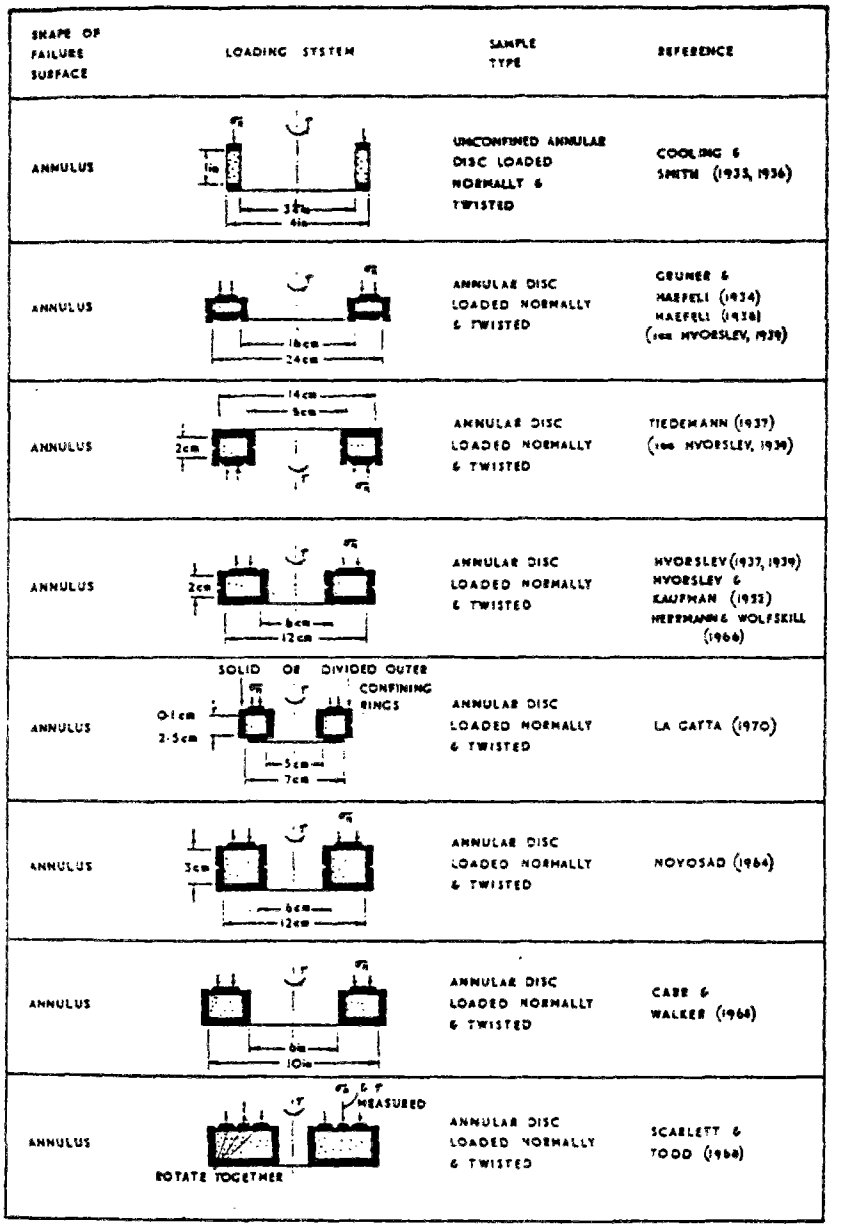


Figure I-35. *Différents types d'appareil de cisaillement annulaire (d'après Bishop et al., 1971)*

b. Appareils de cisaillement annulaire sol - structure

Ces appareils présentent l'avantage de pouvoir réaliser des essais avec de grands déplacements relatifs, sans perte de matériau et avec une gamme de contraintes très élevées

Pour étudier le comportement dynamique des interfaces sol - béton à haute pression, dans le cadre d'une recherche pour l'Agence de Défense Nucléaire Américaine, Huck et *al.*

(1974) ont développé un appareil de cisaillement simple annulaire, présenté à la figure I-36. Le but de cette étude est de proposer un modèle analytique du frottement sol - béton et de l'inclure dans un code de calcul d'ouvrages. L'échantillon annulaire a un diamètre extérieur de 17,7 cm, un diamètre intérieur de 12,7 cm et une hauteur de 2,5 cm. Il est confiné radialement par des membranes triaxiales classiques et verticalement par des surfaces en béton.

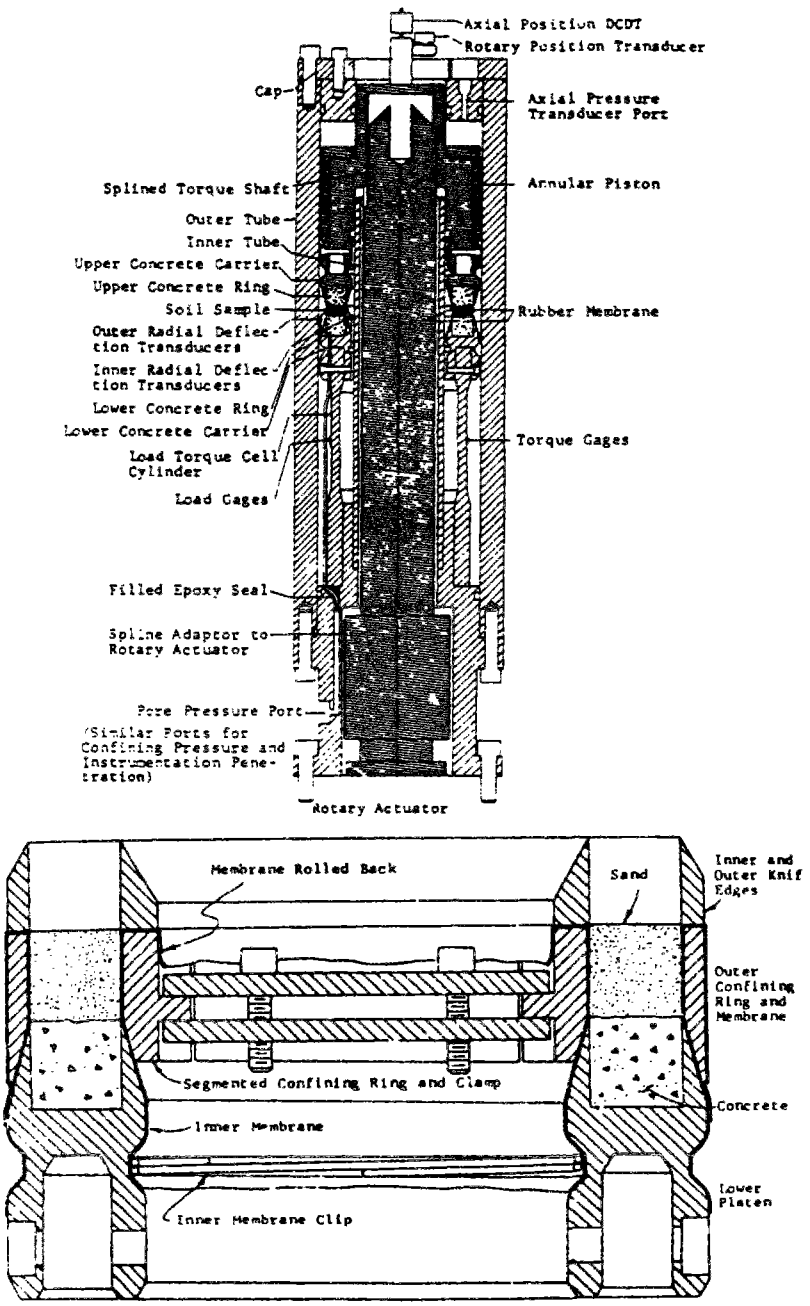


Figure I-36. *Schéma de l'appareil de cisaillement simple et géométrie de l'interface échantillon - béton (d'après Huck et al., 1974)*

Les essais ont été réalisés sur de l'argile (Edgar Plastic Kaolin, échantillon remanié préparé dans un moule) et du sable d'Ottawa (Illinois, échantillon préparé par pluviation). Cet appareil, très sophistiqué, permet de mesurer le couple total, la contrainte axiale totale, la pression de confinement, le déplacement vertical et en rotation de la partie supérieure et les déformations radiale de l'échantillon. De plus, il est équipé de capteurs pour la mesure locale de la contrainte normale à l'interface. La rugosité du béton a été minutieusement étudiée en tant que paramètre du modèle analytique.

Les pressions normales appliquées varient entre 1 et 11 MPa, pressions rarement atteintes par d'autres appareillages. Après un préchargement statique, un couple est transmis à la partie supérieure en béton qui se déplace d'un quart de tour en 100 msec.

Lié au cisaillement simple, le dépouillement des essais se révèle délicat. En effet, l'orientation de la surface de rupture est nécessaire pour déterminer l'angle de frottement. La figure I-37 présente les résultats obtenus, sous forme de cercles de Mohr.

Les auteurs ne trouvent qu'une différence très faible entre les angles de frottement obtenus pour une interface lisse et ceux obtenus pour une interface rugueuse, même s'ils observent une forte dilatance pour l'interface rugueuse.

Yoshimi et Kishida (1981 a, b), à partir de l'appareil de cisaillement annulaire présenté par Yoshimi et Oh-Oka (1973), ont réalisé des essais de cisaillement simple entre du sable et une surface métallique. Cette étude est considérée comme une référence car les auteurs ont défini clairement la rugosité de l'interface et ont observé la déformation de l'échantillon vers l'interface au moyen de rayons X.

La figure I-38 présente l'appareil de cisaillement annulaire. L'échantillon de sable, d'une hauteur variant entre 9 et 42 mm, a pour rayon intérieur 240 mm et pour rayon extérieur 288 mm. L'échantillon est préparé dans un empilement d'anneaux métalliques lubrifiés qui permettent le développement d'un cisaillement simple et assurent des déformations planes de l'échantillon (pas de déformations radiales).

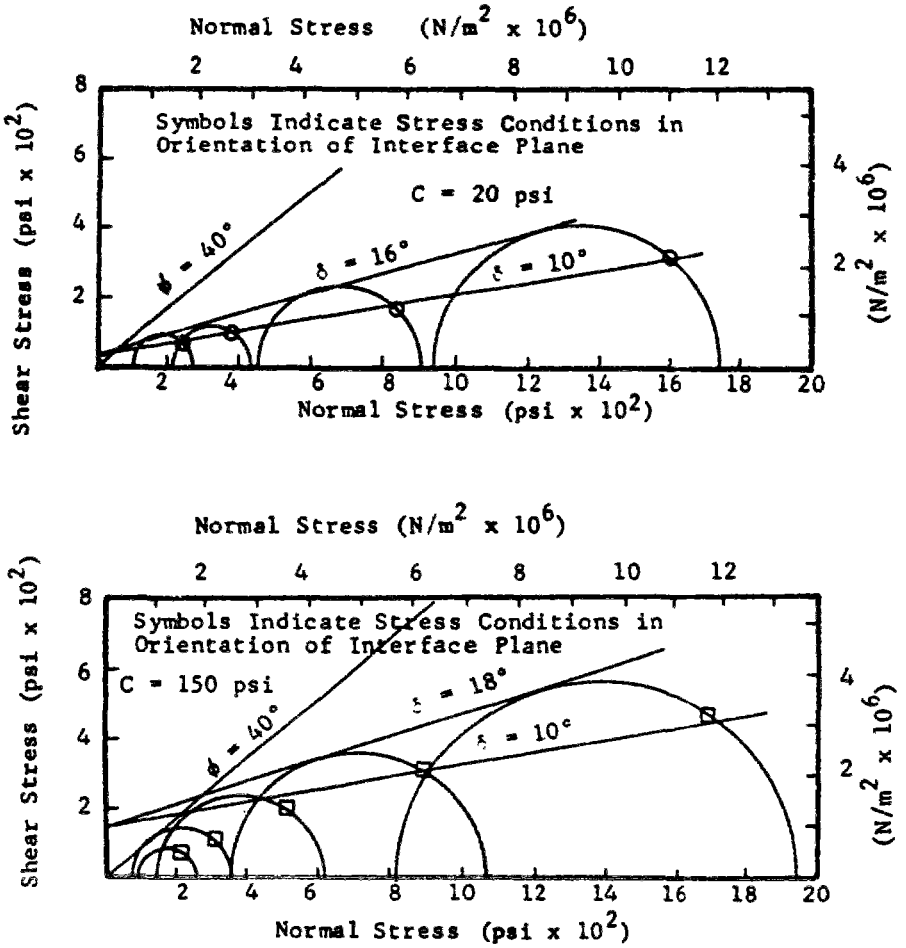


Figure I-37. *Cercle de Mohr pour des essais de cisaillement sur du sable d'Ottawa avec (a) une interface lisse et (b) une interface rugueuse (d'après Huck et al., 1974)*

Les surfaces métalliques ont été polies pour obtenir différentes rugosités. La rugosité a été définie comme étant la moyenne qu'une quarantaine de valeurs de R_{max}, hauteur relative entre le pic le plus haut et le creux le plus profond sur un profil d'une longueur représentative de 2,5 mm. La figure I-39 présente la définition de la valeur de R_{max} et trois profils d'acier utilisés de rugosité moyenne 3, 20 et 220 µm, des rugosités moyennes de 5, 31 et 510 µm ayant été également utilisées. En accord avec Esashi et *al.* (1966), cette gamme de rugosité couvre la rugosité des matériaux de construction classiquement utilisés (acier : 10 à 20 µm, bois : 25 à 90 µm et béton : 50 à 130 µm).

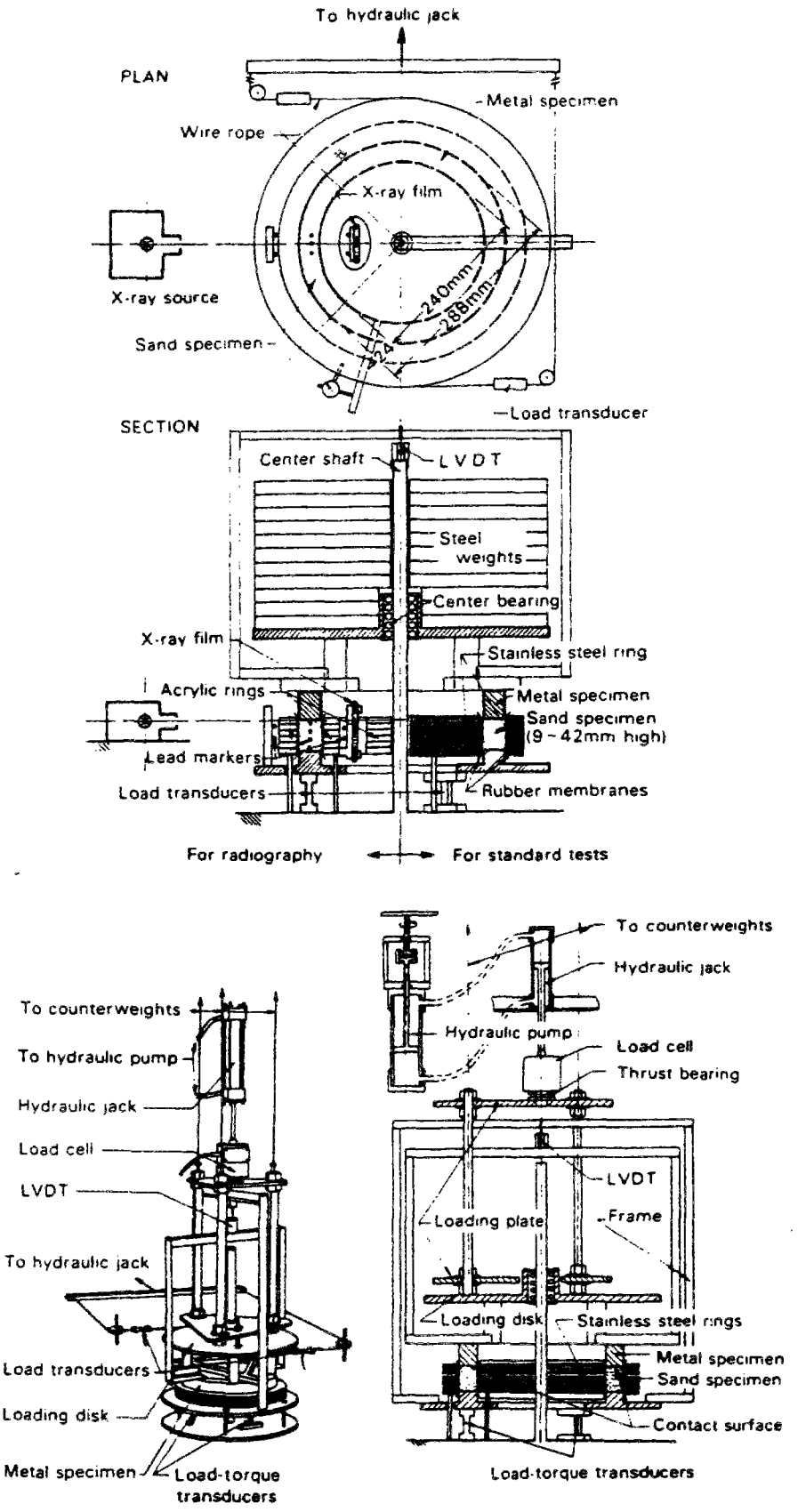


Figure I-38. *Appareil de cisaillement annulaire (d'après Yoshimi et Kishida, 1981 a)*

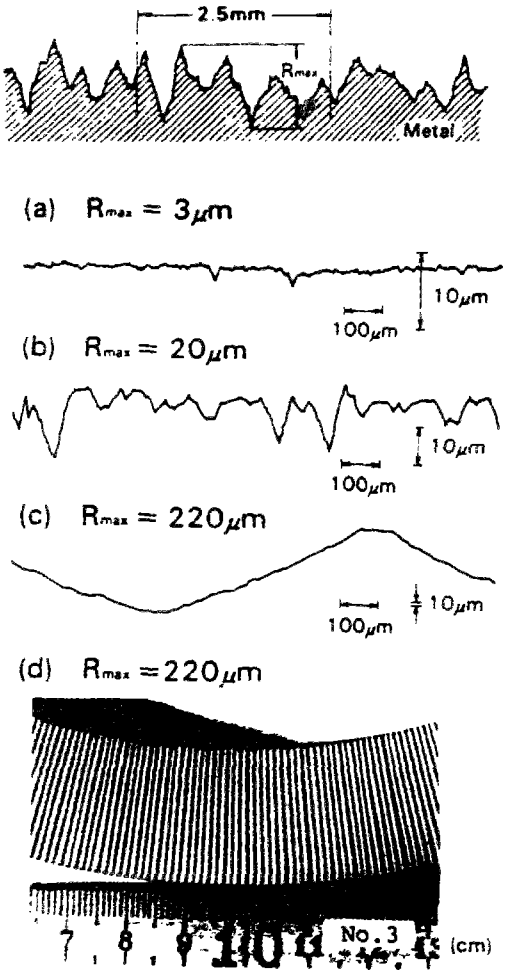


Figure I-39. *Définition de R_{max} et profils des surfaces métalliques utilisées (d'après Yoshimi et Kishida, 1981 a)*

La figure I-40 présente des résultats typiques obtenus sur un échantillon de sable de Tonegawa (D_{50} = 0,27 mm) moyennement dense lors d'essais à contrainte normale constante de 105 kPa (hauteur initiale de l'échantillon : 22mm). Pendant les premiers millimètres de déplacement, la rugosité de la surface n'influence pas le comportement de l'interface. Après ce stade initial, les courbes commencent à diverger et à s'étager en fonction de la rugosité. Un phénomène d'adhérence - glissement ("stick - slip") apparaît pour les rugosités inférieures à 5 μm et une forte dilatance caractérise les courbes de variation volumétrique pour une rugosité supérieure à 510 μm.

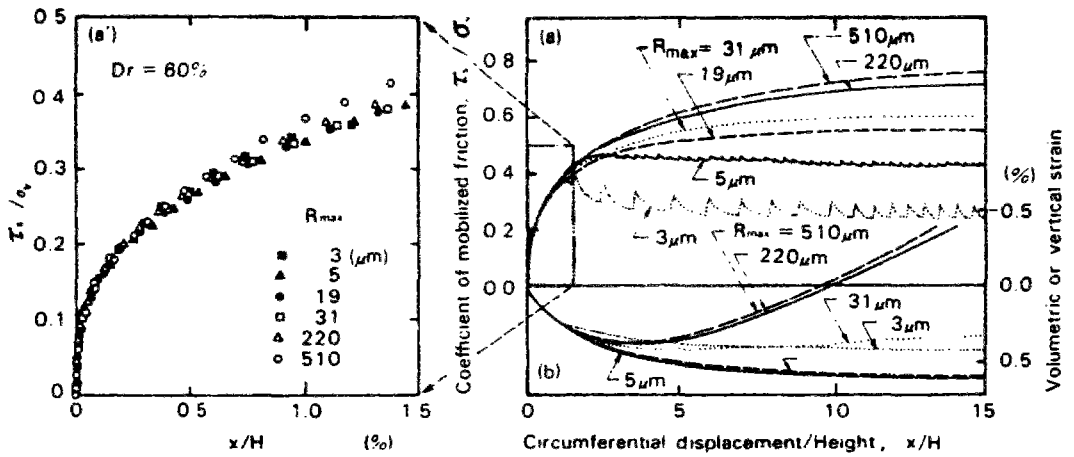


Figure I-40. *Résultats typiques d'essais entre de l'acier et du sable de Tanegawa (d'après Yoshimi et Kishida, 1981 a)*

L'utilisation de pointeurs et d'anneaux en acrylique ont permis de suivre la déformation de l'échantillon au cours de l'essai. Sur la figure I-41, les profils de déplacement montrent l'influence de la rugosité sur les déformations de l'échantillon. Pour une rugosité de 510 μm, aucun glissement entre le sable et la surface métallique ne se produit. L'épaisseur de la couche d'interface est de 9 grains en moyenne. A l'inverse, pour une rugosité de 3 μm, aucune adhérence n'apparaît et l'épaisseur de la zone d'interface se limite à 0 ou 1 grain. La rugosité de 23 μm (de l'ordre de grandeur de $D_{50}/10$) développe un comportement intermédiaire.

Les coefficients de frottement obtenus dans cette étude (figure I-42) montrent l'influence de la rugosité mais sont indépendants de la densité relative, ce qui est très surprenant. Ce résultat peut provenir du phénomène complexe généré par un mélange de cisaillement direct (glissement sol - surface métallique) et de cisaillement simple (déplacements relatifs des anneaux confinant l'échantillon). Cependant, nous voyons que la valeur critique de la rugosité moyenne (entre lisse et rugueuse) se situe autour du $D_{50}/10$, valeur qui sera reprise dans de nombreuses autres études.

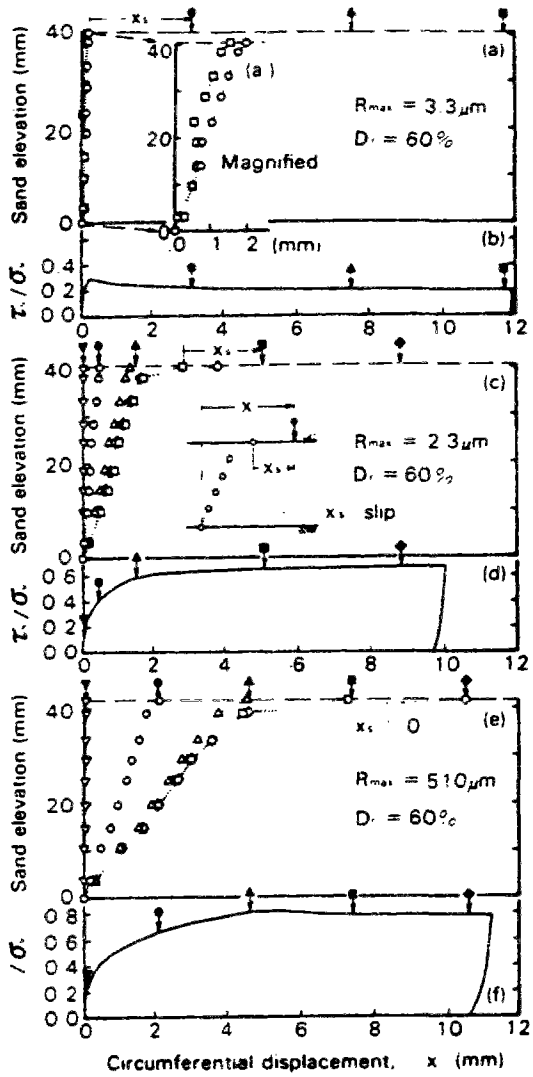


Figure I-41. *Observations radiographiées d'essais entre de l'acier et du sable de Tanegawa (d'après Yoshimi et Kishida, 1981 a)*

M. Boulon a entrepris, depuis 1986, le développement d'une boîte de cisaillement direct annulaire (en grande partie dans le cadre du Gréco Géomatériaux, groupe localisation, fissuration, discontinuité (Gréco 1) et groupe discontinuité, interface (Gréco 2): Boulon, 1986; 1987; 1988 b; 1989; Garnica, Boutrif et Boulon, 1990 et Boulon et Boutrif, 1991). Il est intéressant de noter que la conception et la réalisation de cet appareillage, dont le principe de fonctionnement n'était pas nouveau, aura requis environ 5 années. Boutrif (1993) présente en détail l'appareillage (figure I-43) et les premiers résultats de cette étude. Un des objectifs de cette réalisation était d'avoir un cisaillement direct au niveau de l'interface

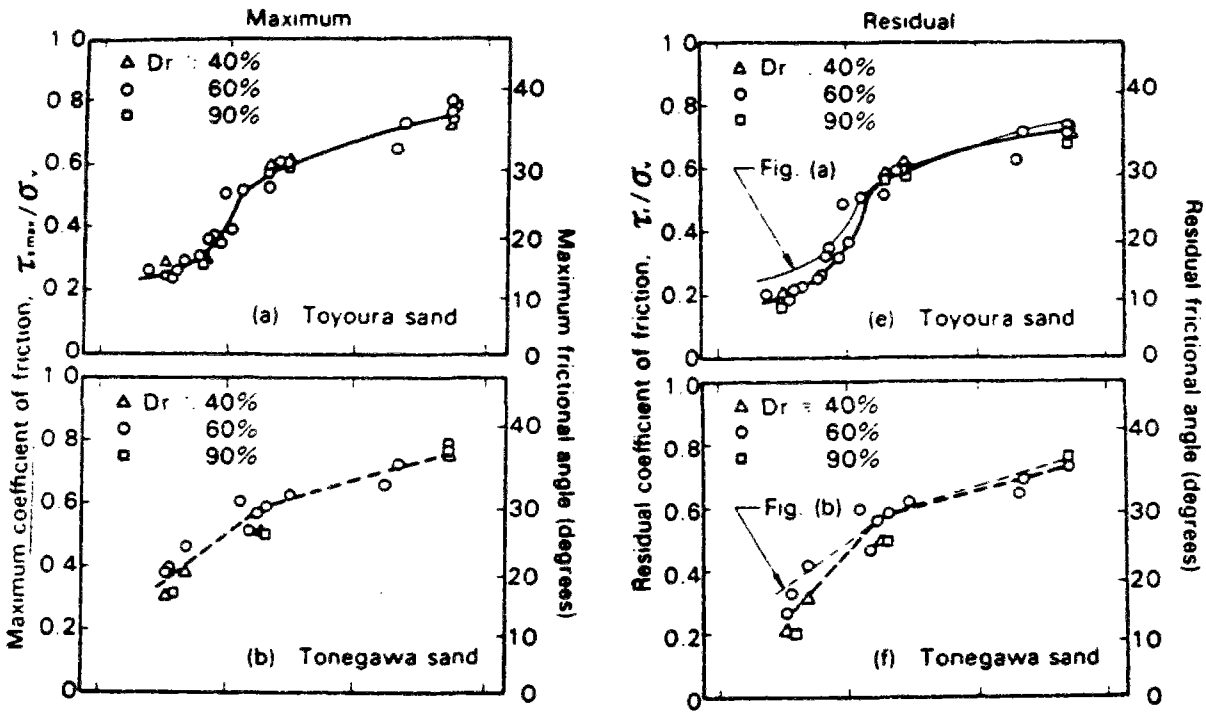


Figure I-42. *Coefficients de frottement obtenus lors d'essais entre de l'acier et du sable de Tanegawa (d'après Yoshimi et Kishida, 1981 a)*

(contrairement à l'appareil de Yoshimi et Kishida qui favorise le développement d'un cisaillement simple) en rendant le moule contenant l'échantillon aussi rugueux que possible.

Quatre configurations d'échantillons sont possibles, présentées sur la figure I-44. Cet appareil permet la réalisation de tous les chemins de cisaillement : contrainte normale constante, volume constant, rigidité normale imposée et un chemin plus original à angle de dilatance mobilisé imposé (rapport variation de déplacement normal / variation de déplacement tangentiel constant). Ceci est rendu possible par un asservissement électronique des moteurs générateurs de la contrainte normale et du déplacement tangentiel à partir des données acquises en temps réel.

Deux rugosités du piston supérieur ont été obtenues: 5 à 10 µm pour un contact lisse et 60µm pour un contact rugueux (comme définies précédemment par Yoshimi et Kishida). Pour le matériau utilisé (sable d'Hostun RF) ayant un D_{50} de 0,35 mm, la surface lisse

apparaîtra bien lisse mais la rugosité de 60μm (~ 2 D_{50}/10) va se situer dans une zone intermédiaire entre lisse et rugueuse.

Le programme d'essais réalisés comporte des essais à volume constant, à pression normale constante, à rigidité normale imposée et à angle de dilatance mobilisé imposé, les pressions normales initiales valant 100, 500 et 1200 kPa, sur du sable d'Hostun RF lâche et dense. Certains essais ont été menés jusqu'à des déplacements relatifs de 1 mètre.

En ce qui concerne les résultats présentés dans cette étude, ne pouvant tous les présenter, nous nous intéresserons principalement aux essais à pression normale constante et à volume constant, avec une plaque lisse et "rugueuse", essais qui nous servirons de référence pour notre étude.

La figure I-45 (a) présente les courbes contrainte de cisaillement - déplacement relatif tangentiel pour une interface sable lâche - plaque lisse avec une contrainte initiale de 500 kPa. Nous voyons que, jusqu'au pic, les courbes sont très proches, l'influence de la rigidité normale imposée intervenant post - pic. Pour de grands déplacements relatifs, la contrainte de cisaillement atteint sur une valeur asymptotique.

L'effet de la densité sur les valeurs au pic est presque absent alors que l'effet de la rugosité de la plaque est important (figure I-45 b). Pour de grands déplacements, le frottement, dans le cas de la plaque rugueuse, continue à diminuer, sauf pour le chemin à contrainte normale constante. Cette diminution s'explique essentiellement pour une diminution de la contrainte normale, liée à une contractance du matériau.

Dans l'espace (τ, σ_n), les résultats sont dispersés (figures I-46 a et b). Les angles de frottements mobilisés, pour de grands déplacements relatifs, dépendent de la rugosité et de la densité mais sont indépendants de la contrainte normale initiale: interface sable lâche - plaque lisse: 23°; interface sable dense - plaque lisse: 26°; interface sable lâche - plaque rugueuse: 32°; interface sable dense - plaque rugueuse : 34°.

Les analyses granulométriques réalisées à l'issue de certains essais montrent que la rupture des grains est très élevée dans le cas des essais à contrainte normale constante et

qu'elle augmente avec la contrainte et la densité initiales, la rugosité de la plaque et le déplacement relatif tangentiel.

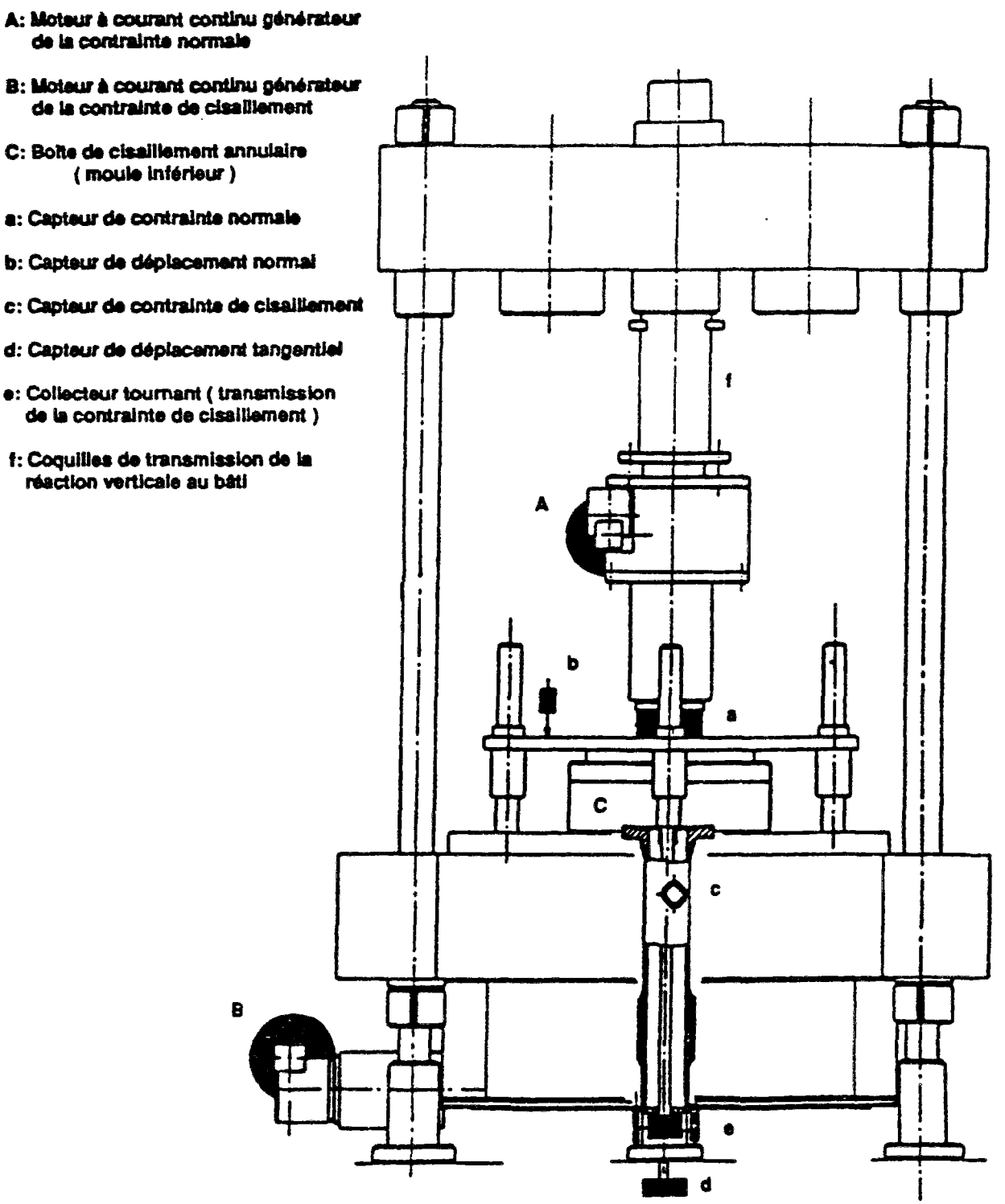


Figure I-43. *Boîte de cisaillement annulaire (Boutrif, 1993, d'après Boulon, 1987)*

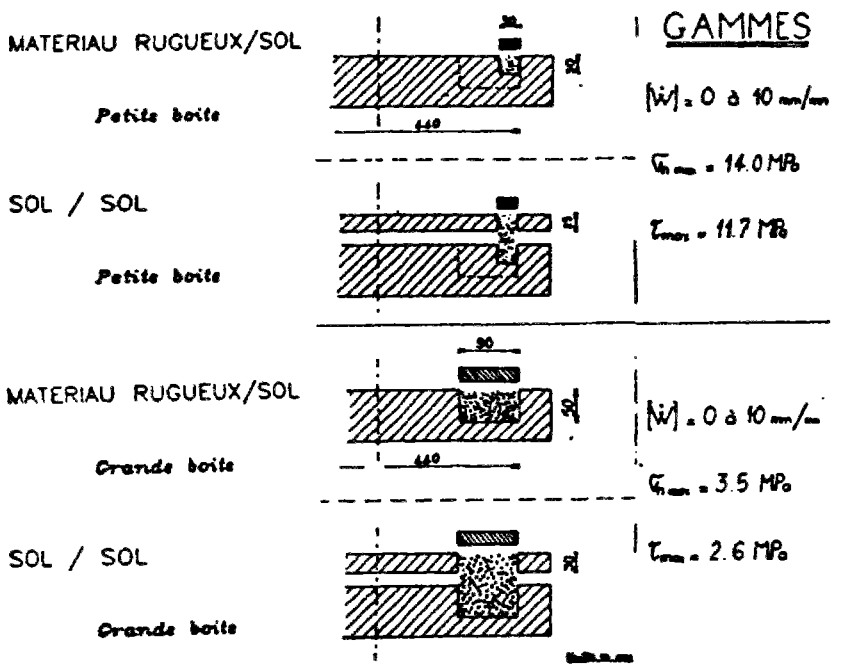


Figure I-44. *Configuration possible des échantillons annulaires (d'après Boulon, 1989)*

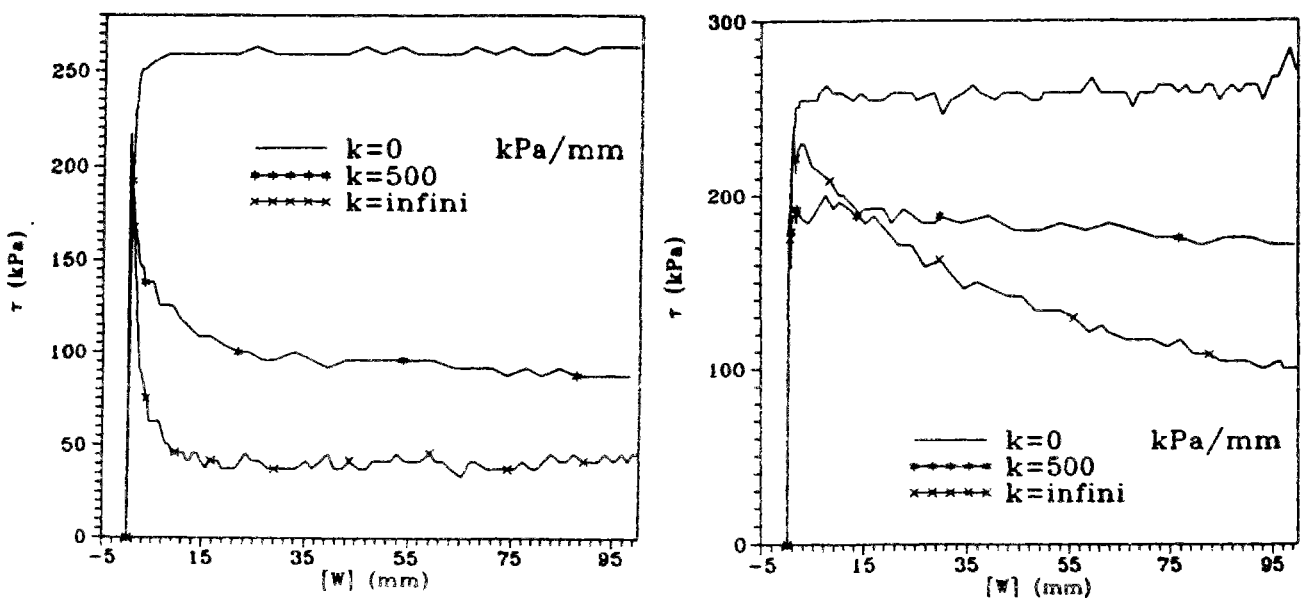


Figure I-45. *Courbes contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour une interface (a) sable lâche - plaque lisse (b) sable lâche - plaque rugueuse (d'après Boutrif, 1993)*

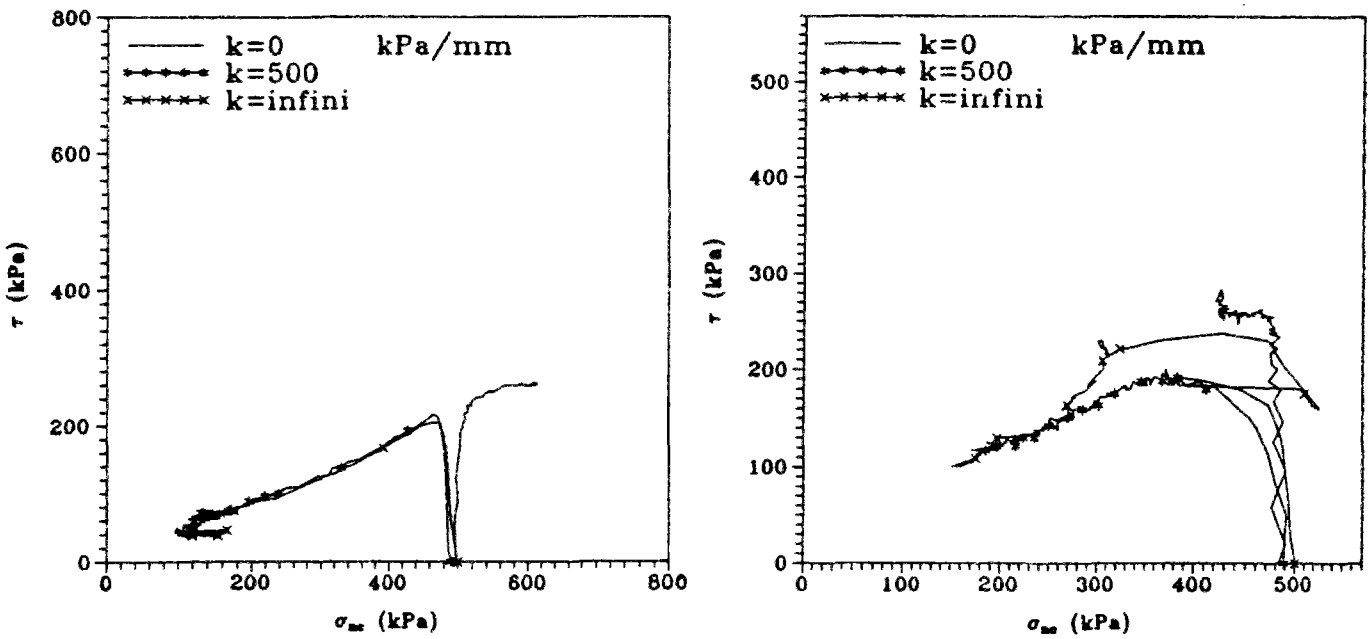


Figure I-46. *Courbes contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale pour une interface (a) sable lâche - plaque lisse (b) sable lâche - plaque rugueuse (d'après Boutrif, 1993)*

En utilisant l'appareil de cisaillement annulaire développé conjointement par l'Imperial College de Londres et le Norwegian Geotechnical Institute d'Oslo (Bishop et *al.*, 1971), Tika-Vassilikos (1991) a réalisé des essais de cisaillement argile - acier et comparé ses résultats expérimentaux au comportement de pieux réels. Le sol étudié étant l'argile, nous ne développerons pas plus cette analyse.

I.2.2.4 L'appareil de cisaillement simple plan

Goh et Donald (1984) ont modifié l'appareil de cisaillement simple du N.G.I. (Bjerrum et Landva, 1966) pour étudier le comportement des interfaces entre le béton et trois différents sols. Selon leur analyse par éléments finis, 70 % de l'échantillon a une distribution de contraintes uniforme, la contrainte de cisaillement n'étant qu'à 2 % de la contrainte réelle

espérée. Ils considèrent donc que l'essai de cisaillement simple reproduit un cisaillement pur, les effets de bord ne perturbant pas la distribution des contraintes.

La figure I-47 présente une vue schématique de l'appareil. L'échantillon de sol, cylindrique, est confiné latéralement par une membrane en caoutchouc renforcée. La déformation au sein de l'échantillon est mesurée en huit points et la variation de volume est également mesurée.

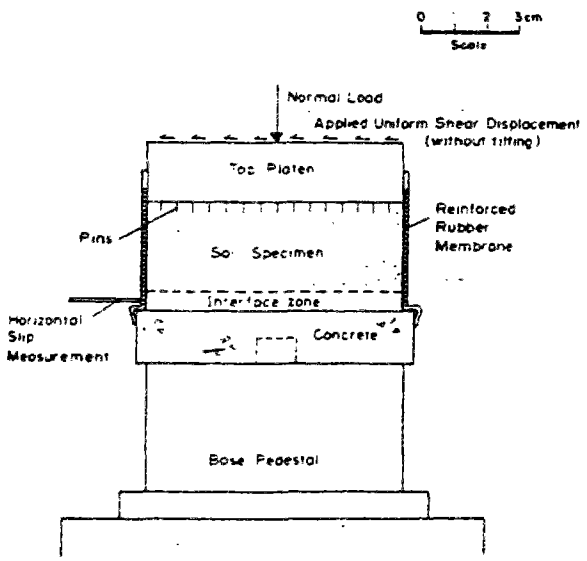


Figure I-47. *Vue schématique de l'appareil de cisaillement simple (d'après Goh et Donald, 1984)*

Les essais ont été réalisés à contrainte normale constante, la vitesse de cisaillement étant de 0,066 mm / min. La figure I-48 et le tableau I-4 représentent les résultats obtenus en utilisant du sable de Frankston sec.

Tableau I-4. *Résultats des essais de cisaillement sur du sable de Frankston sec (d'après Goh et Donald, 1984)*

Frankston sand (Average density = 1.76 tm^{-3})

Normal Stress	100 kPa				200 kPa				300 kPa			
	ϕ	δ	δ/ϕ	$\frac{\tan\delta}{\tan\phi}$	ϕ	δ	δ/ϕ	$\frac{\tan\delta}{\tan\phi}$	ϕ	δ	δ/ϕ	$\frac{\tan\delta}{\tan\phi}$
Smooth concrete	41.0°	31.0°	0.76	0.69	39.5°	30.8°	0.78	0.73	38.0°	29.8°	0.78	0.73
Rough concrete	41.0°	31.7°	0.77	0.71	39.5°	31.4°	0.80	0.74	38.0°	30.7°	0.81	0.76

Les résultats obtenus sont assez surprenants car la rugosité semble ne pas intervenir sur les coefficients de frottement. La différence entre le béton lisse et le béton rugueux n'est pas suffisamment explicitée pour pouvoir en particulier la comparer au D_{50} du sable de Frankston. De même, la contrainte initiale appliquée ne semble pas avoir d'influence sur le comportement observé.

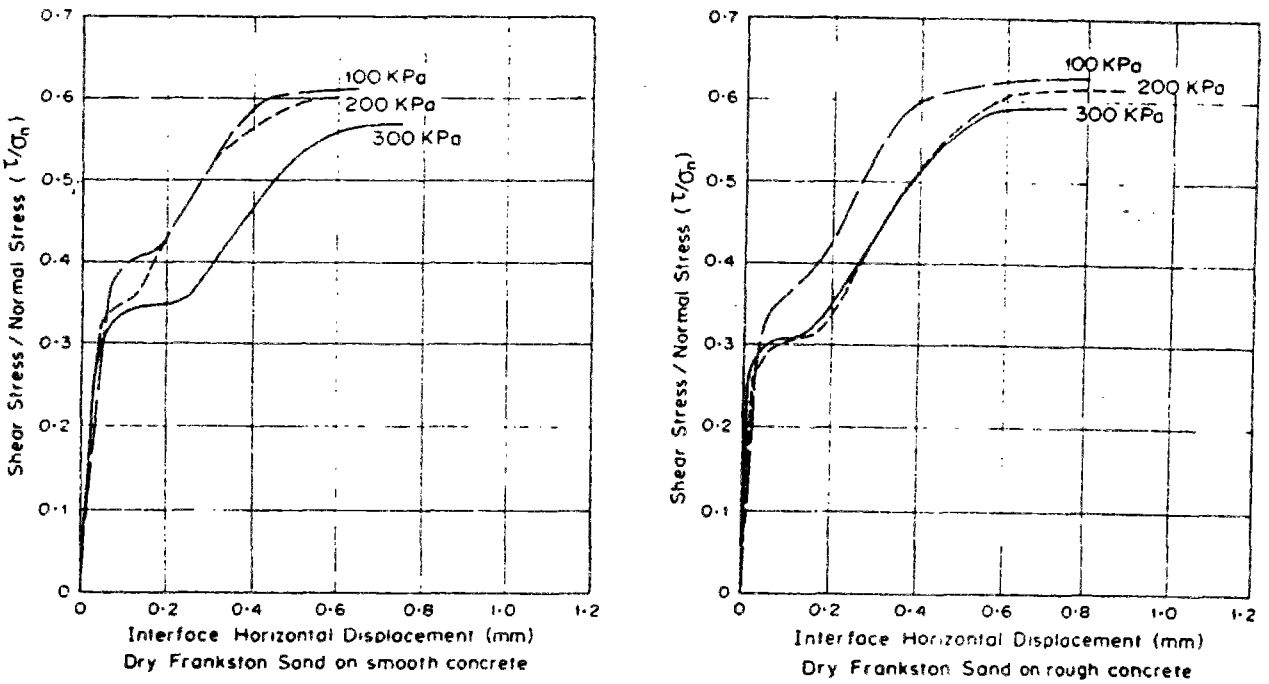


Figure I-48. *Essais de cisaillement sur le sable de Frankston sec (d'après Goh et Donald, 1984)*

Uesugi et Kishida (1986 a, b) ont également utilisé un appareil de cisaillement simple pour mettre en évidence le rôle de la rugosité de la surface, du D_{50} et du type de sable sur le coefficient de frottement. La figure I-49 présente cet appareillage. La différence majeure avec l'appareil de cisaillement simple de Goh et Donald concerne le confinement de l'échantillon, réalisé avec un empilement de plaques d'aluminium de 2 mm d'épaisseur, avec un espace libre de 400 mm x 100 mm (Uesugi et Kishida, 1986 a) ou 100mm x 40mm (Uesugi et Kishida, 1986 b) libre au centre.

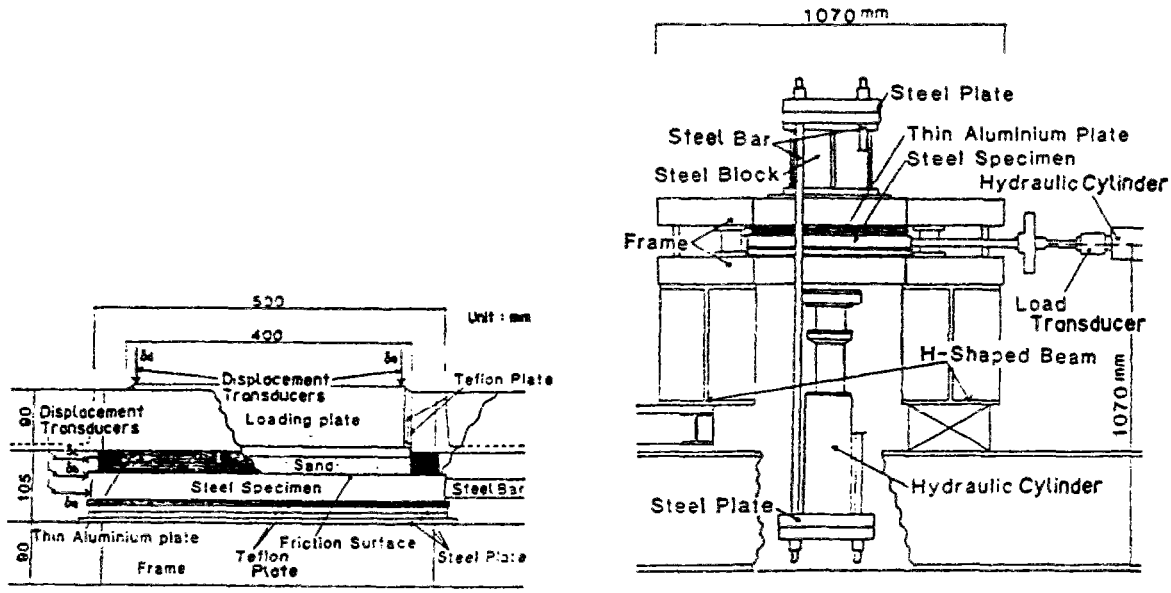


Figure I-49. *Appareil de cisaillement simple (d'après Uesugi et Kishida, 1986 a)*

Le déplacement total de l'échantillon est décomposé entre le déplacement dû au glissement à l'interface sable - acier et le déplacement dû au cisaillement au sein de l'échantillon, comme présenté sur la figure I-50. La rugosité de la surface de cisaillement est quantifiée par R_{max} , comme défini par Yoshimi et Kishida (1981 a) et présentée au paragraphe 3.

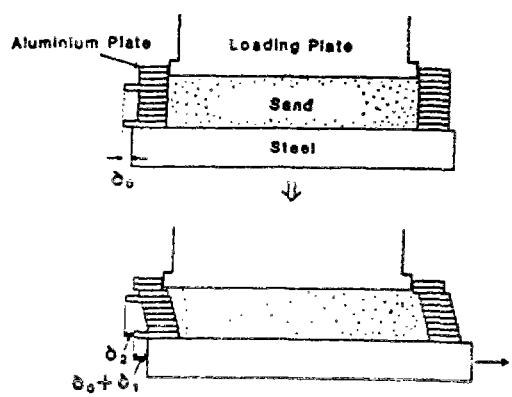


Figure I-50. *Composants du déplacement total (d'après Uesugi et Kishida, 1986 a)*

Des résultats d'essais sur du sable de Toyoura dense sont présentés à la figure I-51. Le rapport de la contrainte de cisaillement par la contrainte normale appliquée et les

déformations volumiques sont représentés en fonction du déplacement total. Ces essais mettent clairement en évidence l'influence de la rugosité sur le frottement obtenu.

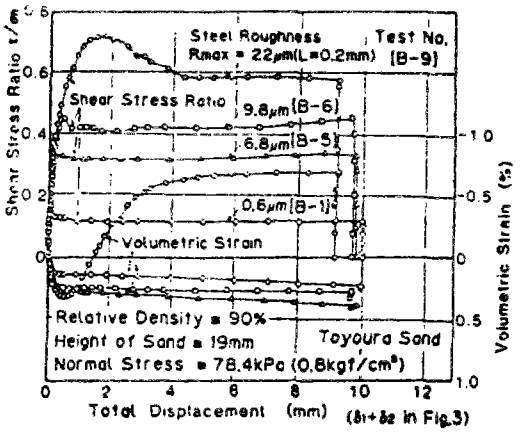


Figure I-51. *Résultats d'essais entre du sable et de l'acier à différentes rugosités (d'après Uesugi et Kishida, 1986 a)*

Les auteurs ont également observé que lorsque la surface est suffisamment lisse, la surface de rupture se localise au contact entre le sol et l'acier, alors que pour une rugosité élevée, la surface de rupture se développe au sein de l'échantillon. Une borne supérieure du coefficient de frottement est l'angle de frottement obtenu à partir d'essais de cisaillement simple sol - sol. De nombreuses ruptures de grains ont été observées pour des contraintes normales élevées.

Uesugi et Kishida (1986 b), en étudiant le comportement des interfaces au niveau microscopique (à l'échelle du grain), ont défini une rugosité normalisée R_n comme étant le rapport R_{max} sur D_{50}. Sur la figure I-52, nous voyons clairement que la limite entre lisse et rugueux se fait pour un R_n de l'ordre de 0,1 à 0,2 , soit pour un R_{max} de l'ordre de $D_{50}/10$ à 2 $D_{50}/10$.

Uesugi et *al.*(1988) ont modifié l'appareil présenté précédemment, en équipant une paroi d'une fenêtre en verre, pour pouvoir visualiser le comportement des particules lors des essais de cisaillement. La figure I-53 montre le champ de déplacement d'un certain nombre de particules et sa décomposition en déplacement tangentiel et en déplacement normal lors d'un essai de cisaillement avec une surface rugueuse.

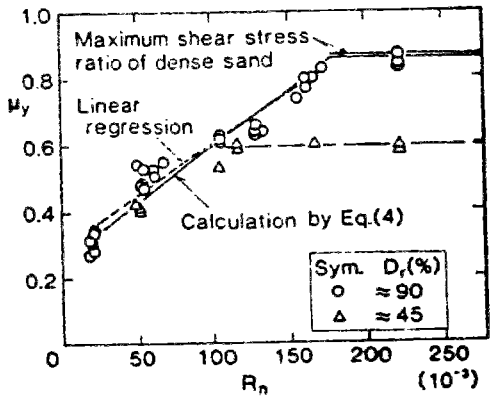


Figure I-52. *Coefficient de frottement à différentes rugosités (d'après Uesugi et Kishida, 1986 b)*

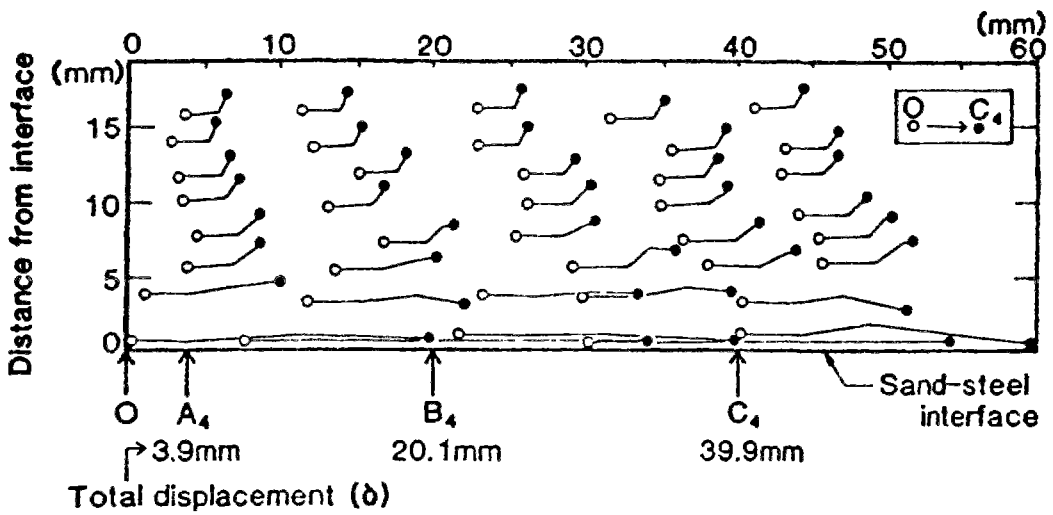


Figure I-53. *Visualisation du déplacement des particules lors d'un essai de cisaillement avec une surface rugueuse (d'après Uesugi et al., 1988)*

Pour une interface rugueuse, le déplacement tangentiel se localise près de l'interface et est accompagné d'une forte dilatance volumique. En observant des photographies successives, les auteurs notent que non seulement les particules glissent mais aussi tournent le long de l'interface. Par contre, dans le cas d'une interface lisse, la déformation du sol est uniformément répartie dans sa masse, sans phénomène de variation de volume.

L'appareil de cisaillement simple plan permet donc, contrairement à la boîte de cisaillement direct, de pouvoir mesurer séparément les déformations de cisaillement et les déplacements de glissement. Cependant, il présente les mêmes inconvénients que la boîte de cisaillement direct (concentration des contraintes aux extrémités, déplacements limités, etc.) et de plus, la détermination des contraintes dans le plan de cisaillement n'est pas possible.

I.2.2.5 L'appareil de cisaillement tridimensionnel

Fakharian et Evgin (1993) ont présenté un appareil de cisaillement tridimensionnel pour étudier le comportement des interfaces sous chargement monotone ou cyclique. Ce nouvel appareillage répond à un besoin d'informations complètes pour appréhender des phénomènes où l'action de la contrainte de cisaillement change de direction au cours du temps. Par exemple, alors que le chargement axial d'un pieu peut être traité de façon axisymétrique, son chargement latéral est un vrai problème 3D. Cela nécessite une bonne connaissance de la contrainte normale et de la mobilisation de deux contraintes de cisaillement (figure I-54).

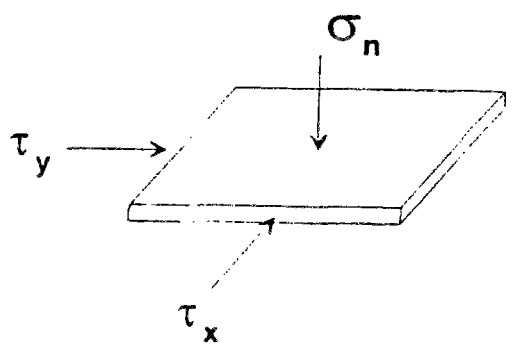


Figure I-54. *Surface de contact en trois dimensions (d'après Fakharian et Evgin, 1993)*

La figure I-55 présente une vue schématique de l'appareil et de la partie entourant l'échantillon. Deux moteurs pas à pas permettent d'appliquer des sollicitations à la surface de contact, selon deux directions perpendiculaires, soit à pression contrôlée, soit en déplacement contrôlé. Un vérin pneumatique permet d'appliquer une contrainte verticale ou un déplacement contrôlé à la partie supérieure de l'échantillon. L'échantillon, d'une hauteur de 20 mm est préparé par pluviation, dans une boîte en aluminium de 100 mm x 100 mm (le cisaillement est donc direct) et placé sur une plaque d'acier de 300 mm x 300 mm.

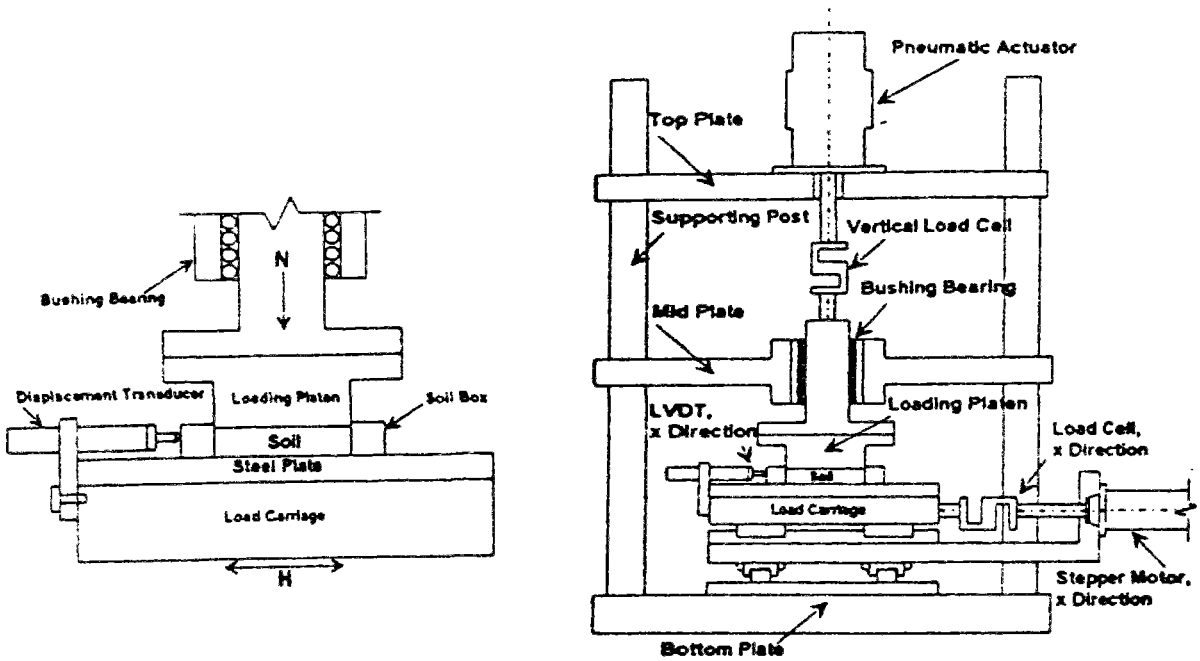


Figure I-55. *Vue schématique de l'appareil de cisaillement tridimensionnel (d'après Fakharian et Evgin, 1993)*

La figure I-56 présente les résultats obtenus avec des échantillons de sable (D_{50} = 1,2 mm) dense et lâche, avec une interface lisse et une interface rugueuse lors d'essais à pression normale constante (100 kPa), le cisaillement n'étant effectué que selon une direction. Notons le résultat obtenu sur l'échantillon de sable lâche, avec une interface rugueuse, où la phase de contractance initiale est suivie d'une phase dilatante assez marquée.

Des résultats originaux sont présentés à la figure I-57. Deux essais ont été réalisés sur des échantillons de sable dense et de sable lâche, avec une interface rugueuse. L'interface est d'abord cisaillée selon la direction x, à pression normale constante (250 kPa), pendant 5 mm. La contrainte de cisaillement est alors ramenée à 0 puis l'interface est alors cisaillée selon la direction y, la contrainte de cisaillement selon x étant maintenue nulle. Dans les deux cas, la contrainte de cisaillement lors du second cisaillement atteint la valeur résiduelle obtenue lors du premier chargement. Le pic, s'il y en a un, est donc atteint uniquement lors du premier cisaillement.

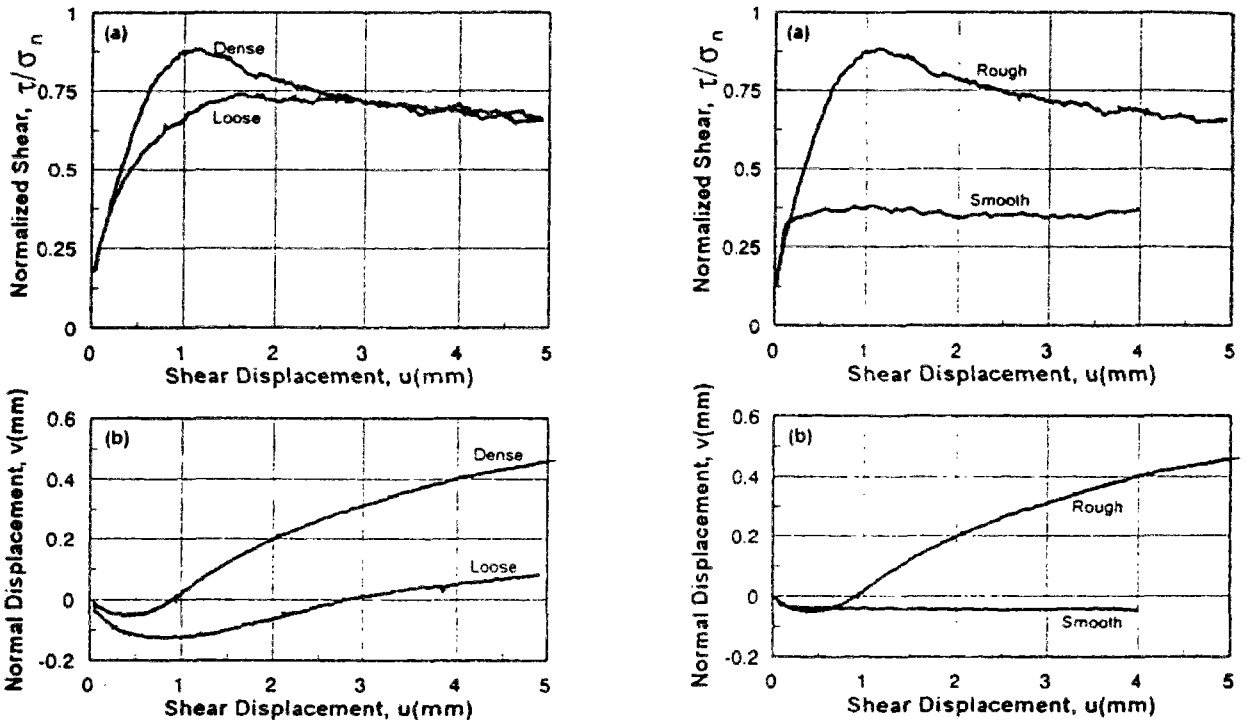


Figure I-56. *Résultats d'essais de cisaillement direct : (a) essais sable dense et sable lâche avec interface rugueuse et (b) essais sable dense avec interface lisse et interface rugueuse (d'après Fakharian et Evgin, 1993)*

Fakharian et Evgin (1995) ont utilisé cet appareillage pour comparer les résultats entre des essais de cisaillement direct (comme présenté précédemment) et des essais de cisaillement simple où la demi-boîte en aluminium est remplacée par un empilement de dix plaques lubrifiées. Ils concluent qu'aucune différence majeure n'apparaît si ce n'est que le cisaillement simple permet de séparer la déformation de l'échantillon et le glissement à l'interface. Des essais de chargement cyclique, selon les deux directions x et y ont également été réalisés (Evgin et Fakharian, 1995).

I.2.2.6 L'appareil de cisaillement (simple ou direct) double

Paikowsky et *al.* (1995) présentent un nouvel appareil de cisaillement pour évaluer la distribution et l'amplitude du frottement entre un milieu granulaire et une surface rigide.

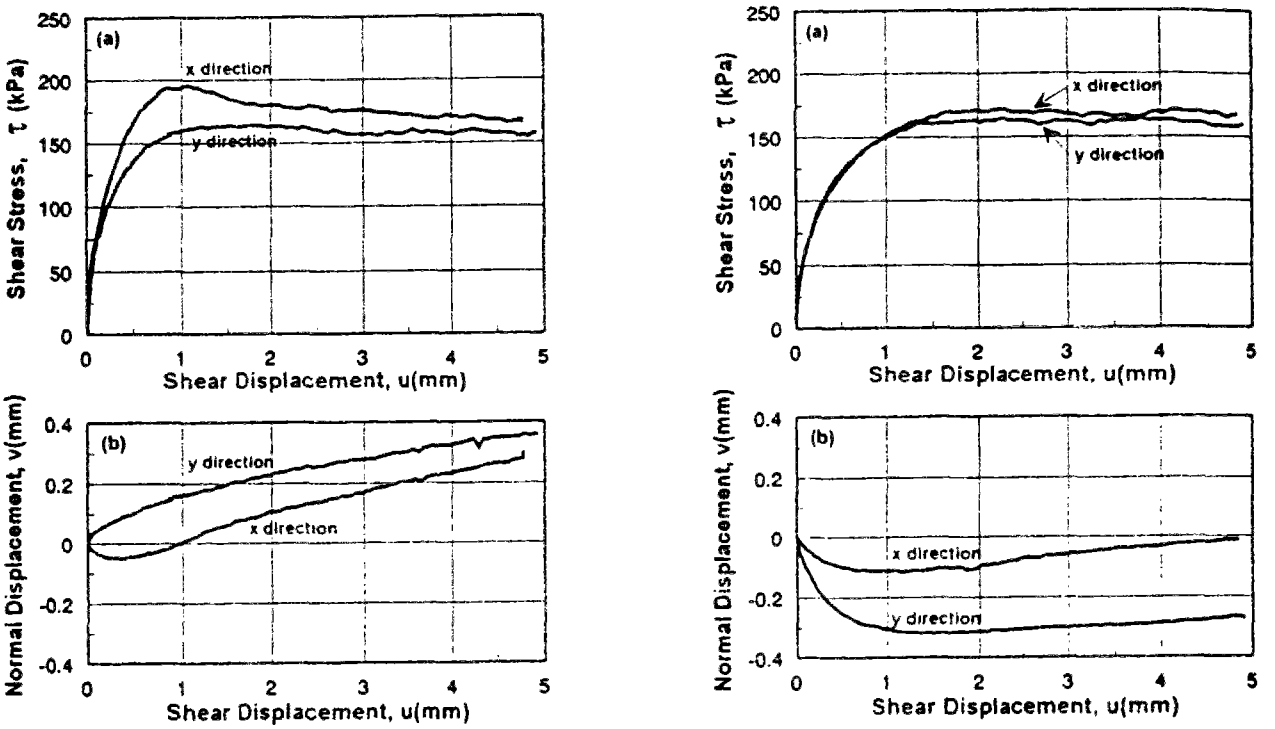


Figure I-57. *Résultats d'essais de cisaillement 3D:(a) essai sable dense - interface rugueuse et (b) essai sable lâche - interface rugueuse; σn = 250 kPa (d'après Fakharian et Evgin, 1993)*

Cet appareil (figure I-58) permet d'avoir une double zone d'interface, une sur la face supérieure et une sur la face inférieure de la barre en déplacement. D'autre part, comme présentée à la figure I-59, cette barre de frottement est instrumentée et permet de connaître la distribution du frottement le long de l'interface sol - solide. Deux modes de cisaillement sont possibles: cisaillement simple et cisaillement direct. Le système d'application de la charge permet des essais à volume constant ou à pression normale constante.

La boîte de cisaillement est composée de deux compartiments, réalisés par un empilement de 16 cadres d'aluminium recouverts de téflon (même principe que la boîte de cisaillement simple de Uesugi et Kishida (1986 a, b), permettant la préparation de deux échantillons de 2540 cm^3. Ces cadres sont bloqués pour des essais de cisaillement direct ou laissés libres en translation pour des essais de cisaillement simple.

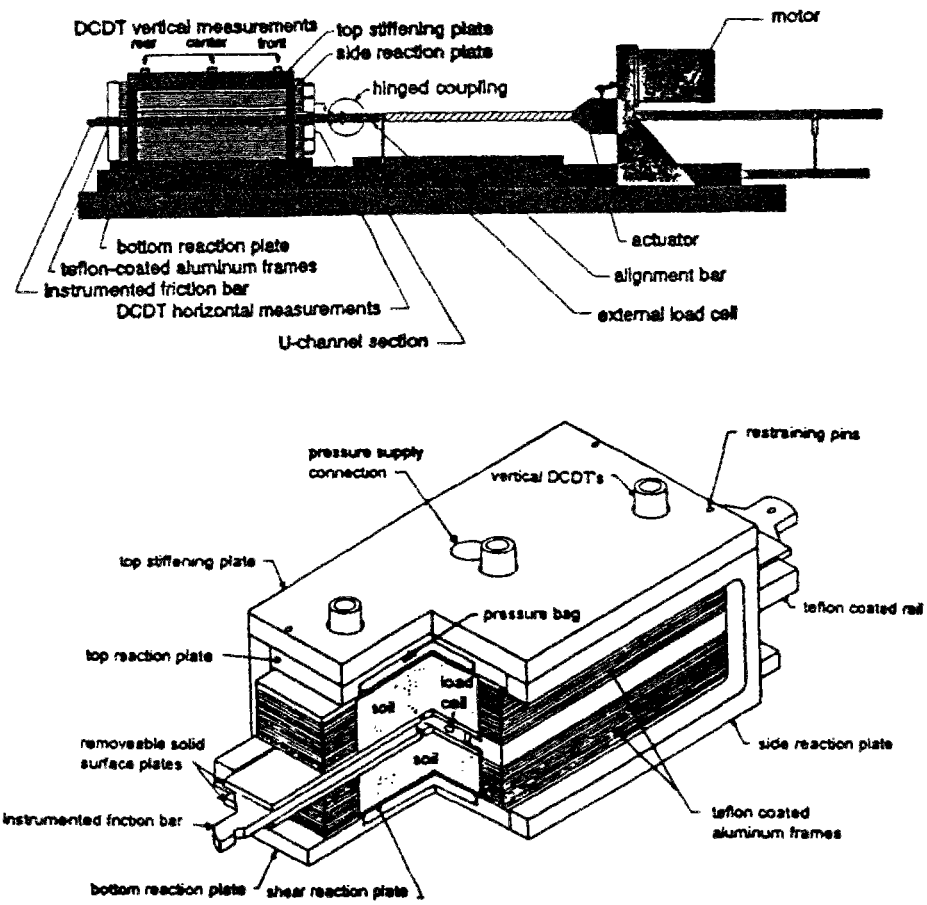


Figure I-58. *Nouvel appareil de cisaillement double : (a) disposition générale et (b) vue éclatée (d'après Paikowsky et al.,1995)*

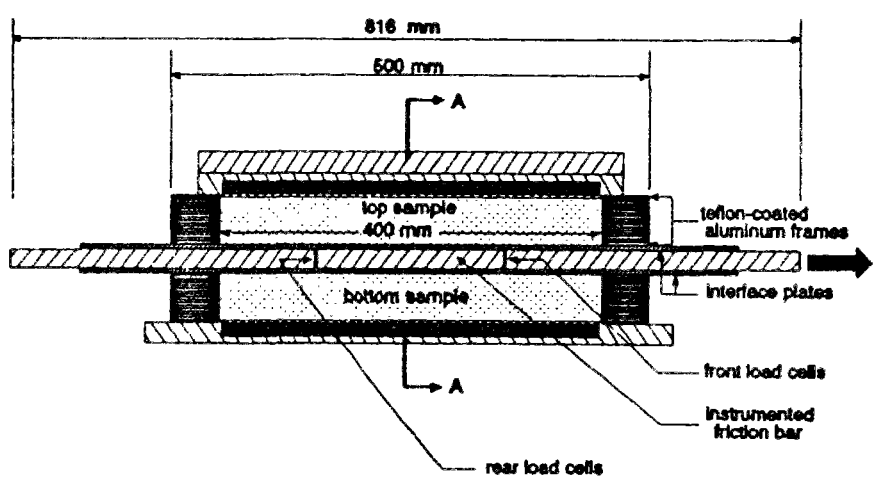


Figure I-59. *Barre de frottement instrumentée (d'après Paikowsky et al., 1995)*

La barre de frottement est composée de six parties (trois de chaque coté) reliées entre elles par l'intermédiaire de deux fois deux capteurs de force à jauges, permettant de connaître le cisaillement en trois zones. La surface de contact de la partie centrale est de 500 cm^2, constante pendant l'essai.

La pression normale est appliquée à l'échantillon par l'intermédiaire de deux vérins hydrauliques (sacs remplis d'eau), pilotés par deux servo-valves. Le déplacement de la barre de frottement à vitesse constante est transmise par un moteur contrôlé également par une servo-valve.

Les matériaux utilisés sont soit composés de billes de verres (de 4 types différents), soit de sable d'Ottawa (D_{50} = 0,50 mm), l'échantillon étant préparé par pluviation.

Les résultats présentés sont obtenus pour des essais de cisaillement direct, à vitesse constante de 1,3 mm/min, sur des échantillons de sable d'Ottawa, à pression normale constante (figure I-60). Nous retrouvons les résultats classiques déjà présentés dans ce chapitre. Leur étude sur la rugosité confirme les résultats de Uesugi et Kishida (1986 b). Un résultat intéressant a été obtenu à partir des essais sur les billes de verre: pour une même forme, la taille des particules n'a pas d'influence sur la résistance au cisaillement, pour une rugosité normalisée par le D_{50}. Les essais complémentaires avec d'autres conditions (essais à volume constant, contrainte initiale plus élevée, ...) seraient nécessaires. D'autre part, le mode de confinement pourrait être amélioré pour assurer des champs de contraintes uniformes au sein de l'échantillon.

I.2.2.7 L'appareil biaxial "modifié" et le modèle de silo-plan

Tejchman et Wu (1995) présentent une étude sur les interfaces sable - acier réalisée à partir de résultats obtenus avec trois appareillages développés à l'université de Karlsruhe: l'appareil biaxial; l'appareil de cisaillement direct vrai élaboré par Wernick et que nous avons déjà présenté et le modèle de silo-plan. Cette étude expérimentale avait déjà été présentée succinctement par Gudehus et Tejchman (1988). L'objectif de la partie expérimentale de cette étude est de mettre en évidence l'effet des différentes conditions aux

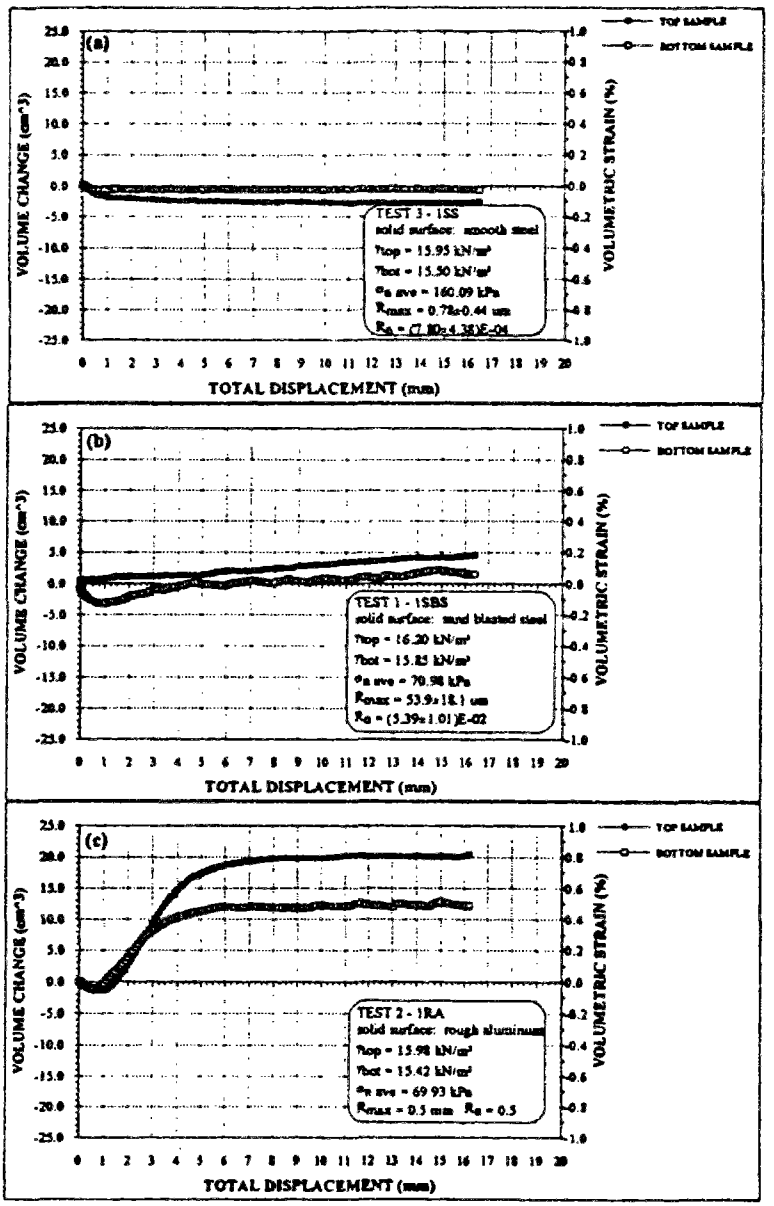


Figure I-60. *Distribution des angles de frottement et variation de volume des échantillons avec différentes interfaces:(a) lisse (b) intermédiaire (c) rugueuse (d'après Paikowsky et al.,1995)*

limites sur l'angle de frottement et sur l'épaisseur de la zone de localisation le long de l'interface.

L'appareil biaxial, développé par Vardoulakis (1978) et présenté par Vardoulakis et Graf (1985) a été modifié pour pouvoir réaliser des essais de mesure de frottement entre de l'acier et du sable de Karlsruhe (figure I-61). Une cale en bois, faisant un angle de 67°5 avec

l'horizontale, est recouverte d'une plaque d'acier à rugosité contrôlée. Cet angle est déterminé à partir du critère de rupture de Coulomb, pour permettre que la rupture se développe le long de l'interface entre la surface en acier et le sable et non selon un plan interne à l'échantillon de sable (plan obtenu dans un essai de cisaillement classique au biaxial à $\pi/4 + \phi'/2$).

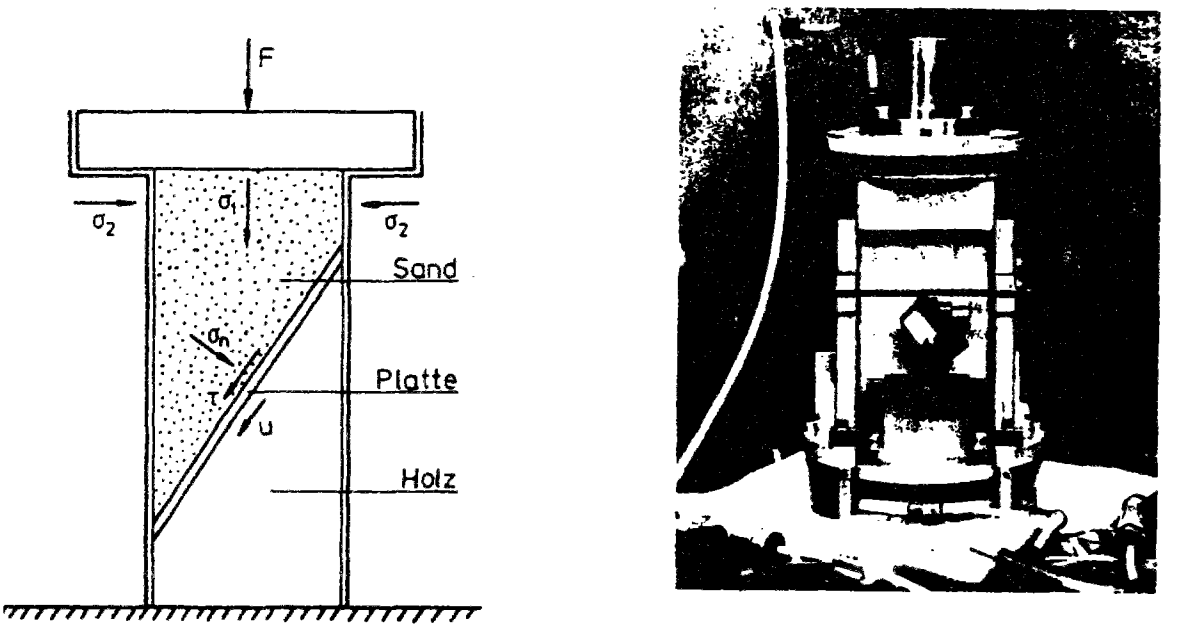


Figure I-61. *Appareil de déformation plane modifié pour réaliser des essais de frottement (d'après Tejchman et Wu, 1995)*

Trois rugosités de la plaque d'acier sont utilisées : lisse ($R_{max}/D_{50} \sim 0$), intermédiaire (appelé rugueux par les auteurs) ($R_{max}/D_{50} \sim 0,1$ à $0,5$) et très rugueuse ($R_{max}/D_{50} \sim 1$). Les déformations volumiques sont obtenues par analyse aux rayons X, le sable dense étant plus absorbant que le sable lâche. Cet essai présente l'avantage de pouvoir déterminer toutes les composantes des contraintes dans le plan de cisaillement. Ses inconvénients, d'après les auteurs, sont liés à une concentration des contraintes à la base inférieure de l'échantillon, une diminution de la surface de cisaillement pendant l'essai et une validité des résultats seulement pour de fortes pressions de cellule.

La figure I-62 présente les résultats obtenus avec la boîte de cisaillement et l'appareil biaxial modifié. La rugosité et la densité ont un effet considérable sur le comportement d'interface. Le sable dense montre un pic assez prononcé avec un fort radoucissement et, après une phase initiale contractante, le matériau est fortement dilatant. Pour le sable lâche, les courbes contraintes - déplacement atteignent asymptotiquement un palier, le matériau étant toujours contractant. Les analyses aux rayons X sur l'essai en déformations planes confirment ces résultats: l'épaisseur de la zone dilatante pour le sable dense est de 1mm (i.e. 2 D_{50}) pour la surface intermédiaire et 3 mm (i.e. 6 D_{50}) pour la surface rugueuse. Aucune zone de dilatance n'est observée pour un essai avec un échantillon de sable lâche et la surface lisse.

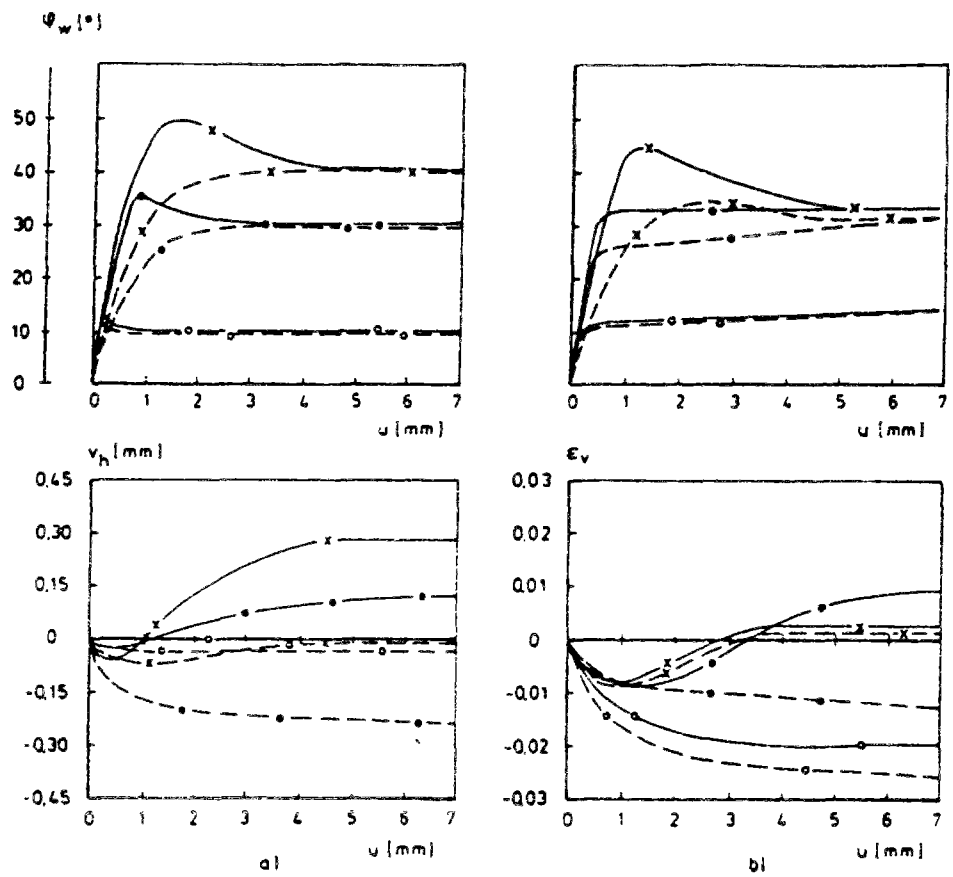


Figure I-62. *Résultats d'essais de frottement (d'après Tejchman et Wu, 1995)*

(a) essai à la boîte de cisaillement direct (σn = 200 kPa) (b) essai en déformation plane (σn = 200 kPa)

(ϕ_w: angle de frottement , v_h déplacement vertical — sable dense -- sable lâche (×) très rugueux ●) rugueux (○) lisse).

Les expériences sur silos ont été réalisées avec un modèle de silo à déformation plane avec une base amovible et des parois parallèles. Sa hauteur est de 50 cm, sa largeur 60 cm et sa profondeur peut varier de 10 à 30 cm. Les mêmes rugosités de parois que précédemment ont été utilisées. La figure I-63 montre les déformations du sable lors un écoulement en silo. L'épaisseur des zones de cisaillement observées varie de 3mm (i.e. 6 D_{50}) pour un mur lisse à 20 mm (i.e. 40 D_{50}) pour un mur rugueux. L'épaisseur de la zone cisaillée est donc nettement plus importante que pour les essais précédents, mais les conditions aux limites sont totalement différentes.

Les angles de frottement et les déplacements pour lesquels tout le frottement est mobilisé sont synthétisés dans le tableau I-5.

Tableau I-5. *Coefficients de frottement μ et déplacements u pour les essais de cisaillement et les expériences sur silo modèle (d'après Tejchman et Wu, 1995)*

Roughness		Smooth		Rough		Very rough	
Density		Dense	Loose	Dense	Loose	Dense	Loose
Shear	μ	0·22	0·20	0·69	0·55	1·19	0·89
Apparatus	u (mm)	0·1-0·3	0·2	0·6-0·8	1·5-2·0	1·0-1·5	1·7-2·0
Biaxial	μ	0·21	0·20	0·62	0·51	0·97	0·67
Apparatus	u (mm)	0·3	0·3	0·5	0·5	1·2	2·7
Model	μ	0·34	0·22	0·79	0·52	1·10	0·69
Silo	u (mm)	0·6-1·4	0·1-0·2	0·1-0·4	0·1	0·2-2·4	0·1-0·4

D'après ces résultats, nous voyons que les conditions aux limites (types d'essais) influencent les valeurs de l'angle de frottement et l'épaisseur de l'interface. Il faut donc considérer le bon problème correspondant aux bonnes hypothèses et non pas transférer des résultats d'un problème sur l'autre. Les auteurs considèrent également que l'angle de frottement interne est borné par une limite supérieure qui est l'angle de frottement interne du sol et par une limite inférieure égale à la moitié de cet angle, l'influence de la contrainte normale n'étant que très faible. Comme Gudehus et Tejchman (1988), Tejchman et Wu notent que la rotation des particules dans la couche d'interface est un paramètre prédominant et qu'une description réaliste du comportement de l'interface semble possible à partir de la théorie des milieux de Cosserat qui prend en considération pas seulement le glissement mais également la rotation individuelle des grains pendant le cisaillement (Mühlhaus, 1987).

Il faut cependant considérer que les trois types d'essais réalisés dans cette étude comportent de fortes imperfections qui peuvent amplifier les différences obtenues et que seuls des niveaux de contraintes relativement faibles ont été étudiés (pas de chargement pour l'essai en silo modèle). D'autre part, les différences d'épaisseur de la zone cisaillée peuvent être attribuées aux conditions locales comme l'anisotropie du sable, les pressions de confinement et le chemin de chargement.

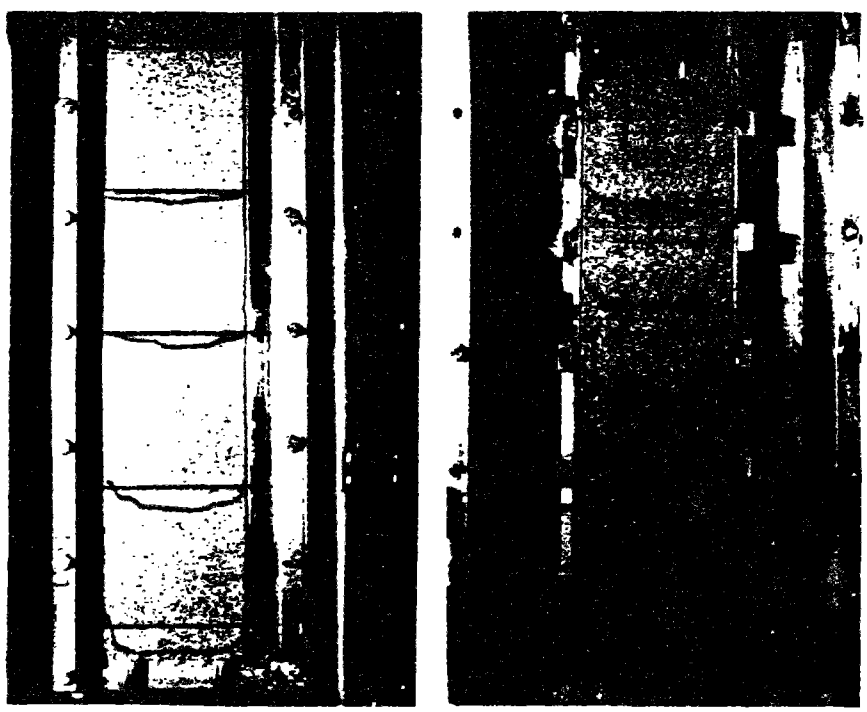


Figure I-63. *Déformations de l'échantillon de sable lors d'un écoulement (d'après Tejchman et Wu, 1995)*

I.2.2.8 Autres appareillages ou méthodes

Le dépôt de brevet sur le principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement simple annulaire nous aura permis de découvrir, lors de la recherche d'antériorité par l'Institut National de la Propriété Industrielle, deux autres dispositifs qui peuvent

directement ou indirectement mesurer des caractéristiques d'interface au laboratoire. Nous présenterons rapidement ces deux appareils dans ce paragraphe.

a. L'appareil d'essai de contraintes de sol (Kellner, 1983).

L'invention décrit un appareil et un procédé pour simuler des contraintes de cisaillement de sol appliquées à des segments de tube d'essai, pour étudier les effets mécaniques de ces contraintes sur des revêtements de protection anticorrosion adhérant aux pipelines (figure I-64). Un segment de tube d'essai est placé au centre d'un réservoir de sol qui peut être confiné par une chambre à pression. Un mouvement vertical est appliqué au tube qui peut être chauffé jusqu'à 300°C.

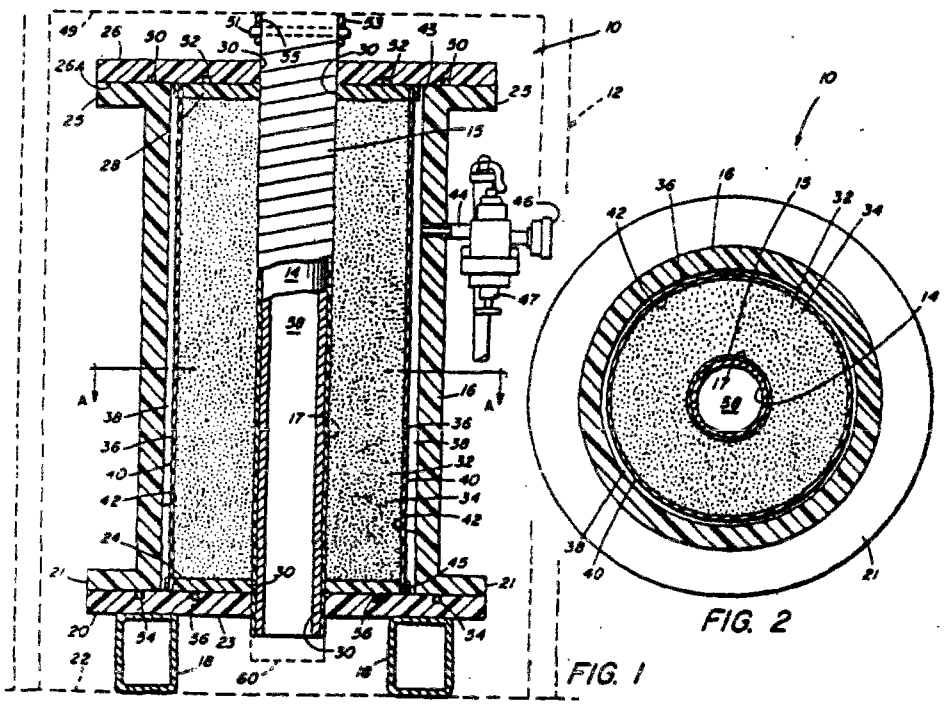


Figure I-64. *Appareil d'essai de contraintes de sol (d'après Kellner, 1983).*

b. Méthode de détermination des mouvements d'élément de structure dans le sol (Dibley et *al.*, 1974)

Cette méthode de mesure permet de déterminer la résistance d'un matériau granulaire (sable ou gravier) en étudiant le mouvement longitudinal et latéral d'un élément de structure situé au centre d'un échantillon de ce matériau (figure I-65).

Le matériau granulaire est disposé autour de l'élément de structure et est comprimé par une plaque supérieure. Des vérins hydrauliques peuvent appliquer une contrainte verticale initiale à l'échantillon. Une force est appliquée à l'élément de structure et les déformations, au moyen de jauges de déformation, et les contraintes dans le massif, au moyen de capteurs, sont mesurées.

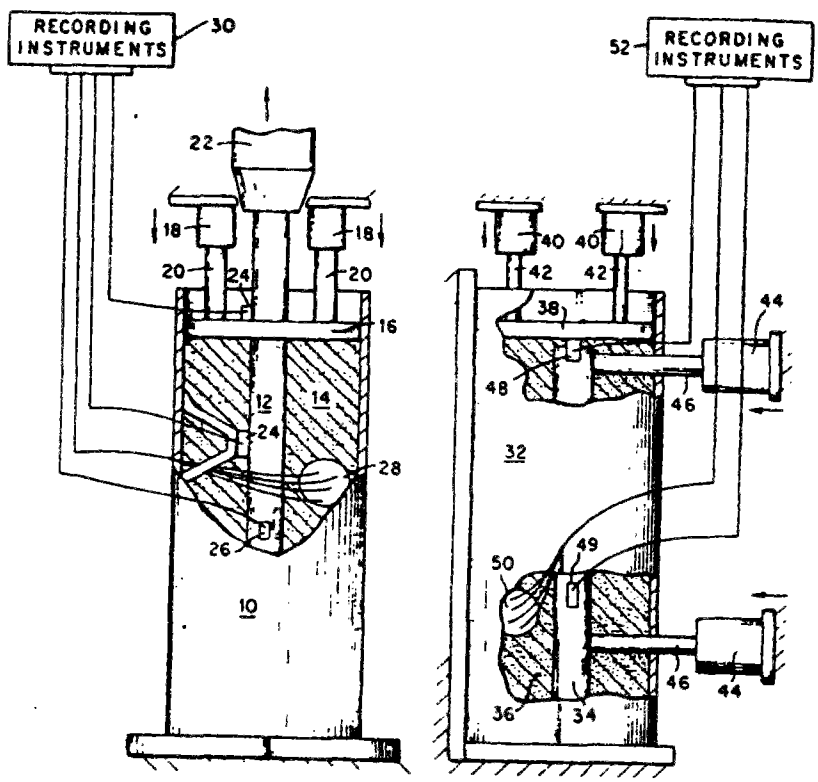


Figure I-65. *Méthode de détermination des mouvements d'élément de structure dans le sol (d'après Dibley et al., 1974)*

I.3. Conclusion

L'étude bibliographique nous a permis, dans un premier temps, à partir de l'analyse du comportement d'un élément de renforcement au sein d'un massif de sol, de mettre en évidence le rôle primordial du contact entre le sol et cet élément de structure dans la stabilité générale de l'ouvrage. Le transfert de charge se fait à travers une fine couche de sol, appelée couche d'interface, qu'il convient de bien étudier.

Pour connaître l'évolution du frottement entre le sol et la structure, des appareils de mesure *in situ* ont été développés. Leur usage reste cependant très limité. Les essais de laboratoire demeurent privilégiés.

A partir d'un état des lieux des appareillages actuellement disponibles en laboratoire, nous avons identifié les différentes approches possibles : cisaillement direct où la surface de cisaillement reste imposée au cours de l'essai, cisaillement simple où le cisaillement peut se développer librement au sein de l'échantillon. Le choix du chemin de cisaillement est également primordial pour pouvoir reproduire les phénomènes réels. Les chemins à rigidité normale imposée (qui recouvrent les chemins à contrainte normale constante et à volume constant) sont les plus appropriés, la raideur du système pouvant être déterminée à partir du module pressiométrique du sol. L'influence de la rugosité de la structure, de la densité et de la nature du sol et de la contrainte normale initiale a été mise en évidence.

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

- permettre de réaliser des essais selon tout type de chemin,
- pourvoir supporter des contraintes importantes (jusqu'à 1 000 kPa),
- permettre de grands déplacement tangentiel d'interface sans perte de matériau,
- pouvoir réaliser des sollicitations monotones à vitesse contrôlée variable et des sollicitations cycliques,
- avoir des effets de bords négligeables,

- permettre une visualisation du mouvement des grains au sein de l'échantillon,
- permettre l'utilisation d'un matériau relativement grossier,
- avoir une mesure locale de la contrainte normale au niveau de l'interface.

La présentation de l'appareil de cisaillement simple annulaire sera l'objet du prochain chapitre. Une comparaison avec les résultats présentés dans ces éléments bibliographiques servira à valider notre dispositif.

II. L'APPAREIL DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE

II. L'APPAREIL DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE 82

II.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 83
II.2. DESCRIPTION DE L'APPAREIL 84
II.2.1. Présentation de la partie mécanique 85
II.2.1.1 Description du sous-ensemble motorisation et fût 85
II.2.1.2 Description du sous-ensemble intermédiaire 88
II.2.1.3 Description du sous-ensemble partie supérieure 89
II.2.2. Présentation de la partie entourant l'échantillon 92
II.2.2.1 Description du clou 92
II.2.2.2 Description des capteurs de pression totale 95
II.2.2.3 Description du confinement vertical de l'échantillon 101
II.2.2.4 Description du confinement radial de l'échantillon 101
II.2.3. Présentation du module électronique et informatique 102
II.2.3.1 Métrologie liée à l'appareil de cisaillement simple annulaire 102
II.2.3.2 Interface électronique - informatique et acquisition et traitement des données 104
II.2.3.3 Le logiciel générateur d'application Viewdac 105
II.3. PROCEDURE EXPERIMENTALE 108
II.3.1. Fabrication de l'échantillon 108
II.3.1.1 Préparation des échantillons de sable lâche 109
II.3.1.2 Préparation des échantillons de sable dense 109
II.3.1.3 Préparation d'échantillon à densité intermédiaire 111
II.3.2. Application du vide au sein de l'échantillon 115
II.3.3. Assemblage des pièces mécaniques 117
II.3.4. Saturation et consolidation de l'échantillon 117
II.3.5. Début de l'essai et cisaillement de l'échantillon 119

Dans ce paragraphe, nous présentons le principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement simple annulaire puis nous détaillons les différentes parties qui le constituent : la partie mécanique, la partie confinant l'échantillon puis le module électronique et informatique (Lerat et Unterreiner, 1994, Lerat *et al.*, 1997). Nous expliquons ensuite la procédure expérimentale qui nous permet de réaliser des essais de cisaillement simple annulaire.

II.1. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement simple annulaire (A.C.S.A.) est de faire tourner un cylindre métallique, modélisant l'élément de structure et désigné sous le nom de "clou" dans un échantillon de sol annulaire (figure II-1).

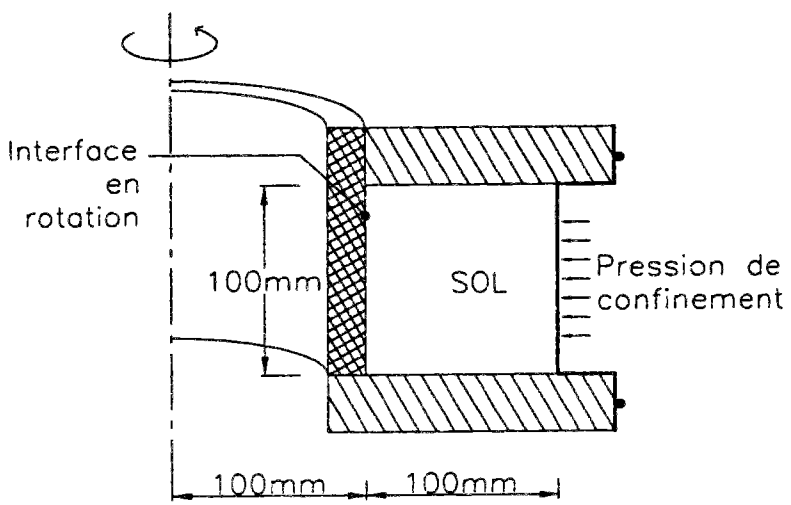


Figure II-1. *Principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement simple annulaire*

Ce principe a fait l'objet d'un dépôt de brevet en août 1994 (Belmont et *al.*, 1994; figure II-2) dont les termes de l'abrégé sont les suivants :

"L'invention est relative à un dispositif de mesure permettant l'évaluation des propriétés physiques d'interface entre un matériau solide à tester (4) et un matériau granulaire (9).

Selon l'invention, ce dispositif comprend : un noyau (1-4) présentant une face (4A) de révolution et constitué par le matériau à tester; une cage externe (6), à

l'intérieur de laquelle est disposé le noyau (1-4) et qui supporte une face interne (6A) présentant une symétrie de révolution, délimitant un espace entre sa face interne (6A) et la face (4A) du noyau; un dispositif d'entraînement en rotation (2-3) du noyau; et des dispositifs de mesure de la rotation et du couple d'entraînement selon cette rotation; ledit espace étant destiné à être empli dudit matériau granulaire (9). de manière que puissent être réalisées des mesures de rotation et de couple et que puissent être déduits de ces mesures le déplacement tangentiel et la contrainte de cisaillement du matériau granulaire à l'interface (9A)".

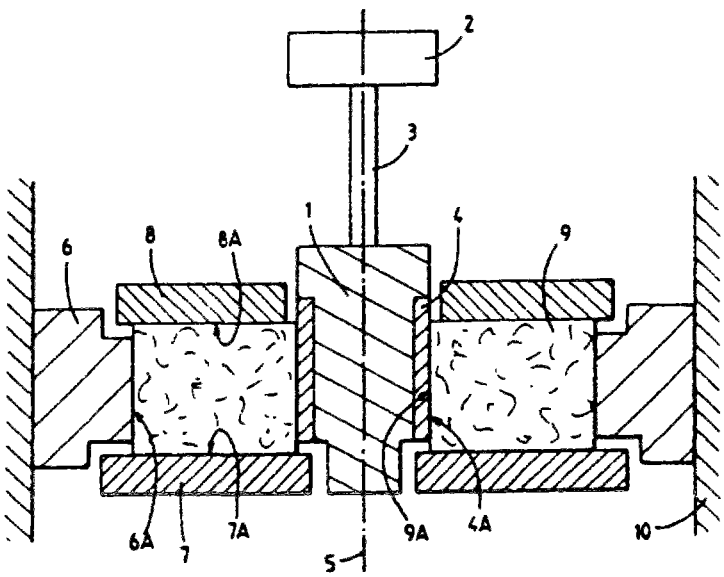


Figure II-2. *Schéma de fonctionnement de l'appareil de cisaillement simple annulaire (d'après Belmont et al., 1994)*

II.2. Description de l'appareil

La présentation de l'appareil de cisaillement simple annulaire peut être décomposée en trois sous-parties :

- Présentation de la partie mécanique, comprenant le bâti, le système d'entraînement (moteur, moto-réducteur), le couplemètre et la partie supérieure de l'appareil de cisaillement simple annulaire.
- Présentation de la partie entourant l'échantillon, qui comporte le clou, les capteurs de contrainte totale et le système de confinement.

- Présentation du module électronique et informatique, composé principalement des différents capteurs, de leur conditionnement et du système d'acquisition et de traitement des données.

II.2.1. Présentation de la partie mécanique

La conception et la réalisation de la partie mécanique de l'appareil de cisaillement simple annulaire se sont faites, à partir d'avril 1992, en étroite collaboration avec le Service Etude et Conception des Prototypes (S.E.C.P.) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. L'appareil, comme présenté sur la figure II-3, peut se décomposer selon trois niveaux : le niveau inférieur, constitué d'un fût supportant la partie motorisation, le niveau intermédiaire, composé d'une rehausse enfermant le couplemètre et le système de guidage en rotation, et le niveau supérieur, reposant sur un plateau, qui est la partie où l'échantillon de matériau granulaire est préparé, confiné puis cisaillé.

II.2.1.1 Description du sous-ensemble motorisation et fût

La figure II-4 présente le sous-ensemble motorisation constitué principalement d'un moto-réducteur Vassal et d'un réducteur Brevini.

Le moto-réducteur Vassal 4-D34-U265 est un moto-réducteur asynchrone synchronisé à 2 étages d'engrenages comprenant un couple roue et vis sans fin et un étage de pignons droits, permettant de fournir un couple de 22 N.m avec une réduction de 265. Un variateur de fréquence de 3 à 90 Hz, piloté soit par un potentiomètre 10 tours, soit par un ordinateur, permet de faire varier sa vitesse de 0 à 10 tours par minute.

Le réducteur Brevini est un réducteur coaxial type EQ 4090 / MN à arbre cannelé ayant une réduction de 1229. La liaison entre le moto-réducteur et le réducteur se fait par l'intermédiaire d'une barre cannelée et d'une douille. Cet ensemble permet d'obtenir des vitesses de cisaillement à l'interface de 0 mm/min à 6 mm/min avec un couple maximum de 7000 N.m.

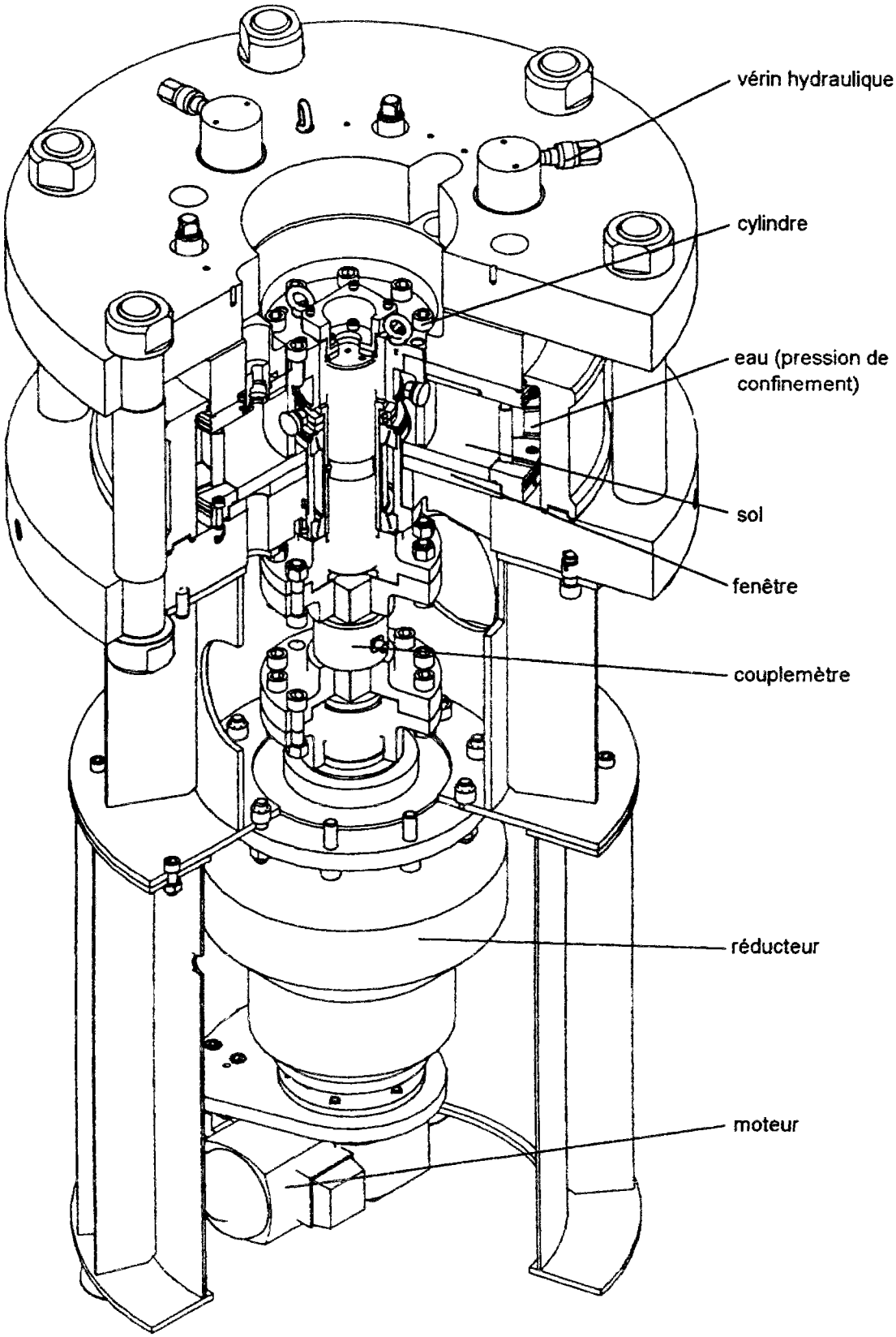


Figure II-3. *Vue éclatée de l'appareil de cisaillement simple annulaire*

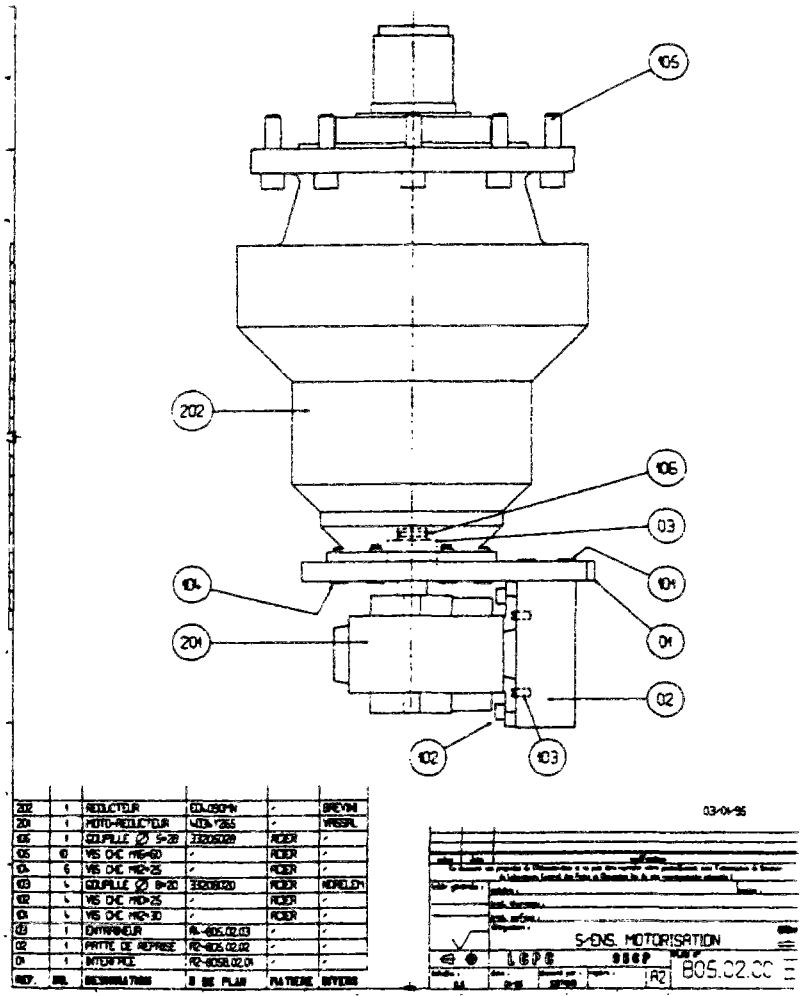


Figure II-4. *Représentation du sous-ensemble motorisation*

La conception de l'appareil, et en particulier le dimensionnement de la motorisation nécessita de nombreuses démarches auprès des fournisseurs et une véritable analyse des différents types de moteurs (continus, pas à pas, asynchrones...) et réducteurs (planétaires, coaxiaux ...) existants. (L'étude initiale, à partir d'un échantillon de dimensions supérieures, nécessitant un couple de 25000 N.m, nous avait conduit vers les fournisseurs de moteurs pour vannes d'écluses et pour l'aérospatiale).

Sur la figure II-5 est présenté le bâti, constitué du fût et de la rehausse. Le fût repose sur quatre pieds réglables en hauteur pour assurer la mise à niveau de l'appareil. Ce fût est constitué d'un cylindre central et d'ailettes radiales, assemblage présentant une masse minimale pour reprendre une masse de l'ordre d'une tonne. La rehausse sera présentée dans

le paragraphe suivant. Le sous-ensemble motorisation est fixé sur la partie supérieure de ce fût.

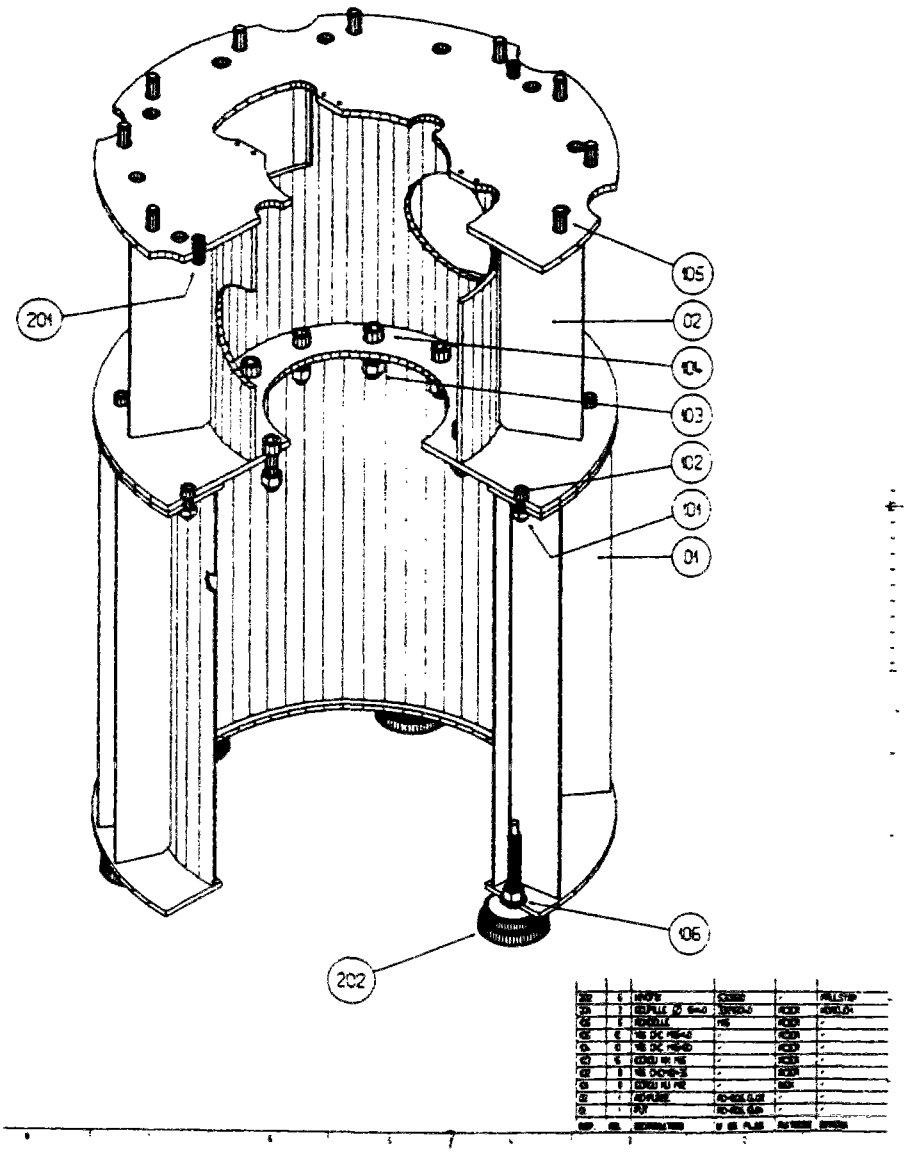


Figure II-5. *Représentation du bâti, constitué du fût et de la rehausse*

II.2.1.2 Description du sous-ensemble intermédiaire

La mesure du couple transmis à l'interface se fait par l'intermédiaire d'un couplemètre statique CS 1060 à jauges de la société FGP (figure II-6 a), placé entre le réducteur et le

cylindre d'interface. Ce couplemètre est relié à un conditionneur qui l'alimente en 0-10 volts et traite son signal électrique. Ce couplemètre est situé à l'intérieur de la rehausse, partie fixée sur le fût inférieur (voir figure II-5). Pour minimiser les frottements parasites lors de la transmission du mouvement de rotation au cylindre et pour assurer un jeu latéral minimal, nous avons conçu un système de guidage, appelé palier (figure II-6 b), constitué principalement de deux roulements à rouleaux. Ce système permet aussi de bloquer verticalement, par l'intermédiaire d'un ressort, l'axe de guidage en lui transmettant une pression verticale constante.

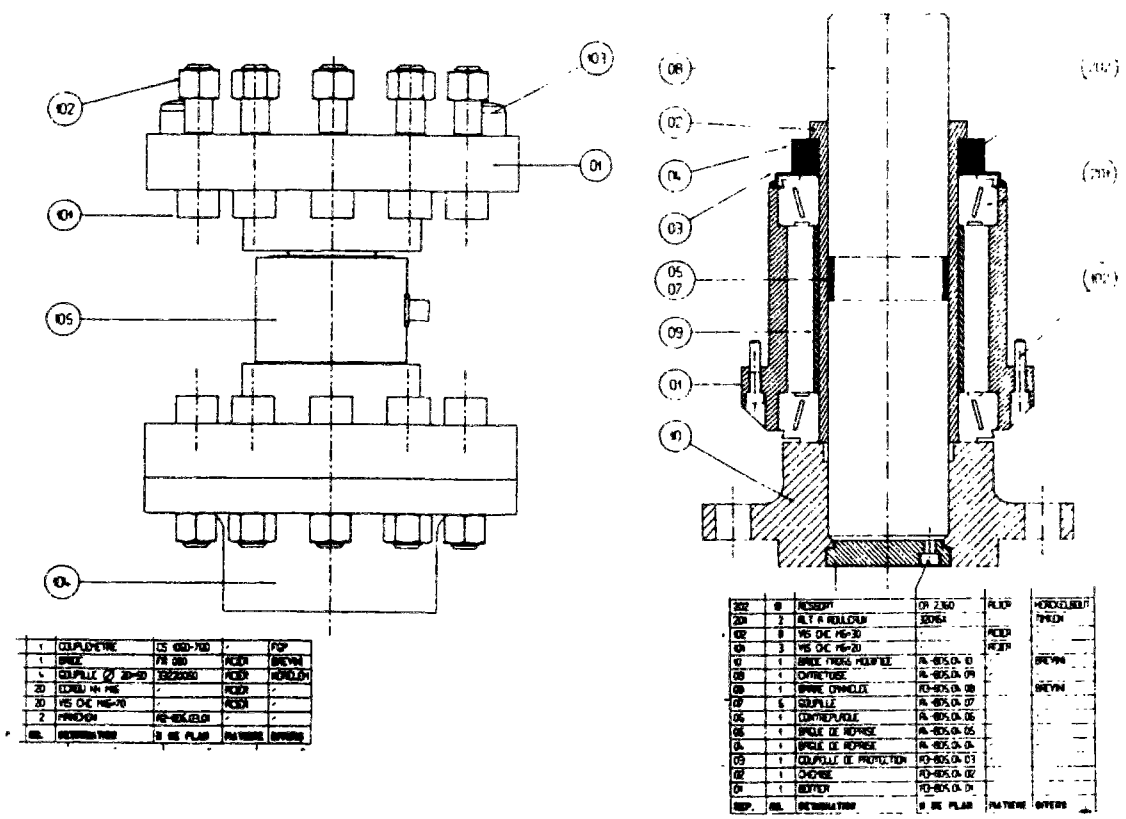


Figure II-6. *Schéma (a) du couplemètre et (b) du sous-ensemble palier*

II.2.1.3 Description du sous-ensemble partie supérieure

La partie supérieure de l'appareil de cisaillement simple annulaire est une partie constituée de pièces mécaniques pouvant être facilement montées et démontées d'un essai sur l'autre, avec des moyens de manutention appropriés.

L'ensemble est assemblé sur un plateau circulaire (figure II-7 b), fixé sur la rehausse intermédiaire et au centre duquel débouche l'axe cranté sortant du système de guidage. Ce plateau, appelé également embase inférieure, comporte deux évidements, qui, comme nous le verrons par la suite, permettent l'observation de la base inférieure de l'échantillon, lors de l'essai, par l'intermédiaire de deux miroirs. Ce plateau, en acier traité, a une épaisseur de 80 mm et une masse de 80 kg pour assurer une bonne stabilité de l'appareil. Son diamètre extérieur est de 750 mm. Il comporte 13 trous lamés sur sa surface latérale pour les différents conduits de fluide (air, gaz carbonique, eau) et une soixantaine de trous verticaux (trous de fixations ou passage de fluide).

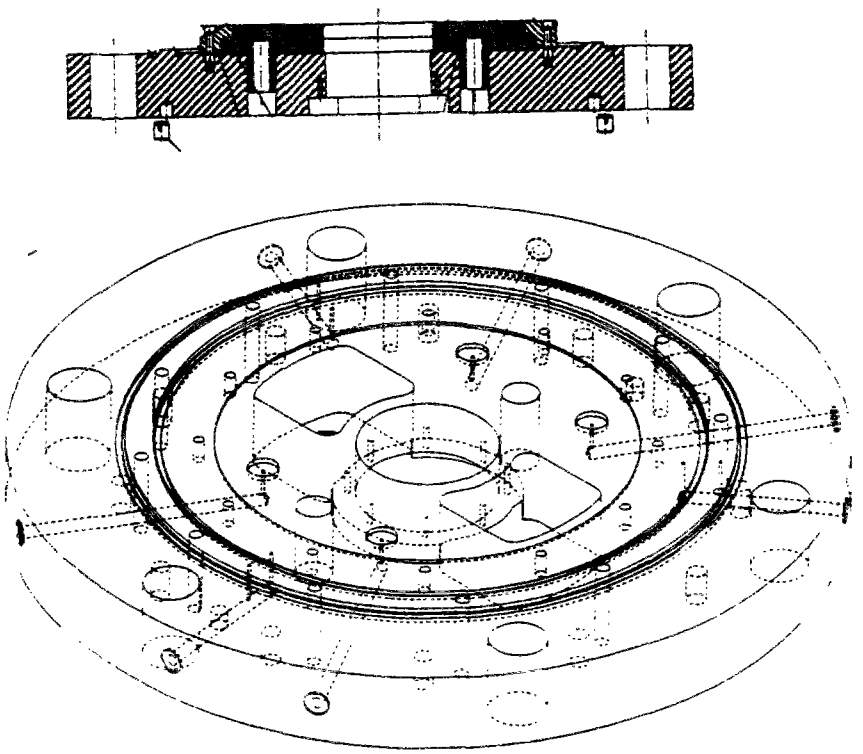


Figure II-7. *(a) Coupe de l'embase inférieure et (b) plateau inférieur*

Sur cette embase vient se centrer un assemblage de deux plaques de verres de 20 mm d'épaisseur pouvant supporter une pression de 1000 kPa en cours d'essais (figure II-7 a). Ces plaques de verre font partie des constituants consommables de l'appareil car elles se dégradent pendant les essais et sont régulièrement changées. Elles sont fixées sur le plateau

par l'intermédiaire de deux pions anti-rotation et d'une couronne qui assure également l'étanchéité au niveau du verre et qui est munie de trois pierres poreuses pour la saturation de l'échantillon ou sa mise sous vide.

Le clou, cylindre métallique, est alors solidarisé à l'axe cranté par l'intermédiaire d'un manchon de fixation vissé sur le dessus du clou et collé à un manchon cannelé imbriqué avec l'axe cranté. Le clou sera présenté en détail dans un des paragraphes suivants (II.2.2.1).

A partir de ces éléments, la fabrication de l'échantillon est alors possible. Nous la détaillerons dans la partie II.3 : procédure expérimentale.

La partie supérieure de l'échantillon est recouverte par le pavé supérieur (figure II-8 a). Ce pavé supérieur est constitué de l'assemblage de trois plaques, deux en acier inoxydable et une en duralumin. La plaque en contact avec l'échantillon proche de la zone d'interface, est une plaque d'usure que l'on peut facilement changer lorsque sa dégradation devient trop importante. Ces plaques permettent également l'utilisation de deux capteurs de pression totale pour mesurer la contrainte verticale appliquée à l'échantillon sous le pavé. Elles sont également équipées de trois conduits permettant le passage de fluide.

Autour de ce pavé supérieur vient se positionner l'enceinte extérieure (figure II-8 b), l'étanchéité entre ces deux pièces étant assurée par un joint torique. Cette enceinte, en alliage d'aluminium, a été fabriquée en forge par anodisation dure pour le protéger contre l'oxydation. Elle est fixée sur le plateau supérieur. Elle va permettre d'appliquer une pression radiale d'eau à l'échantillon. Son épaisseur de 40 mm assure des déformations négligeables pour des pressions intérieures de l'ordre de 1000 kPa. La forme de sa partie supérieure permet un échappement de toutes les bulles d'air par les trois orifices de purge.

Au-dessus du pavé supérieur vient se positionner l'embase supérieure, plaque d'acier de 80 mm d'épaisseur et d'une masse de 80 kg. Ce plateau supérieur repose sur six colonnes de traction et contrôle le déplacement vertical du pavé supérieur. Il empêche également sa rotation par deux axes de guidage axiaux. Il est également équipé de trois vérins de 12 tonnes qui peuvent appliquer une force constante sur le pavé supérieur (ces différents éléments sont visibles sur la vue éclatée, figure II-3,).

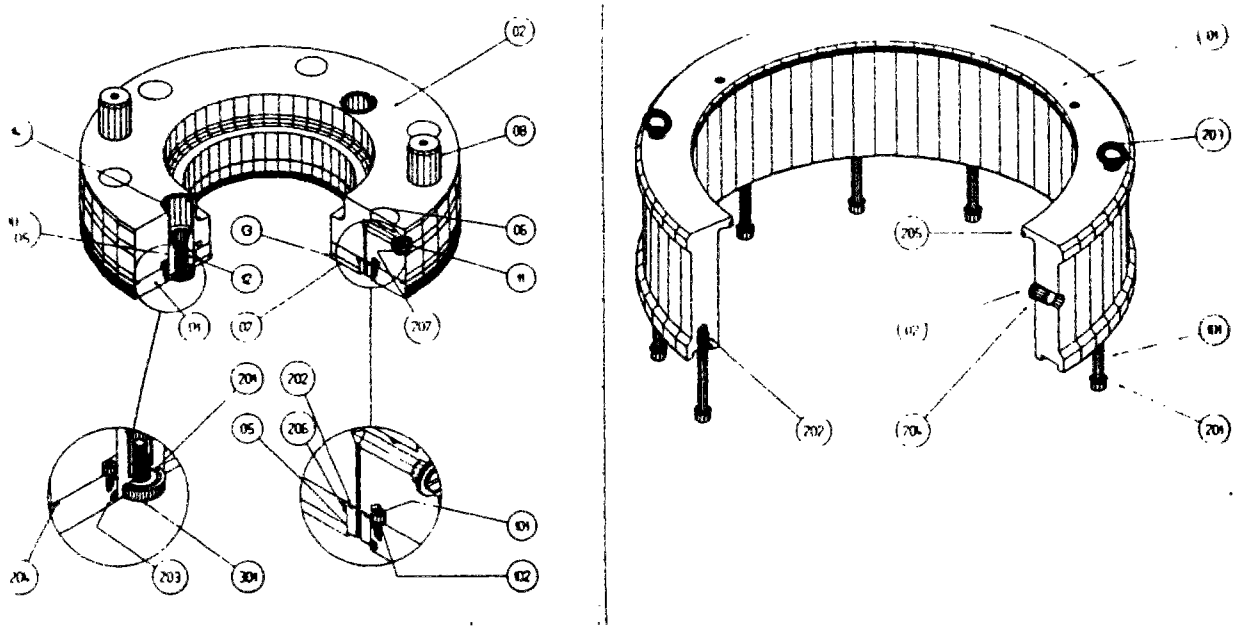


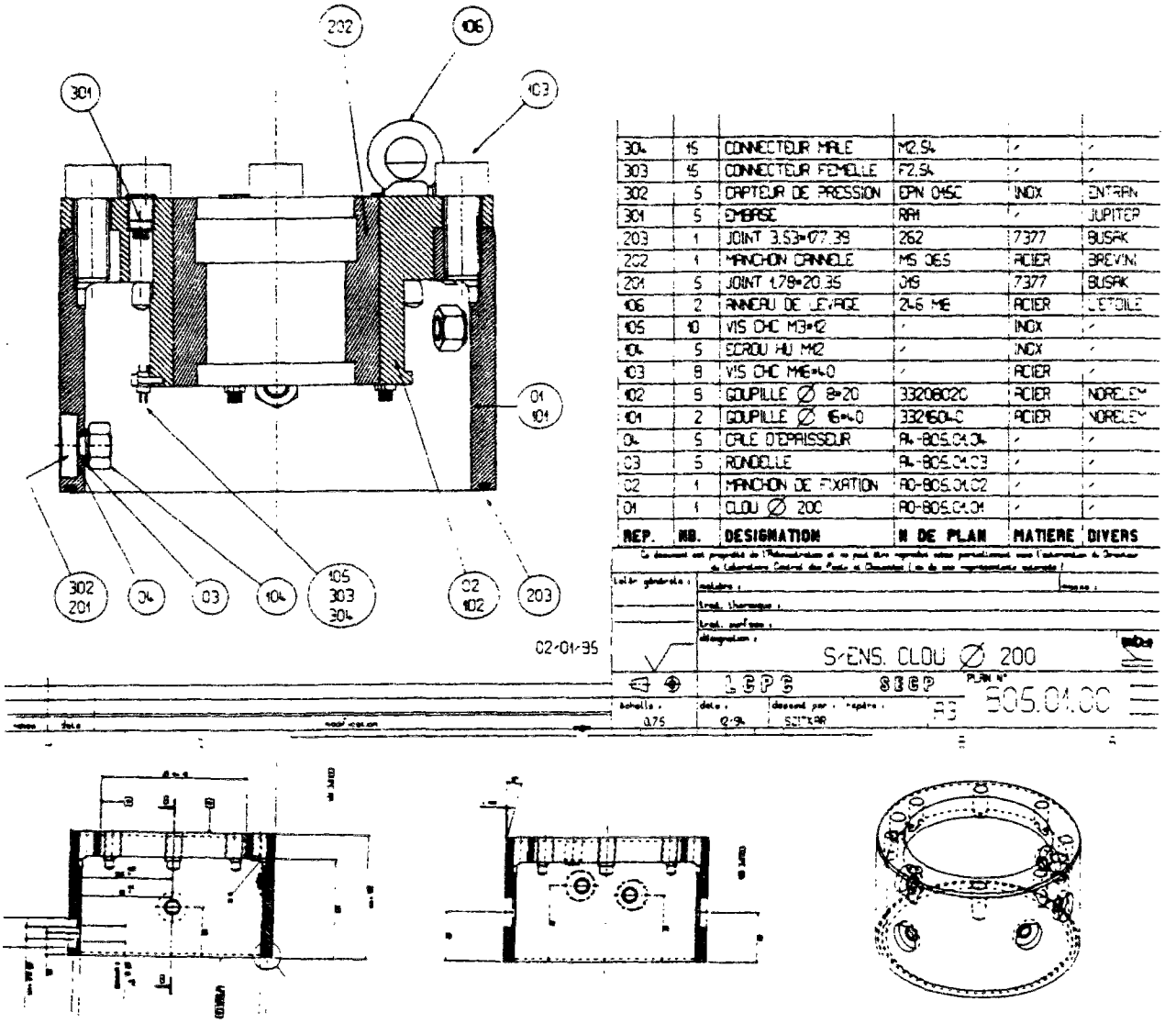
Figure II-8. *(a) Pavé supérieur et (b) enceinte extérieure*

II.2.2. Présentation de la partie entourant l'échantillon

Revenons sur la description des différents éléments entourant l'échantillon annulaire. Il s'agit du clou, des capteurs de contrainte totale disposés sur le clou, de la membrane de confinement, des plaques de verre et du pavé supérieur.

II.2.2.1 Description du clou

L'échantillon de sol granulaire est préparé autour du clou (figure II-9). Ce clou est la partie centrale de l'appareil. Il est constitué d'un cylindre de rayon 100 mm et d'une hauteur de 150 mm, laissant une hauteur utile en contact avec l'échantillon de 100 mm. Un système à ressorts permet de maintenir une pression de contact constante entre la plaque de verre inférieure et le clou pour assurer l'étanchéité de l'échantillon et rendre impossible la perte de matériau.



REP.	NB.	DESIGNATION	N DE PLAN	MATIERE	DIVERS
304	15	CONNECTEUR MALE	M2.SA	/	/
303	15	CONNECTEUR FEMELLE	F2.SA	/	/
302	5	CAPTEUR DE PRESSION	EPN 045C	INOX	ENTRAN
301	5	EMBASE	RAH	/	JUPITER
203	1	JOINT 3.53*07.39	262	7377	BUSAK
202	1	MANCHON CANNELE	MS 065	ACIER	BREVIN
201	5	JOINT 1.78*20.35	049	7377	BUSAK
106	2	ANNEAU DE LEVAGE	24-6 ME	ACIER	L'ETOILE
105	10	VIS CHC M3*12	/	INOX	/
104	5	ECROU AU M12	/	INOX	/
103	8	VIS CHC M6*40	/	ACIER	/
102	5	GOUPILLE ∅ 8*20	33208020	ACIER	NORELEM
101	2	GOUPILLE ∅ 16*40	332160-C	ACIER	NORELEM
04	5	CALE D'EPAISSEUR	PA-805.04.04	/	/
03	5	RONDELLE	PA-805.04.03	/	/
02	1	MANCHON DE FIXATION	PA-805.04.02	/	/
01	1	CLOU ∅ 200	PA-805.04.01	/	/

Figure II-9. *Vues globales du clou équipé des capteurs*

La rugosité étant un paramètre essentiel du comportement de l'interface, nous avons donc conçu différents types de clou :

- soient des clous dits lisses, présentant une rugosité très faible,
- soient des clous dits rugueux, avec une rugosité importante.

La rugosité des clous lisses a été mesurée avec un rugosimètre en dix positions différentes, sur une longueur de 25 mm. La figure II-10 présente un enregistrement. La valeur intéressante pour notre étude est la valeur de R_{max}. La moyenne des R_{max} pour le clou

lisse est de 15µm, chaque valeur de R_{max} étant définie sur une longueur de 25mm, soit beaucoup plus que celle définie par Uesugi et Kishida (1986, b). Cette étude nous permettra de définir la rugosité relative du clou par rapport au diamètre moyen D_{50} du matériau utilisé.

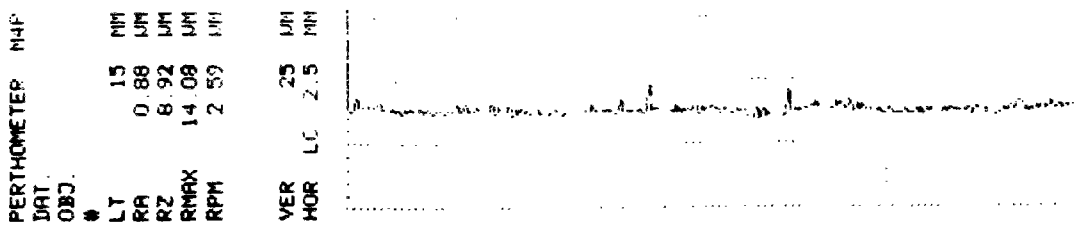


Figure II-10. *Enregistrement de la rugosité du clou*

Les clous rugueux sont obtenus soit par moletage (clou avec des gorges verticales de 1 mm de profondeur, à 45° tous les 2 mm), soit par collage de graviers sur sa surface. Dans le premier cas, la valeur de R_{max} est 1 mm et dans le second cas de la valeur de $D_{50}/2$ du gravier, les grains étant jusqu'à mi hauteur dans la colle. L'intérêt du clou rugueux obtenu par moletage est que ses caractéristiques de rugosité ne varient pas au cours de l'essai alors que les grains collés peuvent se casser ou se décoller sous des contraintes de cisaillement trop importantes (nous avons par ailleurs toujours utilisé le clou moleté, hormis pour quelques essais préliminaires lorsque l'usinage n'était pas réalisé).

Le clou lisse peut être équipé de cinq capteurs de pression totale, d'un diamètre de 30 mm, qui permettent une mesure locale de la pression normale au niveau de l'interface entre le clou et le matériau granulaire. Leurs positions sont indiquées sur la figure II-9, l'un étant à la base du clou (7 mm de la plaque de verre), deux au centre (leur centre étant à 50 mm de la base) et deux dans la partie supérieure en contact avec le matériau granulaire (centre à 67 et 77 mm de la base), leurs positions horizontales respectives étant à 90°. Les deux capteurs dans la partie supérieure de l'échantillon ont été conçus pour permettre une mesure proche du pavé supérieur dans le cas d'une consolidation isotrope d'un matériau dense et d'un matériau lâche.

II.2.2.2 Description des capteurs de pression totale

Ces capteurs de pression totale ont été développés en collaboration avec la société Entran. La complexité de ces capteurs provient de leur surface de mesure cylindrique. Aucun capteur disponible ne répondait à nos exigences. Le capteur prototype conçu présente donc une surface externe de mesure cylindrique avec un rayon de courbure de 10 cm, rayon du clou (figure II-11). Les jauges de mesure ont été préférées à un système de mesure des contraintes "type piston" où les frottements entre la partie externe et le piston central en translation sont difficilement identifiables dans le cas d'une utilisation avec un matériau granulaire. Leur étendue de mesure a été fixée à 1 000 kPa, une surcharge jusqu'à 1 500 kPa étant tolérée.

En raison de sa forme géométrique (circulaire et plane selon deux génératrices perpendiculaires), l'épaisseur d'APX4 constituant la calotte du capteur n'est pas constante selon le rayon et ne présente pas de symétrie de révolution. La difficulté rencontrée a donc été de trouver la position des 4 ponts de jauges pour que la réponse du capteur soit constante pour une force ponctuelle donnée, indépendamment de la position du point d'application sur la calotte du capteur. De nombreux essais ont été réalisés dans les laboratoires de la société Entran, avec un dispositif approprié d'application de la force ponctuelle pour arriver aux positions optimales de collage des jauges. D'autre part, une sonde nickel a également été collée sur la calotte de chaque capteur pour mesurer les variations de température à l'interface au cours des essais.

Le diamètre des capteurs retenu a été de 30 mm pour d'un nombre suffisant de contact matériau granulaire - capteur soit atteint. Nous pouvons estimer que le nombre de contacts, pour un sable ayant un D_{50} de 0,3 mm à plus de 5 000 et pour un gravier, ayant un D_{50} de 3 mm, à plus de 50, nombre minimum estimé de contacts (d'après Memier, 1980).

Quatre types d'essais de calibration ont été réalisés sur ces capteurs :
- essais par application directe d'une pression par un fluide (air ou eau),
- essais en centrifugeuse au L.C.P.C. de Nantes,
- essais à la boîte de cisaillement direct modifiée,
- essais avec un dispositif type cylindre creux de sable dense et lâche.

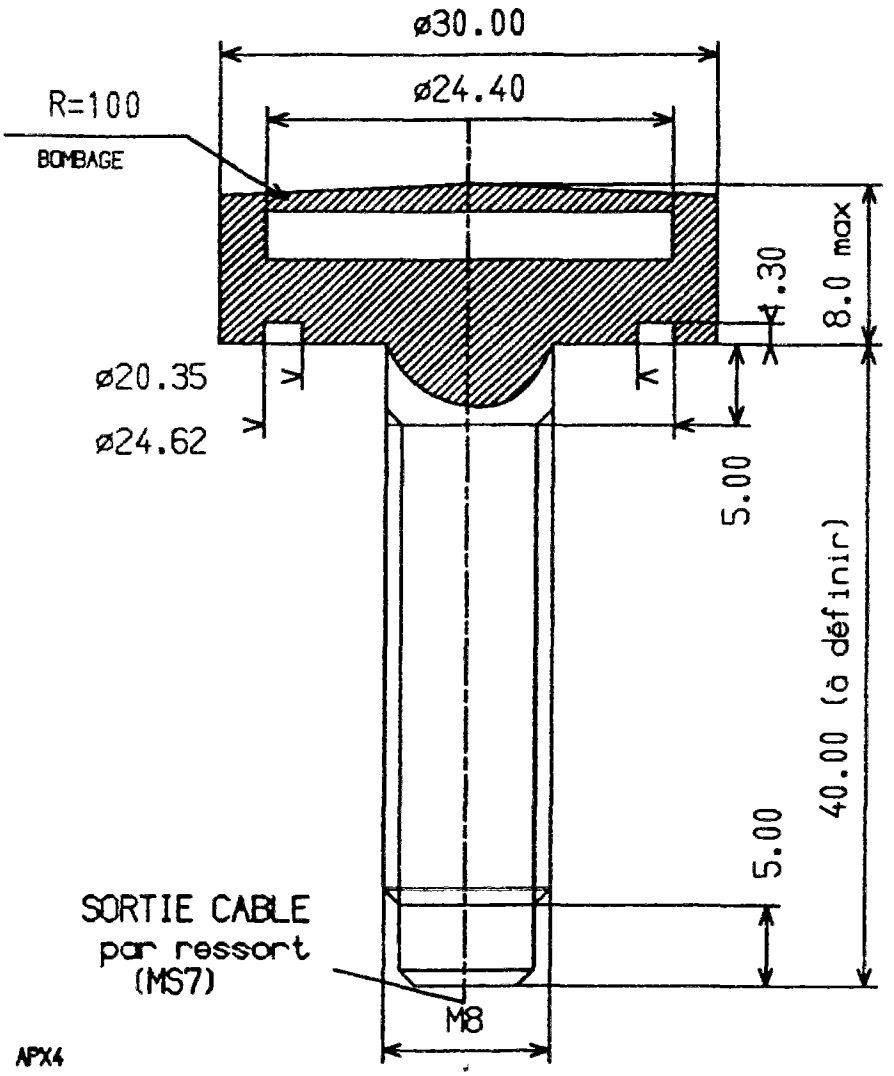


Figure II-11. *Capteur de contrainte totale, développé en collaboration avec la société Entran*

Nous allons présenter les résultats obtenus en centrifugeuse et avec le dispositif type cylindre creux. Les essais avec pression de fluide donnent des résultats parfaits, la pression lue correspondant à la pression appliquée, sans hystérésis lors de cycles chargement - déchargement. Les essais réalisés avec une boîte de cisaillement direct modifiée, adaptée à la géométrie du capteur, donnent des valeurs mesurées beaucoup plus faibles que la contrainte appliquée, même avec des échantillons de petite épaisseur, les effets de bord, en particulier le frottement le long des parois, étant trop importants.

a. Essais en centrifugeuse

Ces essais ont été réalisés sur la centrifugeuse du L.C.P.C. de Nantes, dans le cadre du programme européen Macrogravité (Boulebnane et Laréal, 1994). Le capteur est semi-encastré dans une plaque métallique puis recouvert d'un massif de sable de Fontainebleau non compacté. Comme tous les capteurs à action directe étudiés dans ce programme, le capteur présente une hystérésis très importante et une mauvaise linéarité, surtout en déchargement (figure II-12).

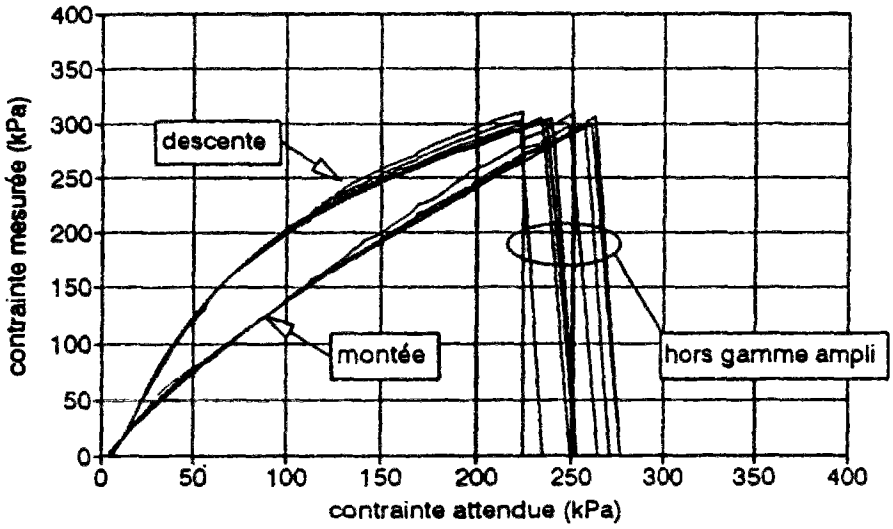


Figure II-12. *Essai de centrifugation sur le capteur de contrainte totale CERMES-Entran (d'après Boulebnane, 1996)*

La chute de réponse du capteur au-delà de 250 kPa est due au chargement qui dépasse la gamme de l'amplificateur utilisé. La contrainte mesurée surestime systématiquement d'environ 30% la contrainte géostatique et elle augmente plus fortement au début de chaque palier de chargement.

Les résultats obtenus lors de ces essais sont encourageants pour leur bonne reproductibilité mais nous ont conduits à développer un appareillage spécifique pour analyser dans des conditions géométriques proches de l'appareil de cisaillement simple annulaire ces cellules de contraintes.

b. Essais avec un dispositif type cylindre creux

La figure II-13 présente le dispositif type cylindre creux que nous avons réalisé pour étudier la réponse des capteurs de contraintes totales. Le cylindre métallique, équipé des cinq cellules, est placé au centre d'un échantillon de sable annulaire de rayon interne 100 mm et de rayon externe 120 mm. Cet échantillon est fabriqué, confiné et sollicité radialement comme un échantillon pour un essai triaxial de grandes dimensions.

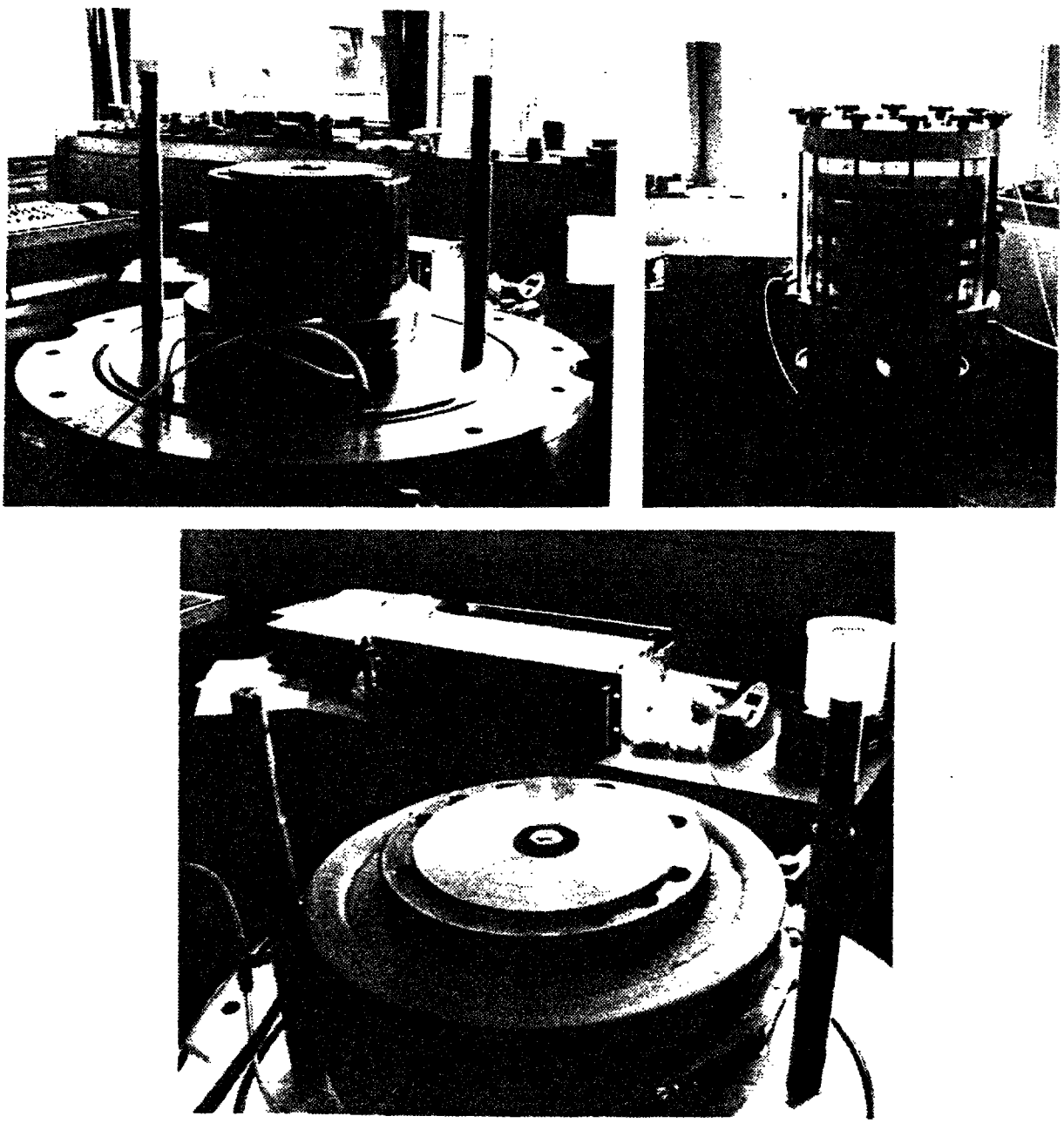


Figure II-13. *Dispositif de calibration des capteurs de contrainte totale*

Nous avons fabriqué des échantillons de sable d'Hostun RF dense et lâche. Les résultats pour les essais avec un échantillon de sable dense sont présentés sur la figure II-14 et ceux avec du sable lâche sur la figure II-15. Les courbes obtenues dans les deux cas sont homothétiquement semblables à la courbe correspondant à la pression appliquée. L'hystérésis est moins marquée que pour les essais en centrifugeuse.

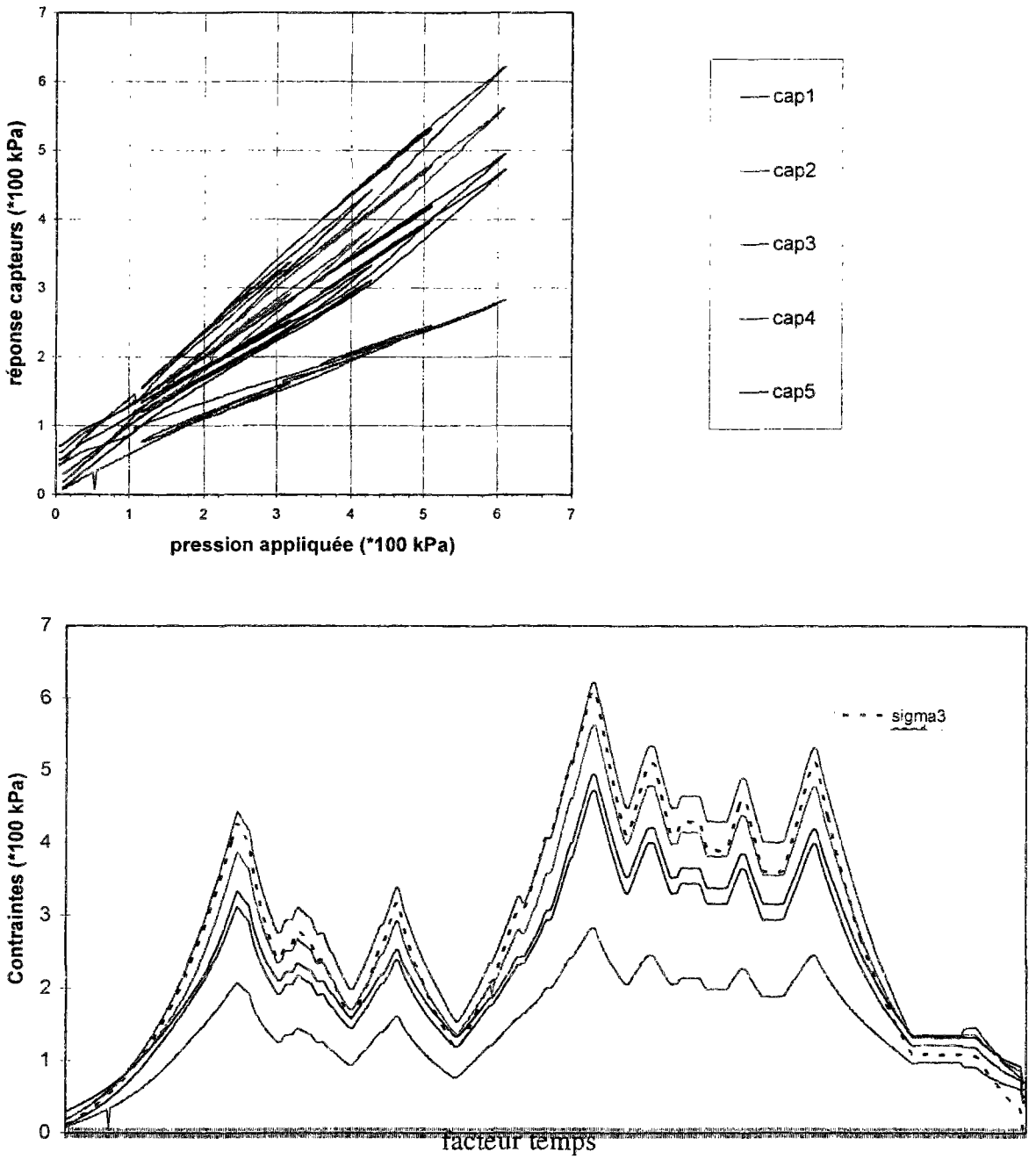


Figure II-14. *Essai de calibration avec du sable d'Hostun RF dense*

Avec le sable dense, les résultats obtenus avec les différents capteurs présentent une grande dispersion. En particulier, le capteur 5 donne des valeurs très faibles. Sa position géométrique, au sommet du clou, semble responsable de ces mesures différentes. Pour l'échantillon de sable lâche, les résultats sont plus homogènes et la valeur moyenne des cinq capteurs correspond à la contrainte appliquée.

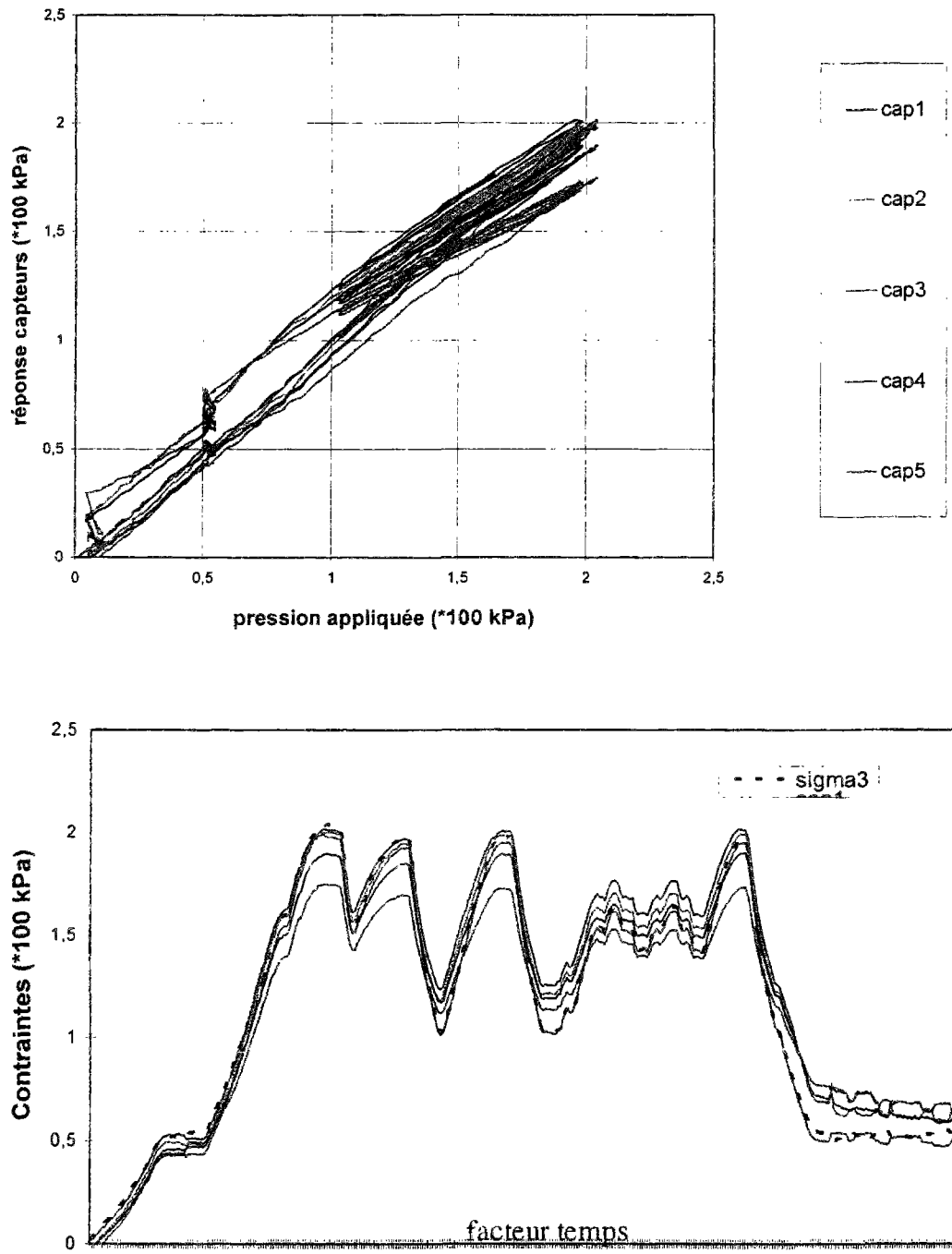


Figure II-15. *Essai de calibration avec du sable d'Hostun RF lâche*

Cette différence de comportement selon la densité de l'échantillon peut s'expliquer par des phénomènes de voûtes entre les grains de sable plus prononcés pour un échantillon de matériau dense.

Ces capteurs de contrainte totale permettent une bonne appréhension qualitative des phénomènes mais il faudra être plus réservé sur les résultats quantitatifs obtenus, notamment avec des échantillons de sable dense, où les valeurs sont très dispersées.

Deux capteurs de pression totale, ayant les mêmes caractéristiques électriques et géométriques, mais à surface plane, peuvent également équiper le pavé supérieur. Les positions de leur centre sont à 60 mm de l'interface (figure II-8).

II.2.2.3 Description du confinement vertical de l'échantillon

Le confinement vertical de l'échantillon se fait d'une part, pour le bas de l'échantillon par l'intermédiaire des deux plaques de verres, d'autre part, pour le haut, par le pavé supérieur. Les plaques de verres ont été nécessaires dans la conception de l'appareil de cisaillement simple annulaire pour permettre la visualisation de la base de l'échantillon. A travers les deux évidements réalisés dans le plateau (figure II-7), et par l'intermédiaire des deux miroirs, nous pouvons observer la base de l'échantillon et mettre également en position des systèmes de prises d'images (soit un camescope, soit un appareil photographique).

Le déplacement vertical du pavé supérieur est contrôlé par l'embase supérieure à l'aide soit de trois vis pour bloquer le déplacement vertical, soit par les trois vérins de 12 tonnes qui peuvent appliquer une pression verticale à l'échantillon.

II.2.2.4 Description du confinement radial de l'échantillon

L'échantillon est confiné radialement par une membrane en latex ou en néoprène de 1.5 mm d'épaisseur. Cette membrane préformée assure l'étanchéité de l'échantillon entre la couronne

fixant les plaques de verre et le pavé supérieur. Elle est maintenue sur ces deux supports par deux joints toriques. L'eau introduite entre l'enceinte cylindrique et la membrane permet d'appliquer la pression radiale à l'échantillon de sol granulaire.

II.2.3. Présentation du module électronique et informatique

II.2.3.1 Métrologie liée à l'appareil de cisaillement simple annulaire

Faisons la liste des différentes voies de mesure qui équipent l'appareil de cisaillement simple annulaire en rappelant brièvement leurs caractéristiques électriques :

⇒ 7 capteurs de contraintes totales "prototypes" : cinq capteurs cylindriques peuvent équiper le clou lisse, deux plans peuvent équiper le pavé supérieur

⇒ 2 capteurs de pression : un capteur de pression permet de mesurer la valeur de la pression radiale appliquée à l'échantillon (pression de l'eau entre la membrane et l'enceinte externe) et un autre la valeur de la pression au sein de l'échantillon

⇒ 1 couplemètre à jauges

⇒ 1 codeur incrémental optoélectronique pour la mesure de la rotation

⇒ 1 contrôleur pression-volume (GDS) qui permet de mesurer la pression et la variation de volume de l'eau de confinement.

Les capteurs de pression totale, compensés en température, sont alimentés en 5 volts, courant continu, et présentent une sensibilité de l'ordre de 10 mV/bar. Le couplemètre FGP, d'étendue de mesure 7000 m.N, est alimenté en 10 volts, courant continu, et a une sensibilité de 2,027 mV/V. Pour conditionner ces huit voies de mesure, nous avons conçu, avec la société FGP, deux racks de mesure. Ils se composent d'un module "alimentation" assurant

l'alimentation en 15 Vcc des différentes cartes du rack électronique à partir du secteur, d'un module "visualisation" assurant l'affichage des voies de mesure, de modules "conditionnement" de type MC 402 assurant l'excitation, l'amplification des signaux et la mise à l'échelle de la mesure du capteur associé et un module "température" pour sonde nickel pour conditionner les sondes placées dans les capteurs de contrainte totale.

Les réglages des cartes MC 402 (tension, étalonnage, gain et calibration), opérations nécessitant patience et persévérance, ne sont pas plus développés.

Les deux capteurs de pression servant à mesurer la valeur de la pression radiale appliquée à l'échantillon (pression entre la membrane et l'enceinte externe) et la valeur de la pression au sein de l'échantillon (vide lors de la préparation et le démoulage de l'échantillon ou contre - pression lors des essais) ont chacun un conditionneur qui délivre un signal +-10 volts, et un afficheur.

Pour la mesure de la rotation du cylindre métallique (qui nous permet ensuite de connaître la valeur du déplacement tangentiel de l'interface), nous avons placé sur l'embase supérieure, selon l'axe de rotation, un codeur incrémental optoélectronique de la société MCB. Il est absolu, monotour et à sorties parallèles. A code programmable (code binaire réfléchi Gray ou binaire naturel), ayant 8192 mots codés sur le tour (13 bits), il présente une résolution de 2'38" (ceci représente une résolution de l'ordre de 0,1 mm pour le déplacement tangentiel). Il nécessite une alimentation de 11 à 29 Vcc. Il présente 22 entrées / sorties qu'il a fallu conditionner à partir du dispositif d'acquisition et de traitement des données que nous présenterons par la suite.

L'utilisation d'un contrôleur digital pression - volume GDS développé par Menzies (1988) permet de mesurer et d'asservir la pression et la variation de volume de l'eau introduite dans l'enceinte. Ce contrôleur fonctionne avec un moteur pas à pas qui entraîne un piston à déplacement contrôlé dans une cellule remplie d'eau (capacité de 1 litre) à l'intérieur de laquelle un capteur mesure la pression. Nous pouvons donc imposer une pression de sortie et mesurer la variation de volume correspondante ou bien imposer une variation de volume (le plus souvent, nous imposons une variation nulle pour les essais à volume constant) et mesurer la variation de pression correspondante. Le GDS présente d'autres fonctions que nous n'utilisons pas dans notre application.

Le contrôleur pression - volume est connecté à un ordinateur via une carte IEEE (CEC-488, Keithley). Nous pouvons alors lire les valeurs mesurées (pression et variation de volume) mais également l'asservir pour modifier les paramètres en cours d'essais, à l'aide d'un logiciel d'acquisition des données.

II.2.3.2 Interface électronique - informatique et acquisition et traitement des données

Le système de contrôle et de mesure que nous avons utilisé est le système d'acquisition 575-2 de la société Keithley. Ce système est un système externe, c'est à dire que contrairement aux cartes d'acquisition généralement utilisées, il n'est pas logé directement sur une fiche ("slot") de la carte mère de l'ordinateur mais dans un coffret indépendant. Une carte d'interface IBIN-A est placée sur la carte mère de l'ordinateur pour assurer la connexion, via un câble parallèle. La mise en forme des signaux, leur connexion, leur conditionnement et la conversion analogique / numérique se font dans le boîtier externe. Ceci permet d'isoler ces traitements des bruits générés par l'ordinateur, le boîtier métallique blindé faisant cage de Faraday. Présentons rapidement les caractéristiques nécessaires à nos applications.

Ce système est équipé d'un module de mesure 16 bits (AMM2), d'un convertisseur analogique - numérique 50 kHz et offre la possibilité de 16 voies d'entrées différentielles (ou 32 voies simples) grâce au module AIM3A, avec amplificateur à gain programmable et filtres programmables. Ces voies sont utilisées pour le traitement des signaux provenant des capteurs de pression et du couplemètre, après conditionnement par le rack FGP.

> *Cet élément s'est révélé particulièrement fragile puisque son multiplexeur, défectueux, nous donnait des valeurs extravagantes mais l'identification de la panne dans la chaîne de mesure ne fût pas aisée.*

Trente-deux entrées / sorties numériques sont programmables par logiciel par blocs de 8 bits. Ces connexions nous ont permis de lire directement les 22 entrées / sorties au

codeur incrémental optoélectronique par blocs de 8 codes, les 13 bits de la mesure étant fractionnés en deux blocs.

Deux sorties analogiques rapides 12 bits nous permettent de générer une tension de +/- 10 volts qui pourra servir comme alimentation au variateur de fréquence du moto - réducteur (à la place du potentiomètre).

L'installation de la carte IBIN-A et l'installation de la carte IEEE nous ont amenés à étudier la structure de la carte mère de l'ordinateur pour trouver deux adresses informatiques (réglables par cavaliers sur les cartes) qui n'avaient pas d'interférence sur le fonctionnement de l'ordinateur et ces propres cartes et sans aucune interférence entre elles.

II.2.3.3 Le logiciel générateur d'application Viewdac

La société Keithley a développé un logiciel d'acquisition, Viewdac, très performant pour nos besoins. Il permet, par un travail en multitâche avec possibilité de préemption, de suivre en temps réel le déroulement de l'essai. Ce logiciel se présente comme un langage avec différentes routines qui nécessitent l'écriture de séquences adaptées à chaque application (la figure II-16 présente l'écriture d'une routine d'acquisition).

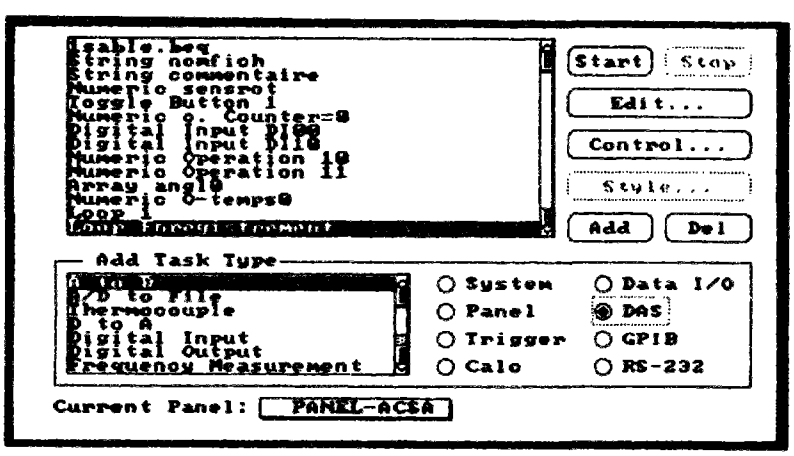


Figure II-16. *Ecriture d'une routine avec le logiciel générateur d'application Viewdac*

De plus, lors de son achat, c'était le seul logiciel sur le marché capable d'asservir un contrôleur pression - volume via la carte IEEE (acquisitions des données mais surtout génération d'un message suivi en temps réel par le GDS).

Il possède également une gamme de filtres numériques qui permettent le filtrage des signaux des différentes voies de mesures, élément important pour notre application car la mise en marche du moto-réducteur s'accompagne de l'émission d'ondes parasites qui perturbent fortement les signaux initiaux auxquelles se superposent les signaux parasites provenant du courant d'alimentation 50 Hz du réseau général. L'élimination des signaux parasites doit se faire de façon très prudente car il ne faut pas filtrer une partie du signal initial.

La figure II-17 présente l'écran de l'ordinateur lors d'un essai sur du sable avec utilisation des capteurs de contrainte totale. Nous pouvons contrôler directement les valeurs des différentes voies de mesure (dans ce cas, valeurs de cinq capteurs de contraintes totales et valeur moyenne, rotation, déplacement tangentiel, couple, contrainte radiale externe, contre - pression, pression et volume mesurés par le GDS) et voir leurs représentations en fonction l'une de l'autre ou en fonction du temps (valeurs des capteurs en fonction du temps avec deux échelles différentes et en fonction du déplacement, couple - *i.e.* contrainte de cisaillement) en fonction du déplacement, rotation absolue -. Des alarmes visuelles ont été programmées pour avertir l'utilisateur lorsqu'une limite d'utilisation d'un capteur est atteinte (sous forme d'un gros point rouge). Un bouton de lancement permet de démarrer l'acquisition des données, qui sont enregistrées, avec une fréquence que l'on fixe, dans un fichier ASCII que l'on peut ensuite traiter soit directement avec Viewdac, soit avec un tableur graphique type Excel ou Grapher.

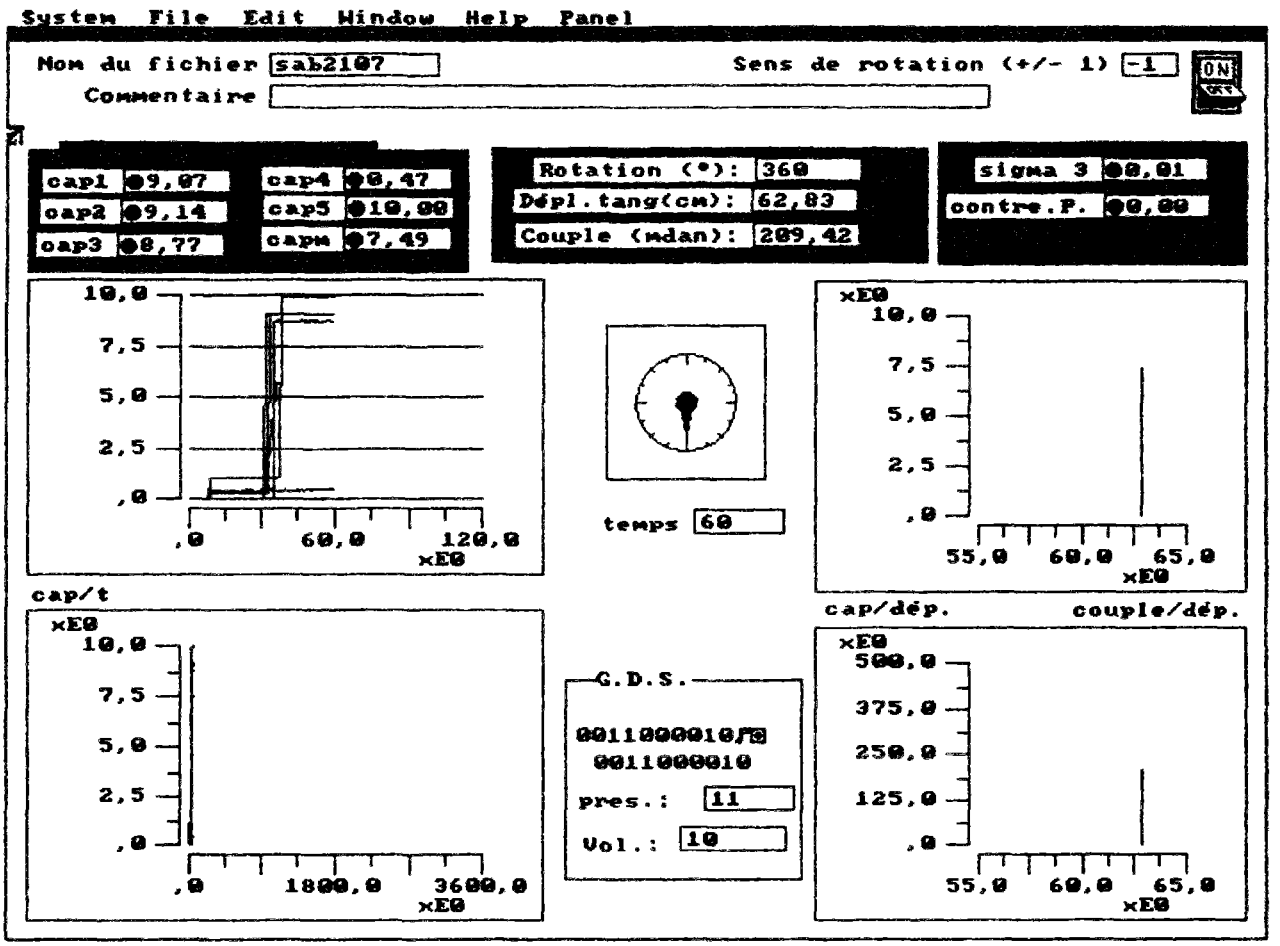


Figure II-17. *Ecran de contrôle lors de l'acquisition des données en cours d'essai*

II.3. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale pour réaliser un essai avec l'appareil de cisaillement simple annulaire peut être décomposée en différentes étapes, que nous décrirons successivement, en explicitant les procédures relatives à chaque type d'essais (sable ou gravier, matériau dense ou matériau lâche, confinement radial ou confinement isotrope).

- fabrication de l'échantillon
- application du vide au sein de l'échantillon
- assemblage des pièces mécaniques
- saturation et consolidation de l'échantillon
- début de l'essai et cisaillement de l'échantillon

La durée de préparation d'un essai est de l'ordre de quatre heures (lorsque aucun incident n'apparaît) et un essai peut durer dix heures (pour de grands déplacements d'interface). Pour démonter l'échantillon et nettoyer l'appareil, deux heures sont nécessaires. Il faut donc compter deux journées pour la réalisation d'un essai complet.

II.3.1. Fabrication de l'échantillon

A partir de l'axe cranté débouchant au milieu de l'embase inférieure, nous venons fixer le clou (lisse ou rugueux) au moyen d'un système de fixation à ressorts qui assure une compression suffisante du joint entre les plaques de verre et le clou (figure II-18, a).

La membrane, en néoprène de 2 mm d'épaisseur, est alors déposée autour de la couronne maintenant les plaques de verre et appliquée hermétiquement au moyen de deux joints toriques qui viennent se loger dans deux gorges de la couronne et d'une courroie en latex (figure II-18, b). Cette membrane a dû être préformée aux dimensions finales de l'échantillon (diamètre 400 mm et hauteur 100 mm) et au diamètre des embases supérieures

et inférieures (Φ 455) car elle présente des variations de diamètre de 55 mm auxquelles une membrane "standard" tubulaire ne pouvait pas s'adapter.

Un moule en deux parties (figure II-18, c) permet la fabrication de l'échantillon en maintenant la membrane externe. Ce moule possède trois ergots pour le centrage sur la couronne. Sa réalisation en deux parties permettra le démoulage de l'échantillon. Un réseau de matériau poreux et de tubes reliés à une pompe à vide permet d'appliquer une dépression entre le moule et la membrane qui se colle parfaitement contre le moule (figure II-18, d).

Deux types d'échantillons ont été réalisés dans cette étude: des échantillons de matériau dense et des échantillons de matériau lâche. Nous avons cependant conçu un dispositif qui nous permettra de balayer toute la plage des densités pour l'échantillon.

II.3.1.1 Préparation des échantillons de sable lâche

Nous déposons le sable au moyen d'un entonnoir qui assure une hauteur de chute quasi nulle (figure II-18, e). L'épaisseur de 100 mm de l'échantillon nous dégage suffisamment de place pour réaliser cette opération délicate dans de bonne condition. L'échantillon est ensuite arasé au moyen d'une règle coulissant sur le bord supérieur du moule (figure II-18, f). Il est certain que l'échantillon obtenu ne sera pas parfaitement homogène.

II.3.1.2 Préparation des échantillons de sable dense

Le sable est déposé couche par couche et vibrer superficiellement à chaque couche à l'aide d'un marteau léger de démolition. Une fois la hauteur finale atteinte, nous procédons à un vibrage global de l'échantillon en positionnant le vibreur sur différents endroits du moule. Comme pour la technique précédente, l'homogénéité de l'échantillon n'est pas assurée même si un vibrage global de l'échantillon la favorise.



Figure II-18. *Préparation d'un essai de cisaillement : fabrication de l'échantillon de matériau*

II.3.1.3 Préparation d'échantillon à densité intermédiaire

Pour réaliser la fabrication d'un échantillon d'une densité désirée, nous avons conçu un dispositif de pluviation. Ce système doit nous permettre d'obtenir des échantillons homogènes, reproductibles et d'une densité déterminée.

De nombreuses études ont été effectuées dans ce domaine depuis les travaux de Kolbuszewski (1948) qui a développé les premiers systèmes de pluviation dans l'eau et dans l'air. Jacobsen (1976) a proposé un système original dans lequel la chute du sable est cassée par un diffuseur (assemblage de tamis) qui répartit le sable en une pluie uniforme. Cette technique a largement été reprise, essentiellement pour constituer des massifs de sable de grandes dimensions nécessaires pour des chambres d'étalonnage (Rad et Tumay, 1987; Sweeney et Clough, 1990). A la lumière de ces études, Dupla (1995) a conçu un système de pluviation à hauteur de chute constante avec double diffuseur pour la fabrication d'un massif homogène de sable RF. La figure II-19 présente le pluviateur et l'influence de la hauteur de pluviation pour un débit donné et l'influence du débit pour une hauteur de chute donnée sur l'indice de densité de massif de sable. Ces résultats montrent la prédominance du débit par rapport à la hauteur de chute sur l'indice de densité obtenu. Pour une hauteur de chute donnée, l'indice de densité obtenu peut varier dans une plage de 60% (de 0,4 à 1) en fonction du débit, alors que pour un débit donné, il ne pourra varier que dans une plage de 20%.

Levacher et al. (1994) proposent différents appareils à hauteur de chute variable ou constante pour la réalisation d'échantillons de petite taille (pour des essais triaxiaux de révolution ou des essais à la boîte de cisaillement direct). Ils présentent en particulier un asservissement par ressort pour réaliser une hauteur de chute constante. Le principe de l'appareil consiste à suspendre le réservoir à un ressort dont la raideur est convenablement choisie en fonction du poids volumique moyen du matériau et de la section du réservoir (figure II-20).

Dans notre application, l'échantillon de sol annulaire se situe entre les "petits" échantillons (échantillons pour essais triaxiaux) et les "gros" échantillons (massifs de sable pour chambre d'étalonnage). Nous avons donc étudié, en collaboration avec le Service Etude

et Conception de Prototypes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, un dispositif couplant les techniques des deux types de pluviateurs présentés précédemment.

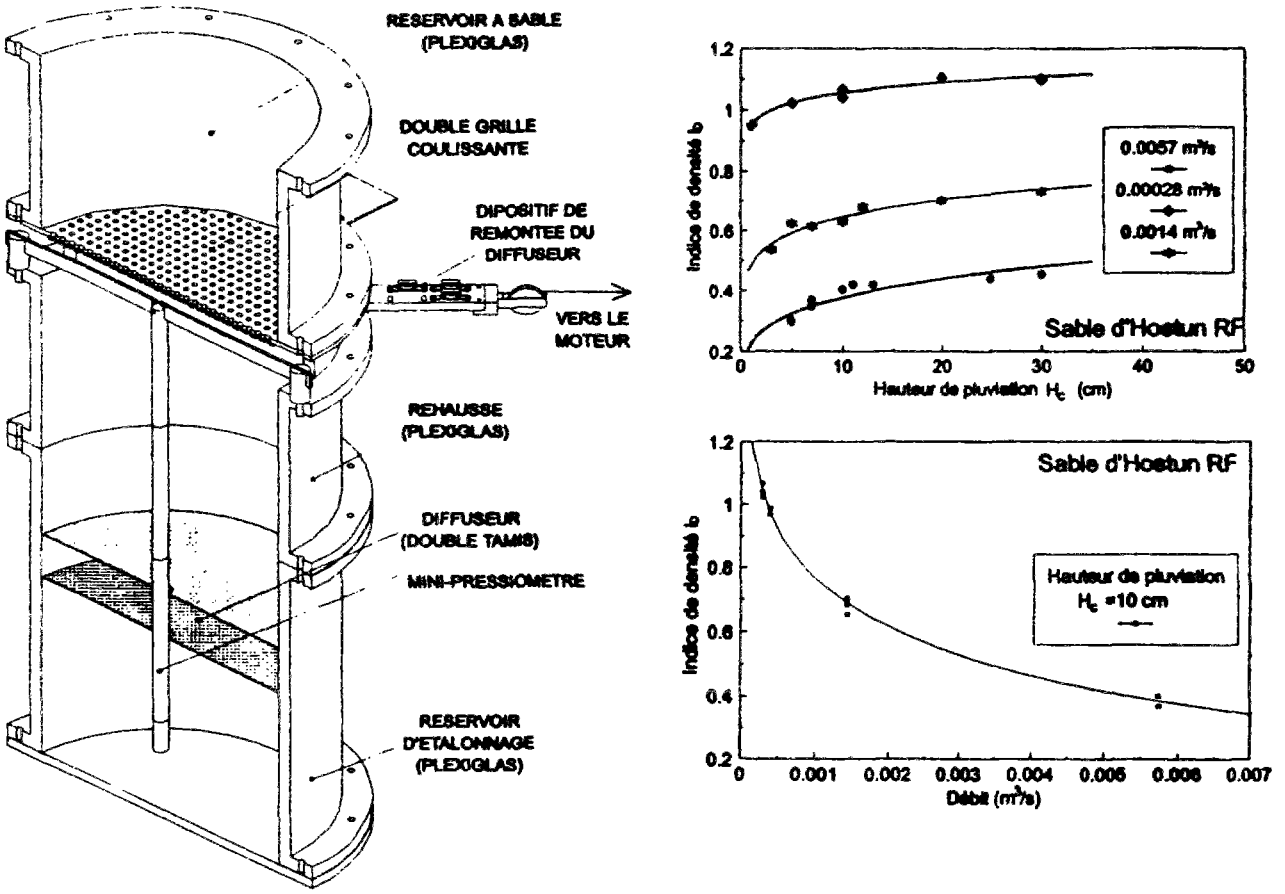


Figure II-19. *(a)Vue du pluviateur et (b) influence de la chute et du débit sur l'indice de densité d'un massif de sable d'Hostun RF (d'après Dupla, 1995)*

Le pluviateur pour la fabrication des échantillons de l'appareil de cisaillement simple annulaire, comme présenté sur la figure II-21, se décompose en deux parties. Un système support vient se poser sur le plateau de l'appareil de cisaillement simple annulaire. Un système de goupilles et de cales permet de régler la hauteur relative de sa partie supérieure. Sur cette partie supérieure vient se suspendre un réservoir à matériau. Ce réservoir est suspendu au support par un ensemble de douze ressorts. Sous le réservoir se trouve un

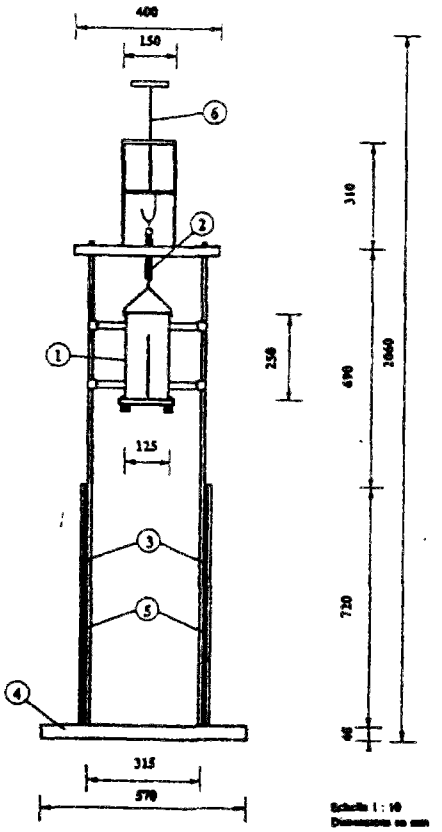


Figure II-20. *Pluviateur à ressort PSA 4 (d'après Levacher et al., 1994)*

dispositif de deux tamis destiné à casser la chute du sable et à en assurer une pluie homogène. Un système d'ouverture - fermeture permet de commencer la pluviation. Le diamètre de chaque tamis sera choisi en fonction du type de matériau utilisé. De même, la constante de raideur des six ressorts va dépendre de la masse volumique du matériau considéré. Prenons pour exemple la fabrication d'un échantillon de sable d'Hostun RF lâche, correspondant à un indice des vides de 1. Le volume global de l'échantillon étant 9 425 cm^3, la masse de sable correspondante est 12,49 kg. Ceci impose à l'ensemble de ressorts une constante de raideur de 1,25 N/mm, avec une course supérieure à 100 mm. Avec cet ensemble, nous pourrons donc réaliser un échantillon de sable lâche parfaitement homogène.

En cas de légers problèmes lors de la pluviation, en particulier liés aux éventuels frottements entre l'ensemble mobile et les barres de guidage, nous avons prévu de positionner un petit volume d'eau au centre du réservoir de sable où il sera possible d'ajouter

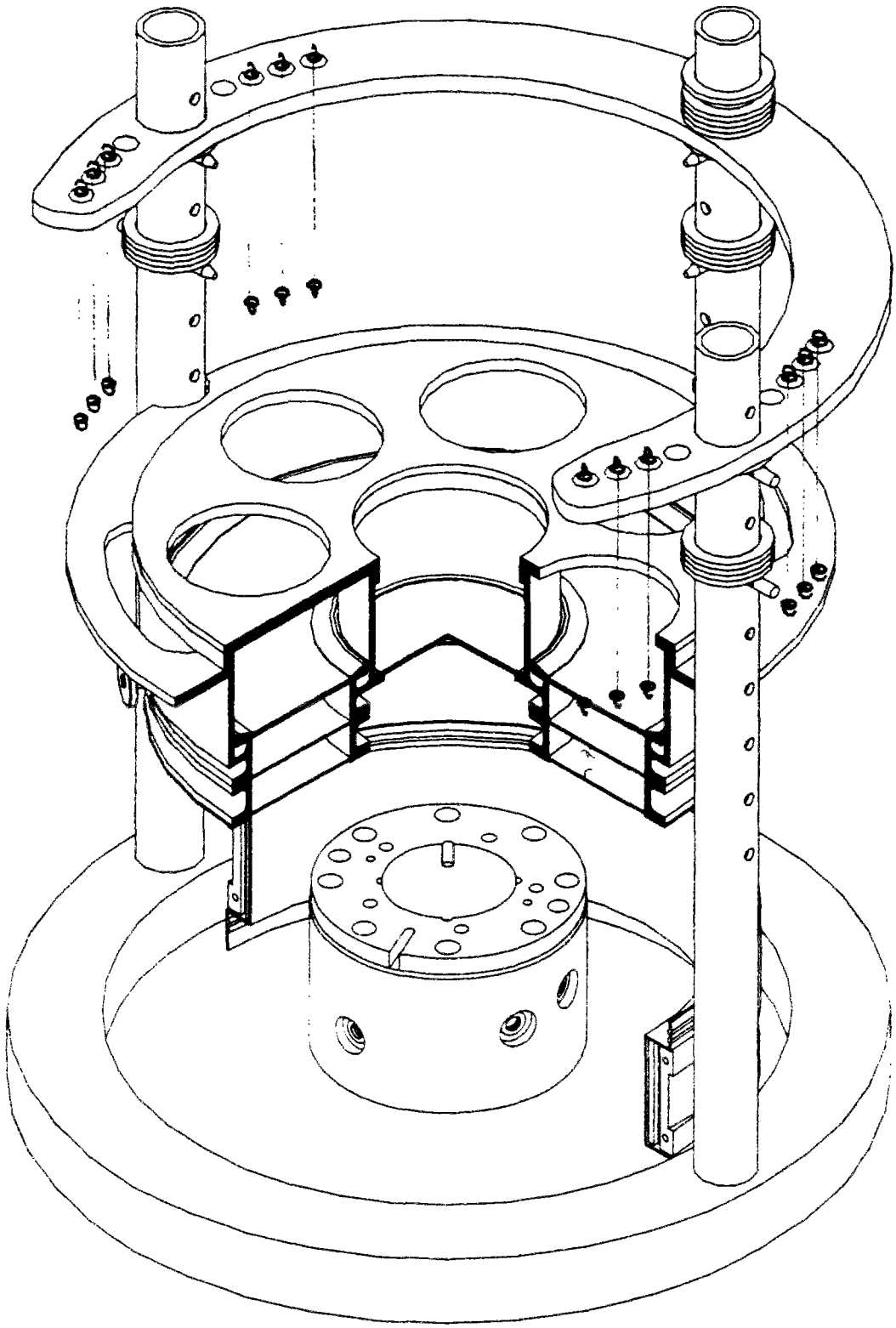


Figure II-21. *Conception d'un pluviateur pour l'appareil de cisaillement simple annulaire*

ou d'enlever de l'eau si la vitesse de remontée du système mobile n'assure pas une hauteur de chute constante (contrôlée par un réglet solidaire du système).

Une fois le matériau constituant l'échantillon déposé et arasé, la masse totale de l'échantillon est alors déterminée. Nous descendons alors verticalement le pavé supérieur (figure II-22, a). La membrane en néoprène est alors rabattue et maintenue hermétiquement au moyen de deux joints toriques qui viennent se loger dans deux gorges aménagées sur le pavé supérieur et d'une courroie en latex.

II.3.2. Application du vide au sein de l'échantillon

Par l'intermédiaire de trois pierres poreuses situées dans la couronne inférieure, la mise sous vide de l'échantillon est alors possible. Ces pierres poreuses sont reliées par des tubulures à une pompe à vide, qui permet d'obtenir des dépressions jusqu'à 100 kPa. Cette étape est importante car elle permet de vérifier la parfaite étanchéité de l'échantillon.

Nous pouvons alors procéder au démoulage de l'échantillon. L'application du vide à l'échantillon ne permet pas de retirer directement le moule en deux parties qui est bloqué entre le pavé supérieur et la couronne inférieure (le vide exerce une force de l'ordre de 10 kN sur le moule). Nous devons donc relever le pavé supérieur de quelques dixièmes de millimètres par l'intermédiaire du palan reposant sur deux tiges pour pouvoir retirer les deux demi-parties du moule.

Les dimensions de l'échantillon sont relevées : la hauteur est déterminée en quatre points à 120° et le diamètre mesuré en haut, au centre et à la base de l'échantillon (figure II-22, b). Ces informations sont alors consignées sur une feuille d'essai (sous Excel) où l'indice de densité est alors déterminé.

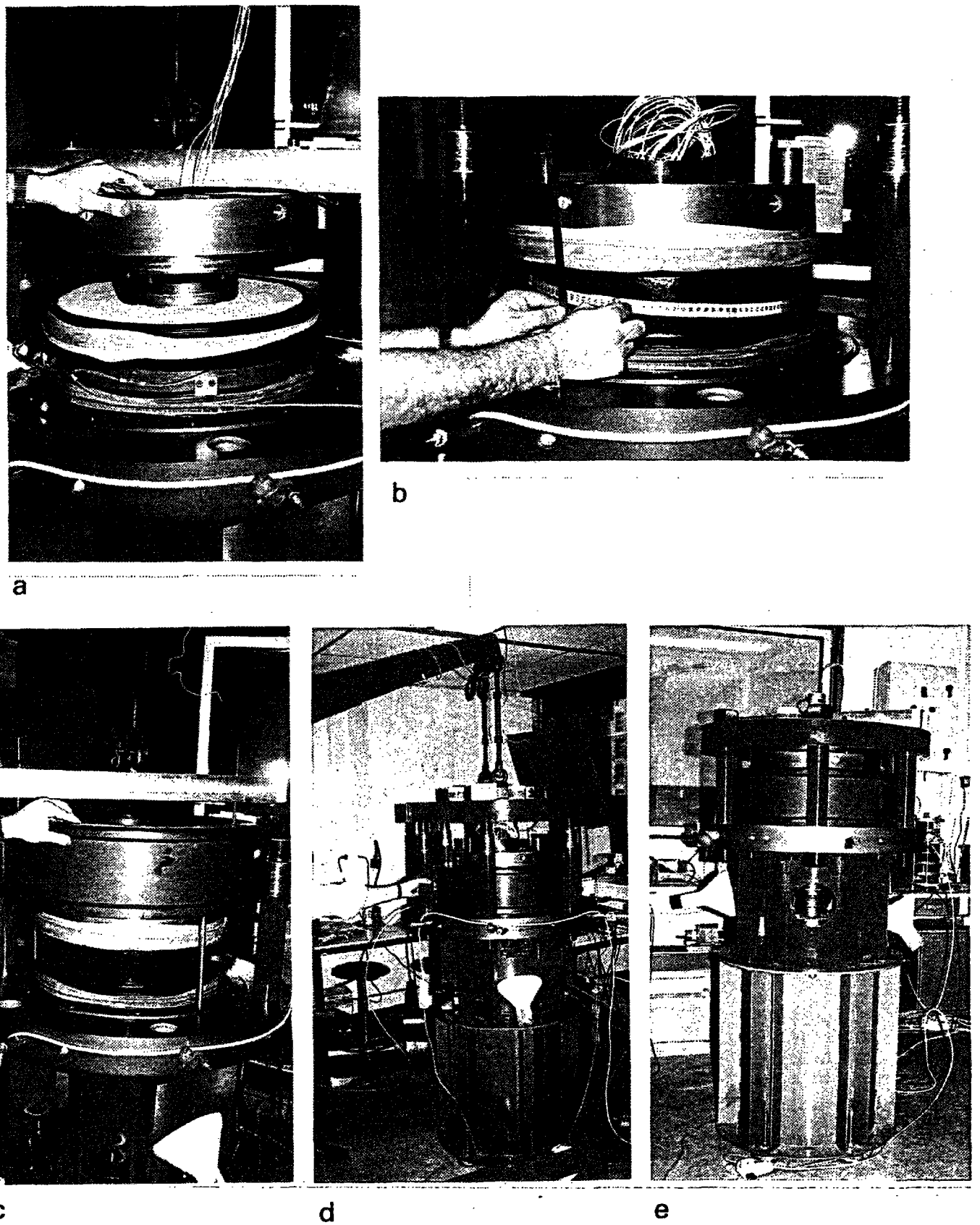


Figure II-22. *Préparation d'un essai de cisaillement : confinement de l'échantillon*

II.3.3. Assemblage des pièces mécaniques

Autour de l'échantillon soumis au vide, nous descendons l'enceinte cylindrique externe qui se centre hermétiquement autour du pavé supérieur. Nous la vissons ensuite sur l'embase inférieure (figure II-22, c). Nous disposons alors les six colonnes sur lesquelles vient se poser l'embase supérieure qui recouvre le pavé supérieur (figure II-22, d). Cette opération est délicate car, à la moindre déviation de l'embase lors de sa descente, elle se bloque et il est alors très difficile, étant donnée sa masse, de la décoller. Un palan spécialement conçu pour cette opération facilite cette tâche.

Douze écrous vissés aux deux extrémités de chaque colonne permettent de solidariser l'embase supérieure à l'embase inférieure. Trois vis traversant l'embase supérieure sont mises en contact avec le pavé supérieur pour lui interdire tout déplacement vertical ascendant par la suite.

Nous fixons alors une tige axialement au clou et solidarisons le codeur incrémental optoélectronique à cette tige (figure II-22, e).

A ce moment, nous pouvons réaliser les connexions des différents capteurs à leur module d'alimentation / conditionnement et lancer l'acquisition uniquement pour une visualisation des différentes valeurs des capteurs.

II.3.4. Saturation et consolidation de l'échantillon

Les essais présentés dans cette étude ont tous été réalisés sur des échantillons de matériau sec, consolidés sous des conditions type "K0". Cependant, une consolidation de type isotrope est possible et des essais sur échantillons saturés également.

Selon la même procédure que pour un essai triaxial, nous allons procéder au confinement de l'échantillon. Il faut veiller à ne pas surconsolider l'échantillon, c'est-à-dire à ne pas lui appliquer une pression radiale majorée de la pression négative au sein de l'échantillon supérieure à la pression de confinement radiale finale que nous voulons.

Dans un premier temps, nous remplissons d'eau le volume entre l'échantillon et l'enceinte externe. La forme particulière de l'enceinte permet de ne pas emprisonner de bulles d'air. Nous connectons alors le contrôleur pression - volume GDS après nous être assurés que tous les conduits sont parfaitement saturés. Nous branchons également en série avec le GDS une cellule air - eau reliée au réseau d'air comprimé qui nous permettra d'appliquer rapidement des pressions radiales élevées (jusqu'à 800 kPa) à l'échantillon, le faible débit du GDS et son faible volume d'eau disponible ne rendant pas cette opération toujours réalisable.

Deux types de consolidation de l'échantillon sont possibles :

- une consolidation de type "K_0" où l'on applique une pression radiale à l'échantillon en empêchant toute déformation verticale,

- une consolidation "isotrope" où l'on applique une pression verticale à l'échantillon égale à la pression radiale.

La consolidation de type "K_0" se réalise assez simplement. Par l'intermédiaire de la cellule air-eau, nous appliquons progressivement une pression de 100 kPa tout en diminuant le vide au sein de l'échantillon, en s'assurant que la différence de pression entre l'échantillon et l'eau extérieure ne soit jamais supérieure à 100 kPa (éventuelle surconsolidation pour un essai à pression de confinement de 100 kPa) et jamais inférieure à 30 kPa (éventuel effondrement de l'échantillon, bien que le pavé supérieur n'applique qu'une pression de 3 kPa au sommet de l'échantillon). Il est possible de réaliser des essais avec une pression radiale initiale inférieure à 100 kPa. Il faut s'assurer que la différence de pression entre l'échantillon et l'eau extérieure soit inférieure à cette valeur.

Une fois la pression radiale égale à 100 kPa (ou à la pression radiale initiale si elle est inférieure à 100 kPa), il est possible de procéder à la saturation de l'échantillon. Comme pour un essai triaxial, nous faisons d'abord circuler du dioxyde de carbone (plus soluble dans l'eau que l'air) sous faible pression (15 kPa) entre les trois pierres poreuses inférieures et les trois supérieures, décalées de 30° pour que la diffusion soit la plus homogène possible. Les

dimensions de l'échantillon étant importantes, cette saturation doit durer 30 minutes. Ensuite, nous faisons circuler, par percolation gravitaire, de l'eau préalablement désaérée pendant également 30 minutes. L'échantillon est alors relié à une seconde cellule air-eau par l'intermédiaire de laquelle nous allons lui appliquer une contre-pression. Nous commençons par lui appliquer une contre pression de 100 kPa en augmentant, de la même valeur et par palier, la valeur de la pression radiale. Il est alors possible de vérifier la parfaite saturation de l'échantillon en fermant l'orifice de drainage et en augmentant la valeur de la pression radiale. Nous obtenons alors un coefficient de saturation (coefficient B de Skempton). Si celui-ci est trop faible, on peut améliorer la saturation en augmentant la valeur de la contre-pression.

Nous pouvons alors appliquer la pression de consolidation finale à l'échantillon (jusqu'à 1000 kPa pour un essai à pression radiale constante), si elle est supérieure à 100 kPa.

Pour la consolidation isotrope, la procédure est plus compliquée. Parallèlement à l'application de la contrainte radiale, nous allons appliquer une contrainte verticale sur l'échantillon par l'intermédiaire des trois vérins fixés sur l'embase supérieure. Avec trois pompes manuelles contrôlant la pression de fluide dans les vérins, nous allons pouvoir appliquer sur le pavé supérieur une force en trois points. Nous devons avoir recours aux deux capteurs de contrainte totale plans placés à la base du pavé supérieur pour mesurer la contrainte verticale appliquée à l'échantillon. Comme précédemment, il faut progressivement retirer le vide de l'échantillon tout en augmentant en même temps la pression radiale et la pression verticale jusqu'à 100 kPa. La saturation et l'application d'une contre-pression sont alors possibles selon la même procédure et l'on peut appliquer la contrainte de confinement finale.

II.3.5. Début de l'essai et cisaillement de l'échantillon

Une fois l'échantillon confiné, nous commençons par isoler le système de la cellule air-eau, seul le contrôleur GDS restant pour appliquer la pression radiale. De même, pour un échantillon saturé, seul un contrôleur GDS applique la contre-pression. Nous devons

attendre une dizaine de minutes pour vérifier que l'échantillon et l'enceinte sont parfaitement étanches. L'essai peut commencer.

Plusieurs types d'essais sont possibles. Comme nous venons de le voir, le cylindre d'interface peut être lisse ou rugueux, l'échantillon peut avoir une densité variant de l'état lâche à l'état dense, il peut être saturé ou non, la consolidation peut être de type "K_0" ou isotrope et la pression radiale initiale peut varier entre 100 et 1000 kPa (des essais avec une pression radiale initiale de 50 kPa sont réalisables, en prenant des dispositions particulières rappelées précédemment).

Dans le cas d'un échantillon saturé, l'essai peut être drainé ou non drainé, le GDS lisant dans le premier cas la variation de volume de l'échantillon et dans le second cas la variation de la contre-pression, correspondant à la variation de la surpression interstitielle.

Il est possible d'imposer deux types de condition lors de l'essai: soit des essais à pression radiale constante, soit des essais à volume constant. Ces conditions sont facilement appliquées par le contrôleur pression volume GDS. Dans le cas des essais à pression radiale constante, nous pouvons appliquer des pressions jusqu'à 1000 kPa. Dans le cas des essais à volume constant, comme nous le verrons dans l'interprétation des essais réalisés, il faudra être très prudent dans le choix de la pression radiale initiale selon le type d'interface et le type de matériau, de fortes surpressions pouvant être générées et pouvant dépasser les capacités de l'appareil (des alarmes visuelles ont été programmées dans le système d'acquisition).

Des essais à pression normale d'interface constante sont possibles. Lorsque l'on impose une pression normale constante à l'extérieur de l'échantillon, la pression au sein de l'interface ne reste pas forcément constante. Lors de l'utilisation des capteurs de contrainte totale cylindriques, il serait possible d'asservir la contrainte radiale extérieure pour que la mesure moyenne sur les capteurs locaux soit constante. Ce serait alors des essais à contrainte normale constante "vrais", les mesures de la contrainte normale à l'interface se faisant généralement dans tous les appareils à une épaisseur d'échantillon de l'interface.

Des essais à rigidité normale imposée sont plus difficilement réalisables. En considérant que la variation globale du volume de l'échantillon provient uniquement de la variation de volume de la couche d'interface, il serait possible de faire des essais de type :

$$\Delta\sigma_n / (\Delta V/V) = cte$$

(on retrouve une expression comparable à la définition du module pressiométrique). Il suffit pour cela d'asservir la pression du GDS en fonction de la variation de volume lue.

Pour chaque essai, les différents paramètres sont consignés sur une feuille d'essai. Une fois la consigne imposée au contrôleur GDS, nous pouvons lancer l'acquisition des données (les valeurs de différentes voies de mesure sont lues et enregistrées dans un fichier à intervalle de temps fixé) et démarrer le moteur pour commencer le cisaillement. Au moyen d'un potentiomètre, nous choisissons une vitesse tangentielle de cisaillement variant entre 0 et 6 mm / min.

III. ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE MONOTONES

III. ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE MONOTONES 122

III.1. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES 123

III.1.1. Le sable d'Hostun RF *123*

III.1.2. Le gravier d'Hostun 14~10 ..... *126*

III.2. PROGRAMME D'ESSAIS 129

III.2.1. Essais sur le sable d'Hostun RF *130*

III.2.2. Essais sur le gravier d'Hostun 14~10 ..... *130*

III.3. PRESENTATION DES RESULTATS 131

III.3.1. Essais sur le sable d'Hostun RF *133*

III.3.1.1 Essai à volume constant 133

III.3.1.2 Essai à pression radiale constante 135

III.3.2. Essais sur le gravier d'Hostun 14~10 ..... *139*

III.3.2.1 Essai à volume constant 139

III.3.2.2 Essai à pression radiale constante 140

III.3.3. Reproductibilité des essais et erreurs *141*

III.4. SYNTHESE DES RESULTATS ET ANALYSE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES 148

III.4.1. Résultats obtenus avec le sable d'Hostun RF *148*

III.4.1.1 Influence de la pression radiale initiale 148

III.4.1.2 Influence des conditions aux limites 166

III.4.1.3 Influence de l'état de compacité de l'échantillon 168

III.4.1.4 Influence de la rugosité de l'interface 173

III.4.2. Résultats obtenus avec le gravier d'Hostun 14~10 ..... *177*

III.4.2.1 Influence de la pression radiale initiale 178

III.4.2.2 Influence des conditions aux limites 188

III.4.2.3 Influence de l'état de compacité de l'échantillon 188

III.4.2.4 Influence de la rugosité de l'interface 193

III.4.3. Influence de la granulométrie *197*

III.5. CONCLUSION 201

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord présenter les propriétés des deux matériaux d'Hostun utilisés : le sable RF et le gravier 14~10. Ensuite, les essais réalisés sont décrits, ainsi que des résultats typiques sur le sable RF et sur le gravier 14~10. Puis une synthèse des résultats permet d'analyser l'influence de différents paramètres que nous avons fait varier d'un essai sur l'autre.

III.1. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES

Les deux matériaux utilisés proviennent de la carrière d'Hostun, située dans la Drôme, sur le flanc ouest du Vercors. Ces sables sont qualifiés d'extra-siliceux (taux de SiO_2 supérieur à 99 %). La carrière SIKA propose une gamme de matériaux allant du sable 70~270 (diamètre compris entre 0,05 et 0,25 mm, D_{50} = 0,11 mm) au sable 14~10 (diamètre compris entre 2 et 4 mm, D_{50} = 3,3 mm). Nous présentons les deux matériaux que nous avons utilisés : le sable RF et le gravier 14~10.

III.1.1. Le sable d'Hostun RF

Le sable d'Hostun RF est un sable de référence. Sélectionné à l'origine par le laboratoire 3S / IMG (Flavigny et *al.*, 1990), il a été utilisé et étudié en France, notamment dans le cadre du Gréco-Géomatériaux puis dans le réseau de laboratoires GEO. Au niveau européen, il était également le sable de référence de l'Euro-Gréco puis du réseau de laboratoire Alert. Ses caractéristiques (courbe granulométrique, propriétés physico-chimiques , etc.) sont données par les usines SIKA et présentées sur la figure III-1.

Sa couleur varie du gris-blanc au beige-rosé. Sur les photographies que nous avons réalisées au microscope, nous observons la forte angularité de ce sable (figure III-2). Flavigny et *al.* (90) présentent une synthèse des nombreuses études déterminant les paramètres caractéristiques ρ_s, e_{min}, e_{max}. Une dispersion apparaît selon les auteurs, liée aux difficultés de la procédure de détermination de ces paramètres.

Les caractéristiques que nous avons obtenues et retenues dans notre étude, sont en accord avec les résultats obtenus par d'autres auteurs (Flavigny et *al.*, 1990; Dupla, 1995) et présentées dans le tableau III-1.

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES

Masse volumique réelle (g/cm³)	2,65
Masse volumique apparente sans tassement (g/cm³)	1,30
après tassement (g/cm³)	1,50
Surface spécifique (m²/g)	
Absorption d'huile de lin (cm³/100 g)	
Reprise d'eau à 65 % d'humidité relative	0,03
Résistance pyroscopique (°C)	
Point de fusion (°C)	1.750
pH	7,50
Couleur	Gris blanc à beige rosé

ANALYSES CHIMIQUES

Perte au feu	0,05
Silice totale (SiO_2)	99,12
Alumine (Al_2O_3)	0,25
Oxyde de titane (TiO_2)	0,01
Oxyde de fer (Fe_2O_3)	0,17
Chaux (CaO)	0,14
Magnésie (MgO)	0,14
Potasse (K_2O)	0,02
Soude (Na_2O)	0,05

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

TAMIS N° (AFNOR)	MAILLES OUVERTURE m/m	REFUS %	PASSANT %
37	4,000		
36	3,150		
35	2,500		
34	2,000		
33	1,600		
32	1,250		
31	1,000		
30	0,800		
29	0,630		
28	0,500	1,80	98,20
27	0,400	15,50	82,70
26	0,315	38,70	44,00
25	0,250	29,30	14,70
24	0,200	12,80	1,90
23	0,160	1,90	
22	0,125		
21	0,100		
20	0,080		
19	0,063		
18	0,050		
17	0,040		
Fond			
INDICE DE FINESSE AFA 42			

Moyennes statistiques données à titre indicatif

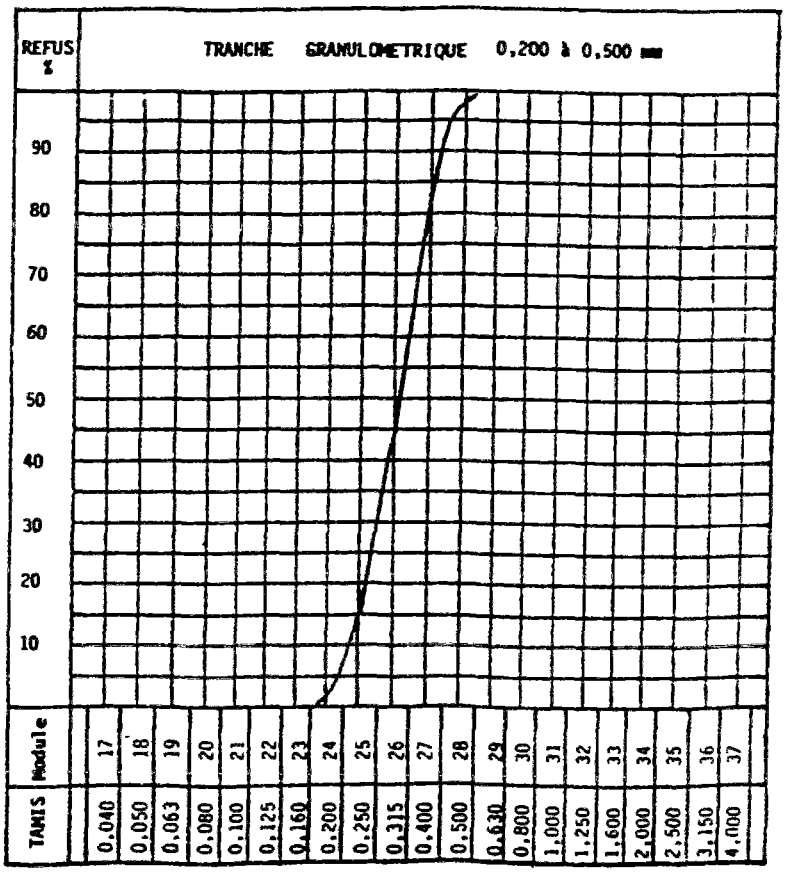


Figure III-1. *Propriétés du sable d'Hostun RF (Sika, note interne)*



Figure III-2. *Vue en microscopie de grains de sable d'Hostun RF*

Des essais réalisés à l'appareil triaxial de révolution (diamètre 70 mm, élancement 2, essais drainés) par Dupla (1995) donnent un angle de frottement interne à la rupture variant presque linéairement en fonction de l'indice de densité de 33° pour un indice de 0,4 à 40° pour un indice de 0,9 (figure III-3 ; cette figure présente également l'évolution de l'angle caractéristique, valeur qui ne nous intéresse pas directement dans notre étude). Nous avons obtenu des résultats analogues à partir d'essais de cisaillement direct avec une boîte de Casagrande mais les valeurs d'angle de frottement à la rupture étaient supérieures de trois à quatre degrés pour des essais réalisés sur des échantillons anti-frettés de diamètre 100 mm et d'élancement 1.

Tableau III-1. *Caractéristiques du sable d'Hostun RF*

e_{min}	e_{max}	ρ_s (t/m^3)	$\rho_{d\ min.}$ (t/m^3)	$\rho_{d\ max.}$ (t/m^3)	D_{50} (mm)	Cu	Cc
0.624	0.961	2,65	1,32	1,60	0,32	1,6	0,85

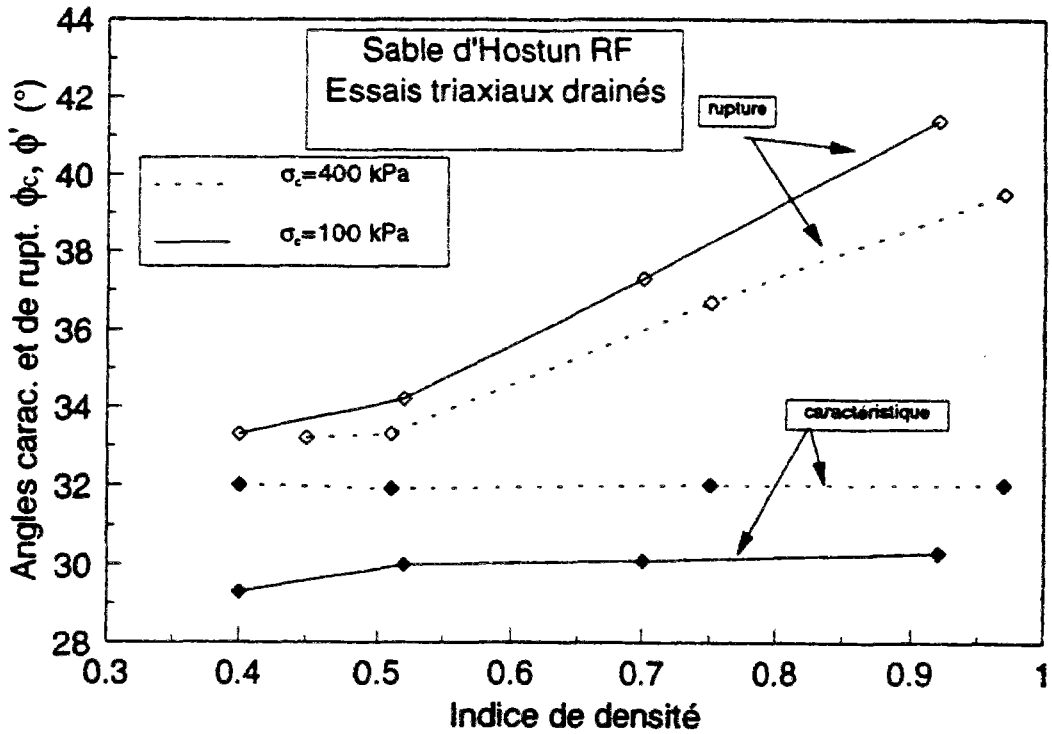


Figure III-3. *Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de l'indice de densité (d'après Dupla, 1995)*

III.1.2. Le gravier d'Hostun 14~10

Le second matériau, utilisé dans notre étude, est un sable grossier d'Hostun, appelé 14~10. Bien qu'étant défini comme un sable par le fournisseur et étant classé comme grave propre mal graduée avec la classification USCS/LCPC des sols, nous l'appellerons, dans la suite de notre étude, gravier 14~10 pour éviter toute confusion avec le sable RF. Ce gravier a également été utilisé par Hassan (1995), pour des essais à la boîte de cisaillement direct modifiée, car il comporte des grains ayant une face d'une longueur de 4 mm sur laquelle il est possible de venir tracer un segment, que l'on pourra visualiser. Comme pour le sable RF, la figure III-4 présente les propriétés du gravier 14~10. Tous les grains ont un diamètre compris entre 2 et 4 mm.

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES

Masse volumique réelle (g/cm³)	2,65
Masse volumique apparente sans tassement (g/cm³)	1,50
après tassement (g/cm³)	1,55
Surface spécifique (m²/g)	
Absorption d'huile de lin (cm³/100 g)	
Reprise d'eau à 65 % d'humidité relative	0,02
Résistance pyroscopique (°C)	
Point de fusion (°C)	1.750
pH	7,50
Couleur	Beige Rosé

ANALYSES CHIMIQUES

Perte au feu	0,13
Silice totale (SiO_2)	99,03
Alumine (Al_2O_3)	0,32
Oxyde de titane (TiO_2)	0,06
Oxyde de fer (Fe_2O_3)	0,13
Chaux (CaO)	0,18
Magnésie (MgO)	0,08
Potasse (K_2O)	0,02
Soude (Na_2O)	0,05

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

TAMIS N° (AFNOR)	MAILLES OUVERTURE m/m	REFUS %	PASSANT %
37	4.000	7,60	92,40
36	3.150	53,10	39,30
35	2.500	33,60	5,70
34	2.000	3,90	1,80
33	1.600	1,00	0,80
32	1.250	0,60	0,20
31	1.000	0,20	
30	0,800		
29	0,630		
28	0.500		
27	0,400		
26	0.315		
25	0,250		
24	0.200		
23	0,160		
22	0,125		
21	0,100		
20	0,080		
19	0,063		
18	0,050		
17	0,040		
Fond			

INDICE DE FINESSE AFA 5

Moyennes statistiques données à titre indicatif

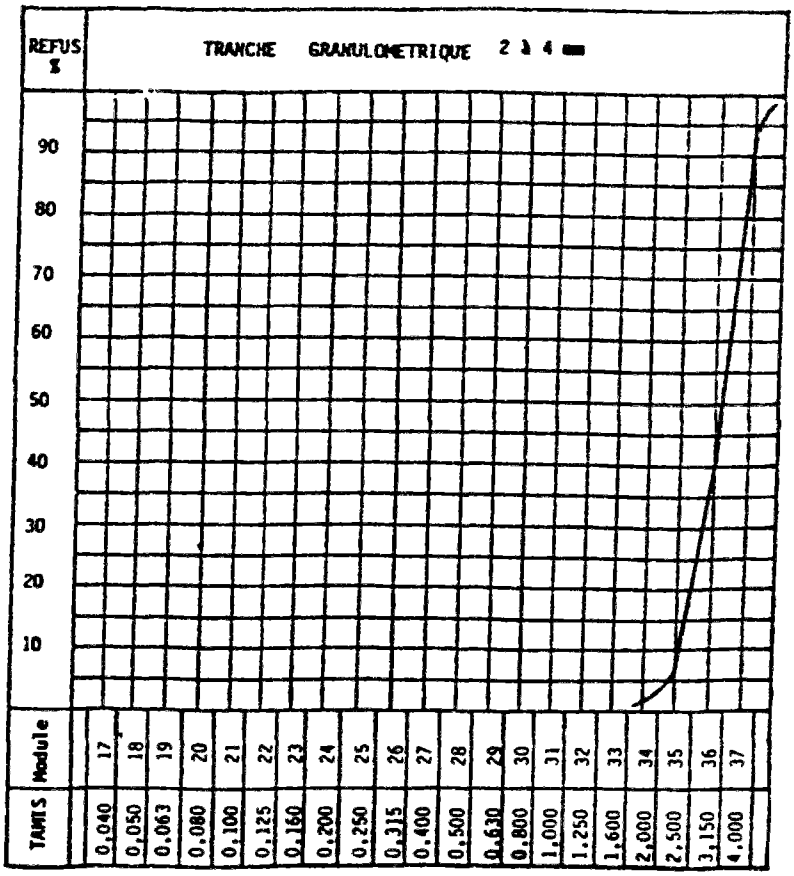


Figure III-4. *Propriétés du gravier d'Hostun 14~10 (Sika, note interne)*

Les caractéristiques, que nous avons obtenues, sont présentées dans le tableau III-2.

Tableau III-2. *Caractéristiques du gravier d'Hostun 14-10*

e_{min}	e_{max}	ρ_s (t/m^3)	$\rho_{d\ min.}$ (t/m^3)	$\rho_{d\ max.}$ (t/m^3)	D_{50} (mm)	Cu	Cc
0,45	0,81	2,65	1,46	1,83	3.3	1.4	1,1

Comme pour le sable RF, nous avons observé le gravier 14-10 au microscope (figure III-5). Les photographies obtenues ne sont pas très nettes car, pour de forts grossissements, seule une coupe de l'objet peut être correctement focalisée. Cette observation nous a cependant permis de noter de fortes disparités angulaires entre les grains (alors que les grains de sable RF sont plus similaires). Certains grains apparaissent comme des conglomérats de particules et présentent de très fortes angularités.

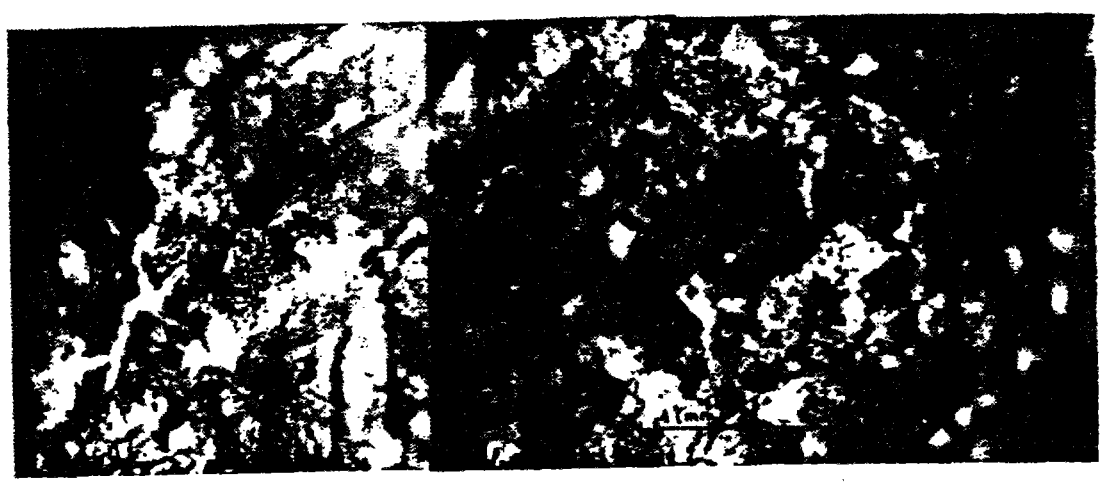


Figure III-5. *Vue en microscopie de grains du gravier d'Hostun 14-10*

Les angles de frottement obtenus, aussi bien à l'appareil triaxial qu'à la boîte de cisaillement direct, sont de 5° à 6° plus élevés que ceux obtenus pour le sable RF.

III.2. PROGRAMME D'ESSAIS

Comme indiqué précédemment, les essais que nous avons réalisés sur le sable RF et sur le gravier 14~10 ont les caractéristiques suivantes :

- échantillons initialement denses ou lâches (pas de densité intermédiaire)
- consolidation de type "K_0" (pas de consolidation isotrope)
- cylindres d'interface lisses ou rugueux
- essai à pression radiale constante ou à volume constant (pas de chemin intermédiaire)
- pression initiale de consolidation de 50, 100, 200, 400 ou 600 kPa.

Les premiers essais que nous avons effectués, des essais de qualification, nous ont permis de mettre au point la procédure expérimentale, de tester et de solliciter l'appareillage, en particulier les différentes voies de mesure, et de faire un certain nombre d'erreurs de manipulation qu'il fallait faire une fois pour ne plus les reproduire. Les essais que nous présentons correspondent à 25 conditions différentes, obtenues en faisant varier différents paramètres.

Comme le montrent les tableaux III-3 et III-4, nous avons étudié plus en détail, pour le sable, les essais avec un cylindre d'interface lisse et un échantillon dense et, pour le gravier, les essais avec une interface rugueuse et un échantillon dense.

Cependant, tous les essais à 200 kPa de pression initiale ont été réalisés à volume constant (cette condition est plus représentative des phénomènes *in situ* que l'essai à pression radiale constante, comme nous l'avons vu dans la partie bibliographique) en faisant varier les différents paramètres (rugosité, densité, D_{50}, conditions initiales et pression radiale initiale de confinement). Ceci va nous permettre d'analyser leur influence sur le développement du frottement lors du cisaillement. Certains essais ont été effectués plusieurs fois pour étudier la reproductivité des essais.

III.2.1. Essais sur le sable d'Hostun RF

Les essais sur le sable d'Hostun RF ont été réalisés avec onze conditions initiales différentes :

- avec une interface lisse, des essais à pression radiale constante et à volume constant sur échantillons denses ont été réalisés à quatre pressions radiales initiales (50, 100, 200 et 400 kPa). Nous avons également effectué un essai sur sable lâche à volume constant.

- avec une interface rugueuse, nous avons fait deux essais à volume constant, à 200 kPa de pression radiale initiale, l'un sur échantillon dense et l'autre sur échantillon lâche.

Tableau III-3. *Programme d'essais sur le sable d'Hostun RF*

interface	compacité	condition	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa
lisse	lâche	pres. rad. const.				
		volume constant			**2107-35**	
	dense	pres. rad. const.	**1904-45**	**2407-36**	**2305-22**	**2405-23**
		volume constant	**1604-43**	**1205-18**	**1705-19**	**1905-20**
rugueuse	lâche	pres. rad. const.				
		volume constant			**2507-37**	
	dense	pres. rad. const.				
		volume constant			**2607-38**	

(les quatre premiers chiffres correspondent au jour et au mois de l'essai et les deux derniers à son numéro)

III.2.2. Essais sur le gravier d'Hostun 14~10

Les essais sur le gravier d'Hostun 14~10 ont été effectués avec quatorze conditions différentes :

- avec une interface rugueuse, des essais à pression radiale constante et à volume constant sur échantillons denses ont été réalisés à cinq pressions radiales initiales (50, 100, 200, 400 et 600 kPa). Nous avons également fait deux essais sur sable lâche, à 200 kPa de pression radiale initiale, l'un à pression radiale constante et l'autre à volume constant.

- avec une interface lisse, nous avons effectué deux essais à volume constant, à 200 kPa de pression radiale initiale, l'un sur échantillon dense et l'autre sur échantillon lâche.

Tableau III-4. *Programme d'essai sur le gravier d'Hostun 14~10*

interface	compacité	condition	50 kPa	100 kPa	200 kPa	400 kPa	600 kPa
lisse	lâche	pres. rad. const.					
		volume constant			**1707-32**		
	dense	pres. rad. const.					
		volume constant			**2007-34**		
rugueuse	lâche	pres. rad. const.			**1307-31**		
		volume constant			**1207-30**		
	dense	pres. rad. const.	**1504-42**	**2604-15**	**1904-11**	**2404-13**	**0405-17**
		volume constant	**0904-40**	**2804-16**	**3103-7**	**0404-8**	**1204-9**

(les quatre premiers chiffres correspondent au jour et au mois de l'essai et les deux derniers à son numéro)

III.3. PRESENTATION DES RESULTATS

Pour tous les essais réalisés, les lectures suivantes ont été enregistrées dans un fichier, au cours du cisaillement de l'échantillon :

- mesure du déplacement tangentiel w de l'interface (à partir du codeur incrémental)
- mesure de pression radiale σ_r (à partir d'un capteur de pression et du G.D.S.)
- mesure de la contrainte de cisaillement τ (à partir du couplemètre)

- mesure de la variation de volume de l'échantillon Δv (à partir du G.D.S.).

Pour les essais à pression radiale constante, nous représentons, pour chaque essai, les courbes :

$\tau = f(w)$ valeur de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel

$\mu^* = f(w)$ valeur du coefficient de frottement apparent en fonction du déplacement tangentiel ($\mu^* = \tau / \sigma_{ri}$, avec σ_{ri} : pression radiale initiale, constante pour ces essais)

$\Delta v = f(w)$ valeur de la variation de volume en fonction du déplacement tangentiel

$\tau = f(\sigma_r)$ chemin de contrainte dans le plan (contrainte normale - contrainte de cisaillement).

Pour les essais à volume constant, nous présentons, pour chaque essai, les courbes :

$\tau = f(w)$ valeur de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel

$\mu^* = f(w)$ valeur du coefficient de frottement apparent en fonction du déplacement tangentiel

$\mu = f(w)$ valeur du coefficient de frottement réel en fonction du déplacement tangentiel ($\mu = \tau / \sigma_r$)

$\sigma_r = f(w)$ valeur de la pression radiale en fonction du déplacement tangentiel

$\tau = f(\sigma_r)$ chemin de contrainte dans le plan (contrainte normale - contrainte de cisaillement).

Pour les essais avec une interface lisse sur du sable RF, l'utilisation des capteurs de contrainte totale nous permet d'obtenir, comme information supplémentaire, la valeur réelle de la contrainte normale à l'interface. Ceci nous permettra de comparer la différence entre la pression radiale à l'extérieur de l'échantillon et la valeur de la pression normale à l'interface. Les courbes supplémentaires suivantes sont obtenues :

capm = f (w) valeur moyenne de la contrainte normale mesurée par les capteurs en fonction du déplacement tangentiel

μ_c = f (w) valeur du coefficient de frottement réel à l'interface, déterminé à partir de la lecture de la contrainte normale à l'interface en fonction du déplacement tangentiel ($\mu_c = \tau$ / capm)

τ = f (capm) chemin de contrainte dans le plan (contrainte normale à l'interface - contrainte de cisaillement).

Pour chaque essai, les courbes seront représentées avec deux échelles :

- une échelle représentant le début de l'essai (jusqu'à 4 cm de déplacement tangentiel), permettant de visualiser les phénomènes caractéristiques se développant pour de faibles valeurs du déplacement, en particulier la phase de contractance ou de dilatance initiale,
- une seconde représentant l'ensemble de l'essai, pouvant aller jusqu'à 120 cm de déplacement tangentiel.

III.3.1. Essais sur le sable d'Hostun RF

Nous avons effectué onze essais, avec des conditions différentes, sur le sable d'Hostun RF. Nous présentons ici les résultats de trois d'entre eux, pour mettre en évidence les principaux phénomènes physiques rencontrés. Les autres résultats sont présentés en annexe A.

III.3.1.1 Essai à volume constant

La figure III-6 présente les résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire, à volume constant, avec une interface lisse sur un échantillon de sable dense (Id = 0,97). La contrainte de cisaillement atteint rapidement un pic très peu marqué (43 kPa), pour un déplacement

inférieur à 1 mm, puis décroît légèrement. Pour de plus grands déplacements, elle augmente de nouveau pour se stabiliser sur un palier (40 kPa).

La pression radiale initiale appliquée, sur la partie externe de l'échantillon, est de 200 kPa. Cette pression décroît régulièrement avec le déplacement tangentiel pour atteindre une valeur de 160 kPa pour un déplacement de 100 cm.

La valeur moyenne obtenue par les cinq capteurs de pression totale nous permet de mettre en évidence les phénomènes de variation de volume successifs, qui se produisent dans l'interface. Dans une première phase, nous observons une contractance du matériau traduite par une baisse de la contrainte normale à l'interface. Cette contractance se produit sur un déplacement tangentiel de l'ordre de 4 mm. Ensuite, une phase de forte dilatance apparaît, sur un déplacement tangentiel de l'ordre de 60 cm, où la valeur moyenne des capteurs de contrainte totale est égale à 2,5 fois (500 kPa) la valeur de la pression initiale (200 kPa). Ceci met en évidence le phénomène de dilatance empêchée, définie par Schlosser et Guilloux (1981). Après cette phase de dilatance, apparaît une seconde phase de contractance pour de grands déplacements relatifs (supérieur à 70 cm), caractérisée par une chute de la contrainte normale à l'interface. Cependant, ces phénomènes sont masqués si l'on analyse la seule lecture de la pression radiale appliquée sur la partie externe de l'échantillon. En effet, l'épaisseur de l'échantillon, 10 cm, importante par rapport au D_{50} du sable d'Hostun RF (0,32 mm, soit un rapport 300), dissimule les phénomènes qui se passent localement à l'interface (la phase d'augmentation locale de contrainte normale dans l'interface n'influence pas la diminution globale de la pression radiale).

Comme conséquence, les valeurs des coefficients de frottement réel μ et μ_c et apparent μ^* obtenues sont très proches pour de faibles déplacements (correspondant à 1° de différence), alors qu'un écart important apparaît pour de grands déplacements (plus de 8° de différence).

La figure III-7 présente les résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire à volume constant, avec une interface rugueuse sur un échantillon de sable initialement lâche (Id = 0,37), avec une pression radiale initiale de 200 kPa. La contrainte de cisaillement

atteint un palier (31 kPa) pour un déplacement de l'ordre de 3 mm, puis décroît légèrement pour de plus grands déplacements. La valeur de la pression radiale diminue rapidement pour un déplacement initial de 4 mm (chute de 40 kPa) puis décroît progressivement pour atteindre une valeur de l'ordre de 130 kPa pour de grands déplacements tangentiels.

Les valeurs des coefficients de frottement réel μ et μ_c et apparent μ^* obtenus sont très proches pour de faibles déplacements (correspondant à 1° de différence), alors qu'un écart apparaît pour de grands déplacements (4° de différence). Toutes les valeurs obtenues sont très faibles, correspondant à des angles de frottement variant entre 6° et 11°.

III.3.1.2 Essai à pression radiale constante

La figure III-8 présente les résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire à pression radiale constante (200 kPa), avec une interface lisse et un échantillon de sable dense (Id = 0,79). La contrainte de cisaillement atteint un palier (58 kPa), pour un déplacement de l'ordre de 1 mm. Elle décroît légèrement pour de plus grands déplacements.

Le volume de l'échantillon diminue pendant le cisaillement, alors que la valeur moyenne mesurée par les cinq capteurs de pression totale montre une forte augmentation de la contrainte normale dans la couche d'interface (pression radiale multipliée par 3,5). Comme pour les essais à volume constant, ce phénomène de dilatance empêchée est masqué par le volume important de l'échantillon. Une analyse de la mesure moyenne de ces capteurs nous montre que, suite à une dilatance initiale (sur 12 cm de déplacement tangentiel) apparaît une phase de contractance (jusqu'à un déplacement tangentiel de l'ordre de 50 cm, suivie d'une seconde phase de dilatance jusqu'à la fin de l'essai).

Les coefficients de frottement apparent μ^* et réel μ_c ont des valeurs similaires pour de faibles déplacements, la valeur de coefficient de frottement réel μ_c déterminé à partir de la valeur moyenne des capteurs de contrainte locaux devenant très faible (0,08, soit un angle de frottement de 5°) pour de grands déplacements, car la contrainte dans l'interface devient très importante.

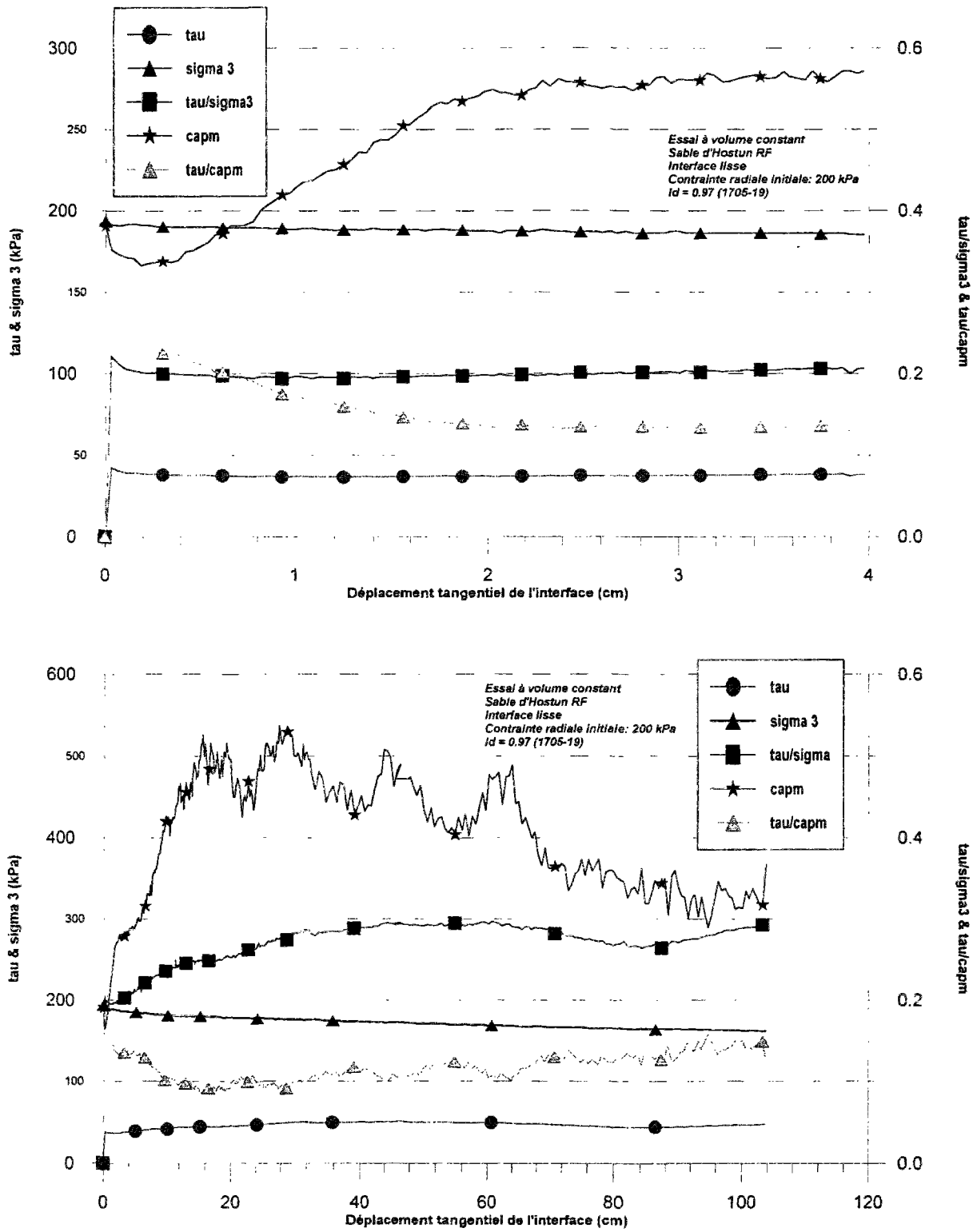


Figure III-6. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,97, σ_{ri} = 200 kPa (essai 1705-19)*

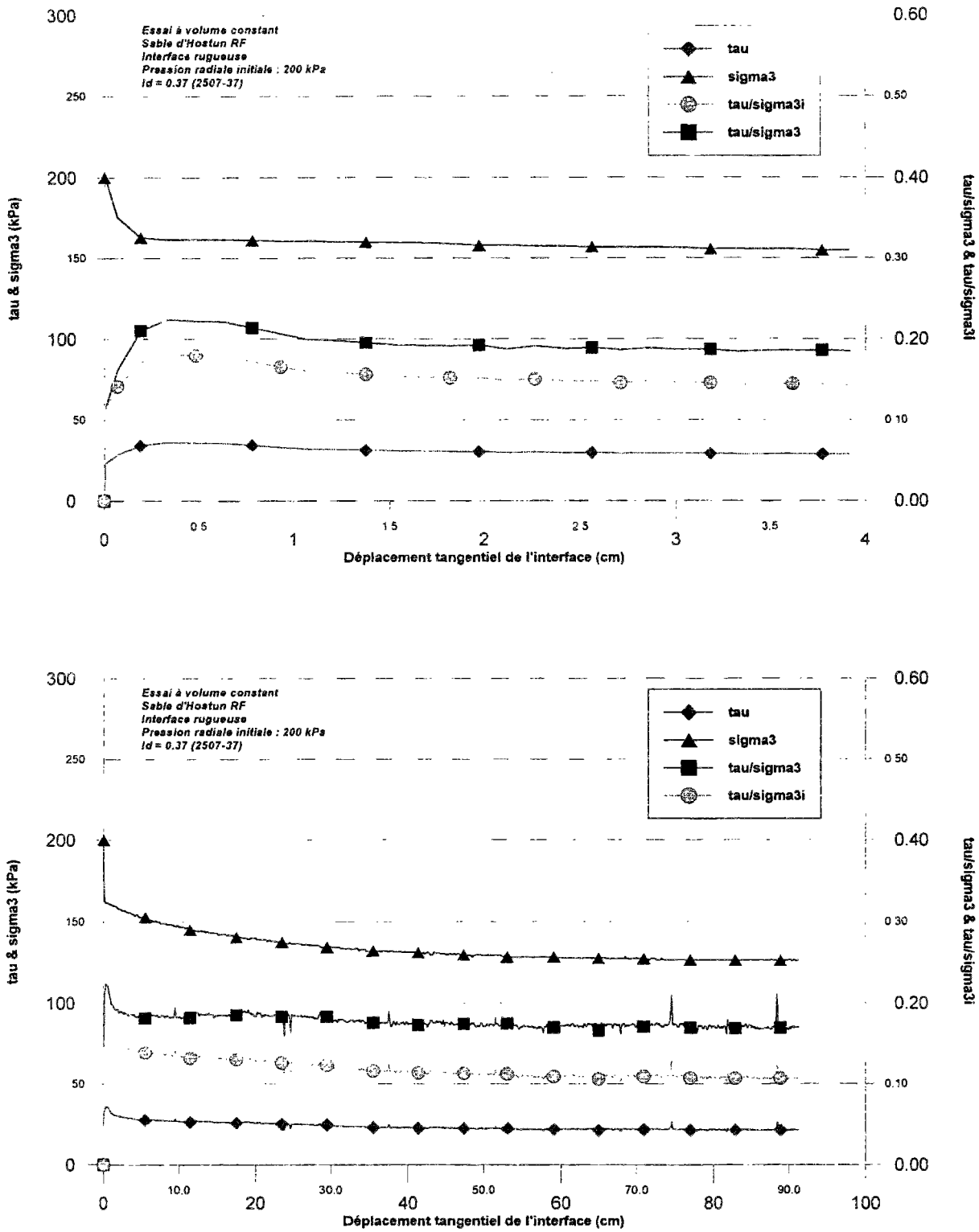


Figure III-7. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,37, σ_{ri} = 200 kPa (essai 2507-37)*

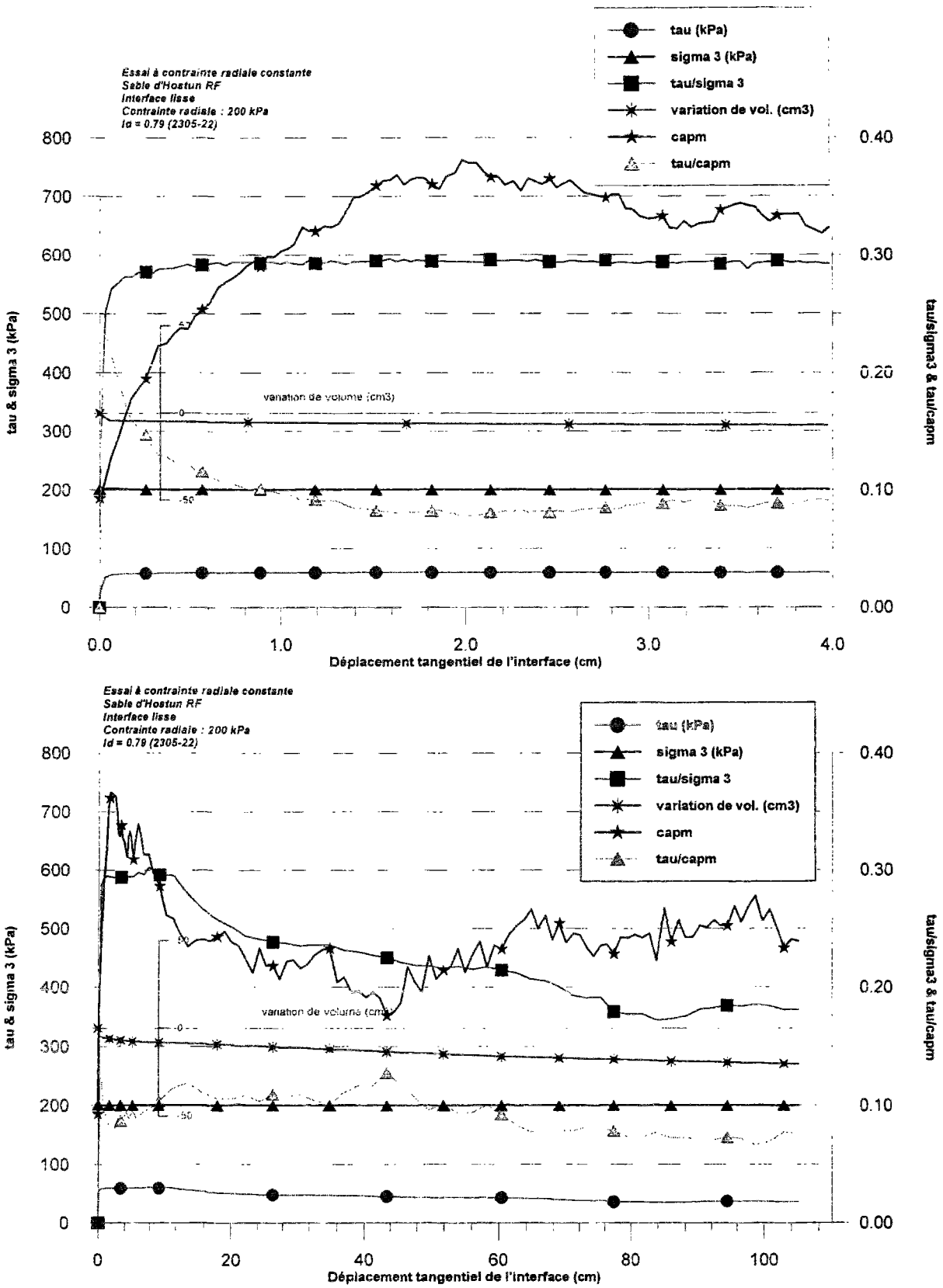


Figure III-8. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id = 0,79, σ_{ri} = 200 kPa (essai 2305-22)*

III.3.2. Essais sur le gravier d'Hostun 14~10

Nous avons étudié quatorze conditions d'essais différentes sur le gravier d'Hostun 14~10. Comme pour les essais sur le sable d'Hostun RF, nous présentons en détail trois types d'essais pour illustrer les principaux comportements observés. Les autres résultats sont présentés en annexe B.

III.3.2.1 Essai à volume constant

La figure III-9 présente les résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire à volume constant, avec une interface rugueuse, sur du gravier dense (Id = 0,70). La contrainte de cisaillement augmente progressivement pour atteindre un "palier pic" très peu marqué (175 kPa), pour un déplacement de l'ordre de 2 cm. Pour de plus grands déplacements, elle diminue régulièrement jusqu'à une valeur de 100 kPa, pour trente centimètres de déplacement.

La pression radiale initiale appliquée sur la partie externe de l'échantillon est de 200 kPa. Cette pression décroît légèrement pour de petits déplacements (3 mm) puis augmente fortement sur un déplacement tangentiel de 4 cm pour atteindre une valeur de 425 kPa. Puis, pour de plus grands déplacements, nous observons une diminution progressive de cette pression radiale. La phase initiale de contractance, puis la phase de dilatance importante, classiquement observée dans les essais de cisaillement, est complétée par une seconde phase de contractance pour des déplacements tangentiels importants. Contrairement aux essais sur le sable d'Hostun RF, où les dimensions de l'échantillon par rapport à la taille des grains masquaient ce comportement au niveau des mesures faites à l'extérieure de la zone d'interface, les essais sur le gravier 14~10 mettent en évidence ces phases de contractance - dilatance - contractance successives, sur les mesures de la pression radiale externe.

Les valeurs des coefficients de frottement réel μ et apparent μ^* obtenues sont très différentes, du fait de la forte variation de la pression radiale. Pour 2 cm de déplacement

tangentiel, μ^* a une valeur de 0,84 (correspondant à un angle de frottement de 40°) alors que μ a une valeur de 0,42 (correspondant à un angle de frottement de 23°). De même, pour de plus importants déplacements tangentiels, μ^* a une valeur de 0,60 (correspondant à un angle de frottement de 31°) alors que μ a une valeur de 0,32 (correspondant à un angle de frottement de 18°).

La figure III-10 présente les résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire à volume constant, avec une interface lisse, sur du gravier lâche (Id = 0,27), avec une pression radiale initiale de 200 kPa. La contrainte de cisaillement atteint un pic très peu marqué (22 kPa), pour un déplacement de l'ordre de 2 mm pour décroître légèrement pour de plus grands déplacements (jusqu'à une valeur de 13 kPa). La valeur de la pression radiale diminue rapidement pour un déplacement initial de 2 mm (chute de 20 kPa) puis décroît progressivement pour atteindre une valeur de l'ordre de 75 kPa pour de grands déplacements tangentiels (90 cm).

Les valeurs des coefficients de frottement réel μ et apparent μ^* obtenues sont très faibles. Pour de petits déplacements, ils correspondent à des valeurs d'angle de frottement de respectivement 6° et 8°. Pour de grands déplacements, les valeurs de μ^* obtenues sont très petites (0,06) et pourraient même devenir négligeables. Le frottement réel a une valeur supérieure, à cause de la forte diminution de la pression radiale.

III.3.2.2 Essai à pression radiale constante

La figure III-11 présente les résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire à pression radiale constante (200 kPa), avec une interface rugueuse et un échantillon de gravier dense (Id = 0,67). La contrainte de cisaillement atteint rapidement un palier (115 kPa) pour un déplacement de l'ordre de 2 mm. Elle diminue régulièrement pour de plus grands déplacements.

Le volume de l'échantillon réduit très légèrement, dans une phase initiale, pour ensuite augmenter pour de plus grands déplacements. Une seconde phase de contractance

apparaît pour de grands déplacements tangentiels (pour cet essai, seule l'amorce de cette seconde phase de contractance est discernable car le déplacement tangentiel est limité à 20 cm, mais nous l'observons nettement pour des essais réalisés avec d'autres pressions de confinement, présentés en annexe). Comme pour les essais à volume constant, ce phénomène de contractance, dilatance puis contractance successives, n'est pas masqué par le volume de l'échantillon.

Le coefficient de frottement apparent μ^* varie entre 0,50 pour de petits déplacements à 0,38 pour de plus grands déplacements tangentiels (20cm).

III.3.3. Reproductibilité des essais et erreurs

Plusieurs essais ont été réalisés, dans les mêmes conditions, pour analyser leur reproductibilité. Les différences observées sont principalement liées à la fabrication de l'échantillon. En effet, comme nous n'avons pas utilisé de pluviateur, l'hétérogénéité au sein d'un même échantillon peut être assez forte et influencer les résultats obtenus.

Les différences entre deux échantillons peuvent être conséquentes, du fait d'une part de l'hétérogénéité de chacun et, d'autre part, des différences de densité entre les deux. La densité d'un échantillon est déterminée après sa fabrication, une fois le vide appliqué. On mesure alors son diamètre moyen (à partir de la mesure à trois niveaux) et sa hauteur moyenne (en quatre points). Son poids étant déterminé avec une précision de 20 grammes et les mesures effectuées avec une précision que nous estimons à 1 mm sur le diamètre et à 0,5 mm sur la hauteur, nous obtenons, dans l'essai que nous avons analysé, un indice de densité variant entre 0,84 et 0,92, en prenant les paramètres extrêmes dans chaque cas. Entre deux échantillons, même en utilisant le même poids de matériau, les densités finales obtenues peuvent être assez différentes du fait de leur dimension finale.

La figure III-12 présente les résultats obtenus pour deux essais de cisaillement à pression normale constante (600 kPa), sur du gravier d'Hostun 14~10 dense avec une interface rugueuse. Les indices de densité obtenus, 0,64 et 0,69, présentent un écart assez

significatif. Cependant, les résultats obtenus sont absolument identiques pour de petits ou de grands déplacements.

La figure III-13 présente les résultats obtenus pour deux essais de cisaillement, à pression normale constante (200 kPa), sur du gravier d'Hostun 14~10 dense, avec une interface rugueuse. Les indices de densité obtenus, 0,67 et 0,70, sont plus proches que pour l'exemple précédent. Cependant, même si les courbes contrainte de cisaillement - déplacement tangentiel ont la même allure, un écart de 10% apparaît sur les valeurs de la contrainte de cisaillement.

L'indice de densité n'est donc pas le seul paramètre influant la reproductibilité : l'hétérogénéité au sein de l'échantillon, créée lors de sa fabrication, a beaucoup d'influence sur la valeur de la contrainte de cisaillement obtenue.

Une perte d'étanchéité peut également être source d'erreurs importante. Cette perte peut se produire au niveau de la membrane, et laisser passer de l'eau dans l'échantillon ou bien au niveau d'une connexion ou d'un joint. Ces fuites ne sont pas toujours détectables avant le début du cisaillement et ne peuvent être identifiées qu'à la fin de l'essai, au moment du démoulage (ou éventuellement par observation à travers les fenêtres). La figure III-14 présente la comparaison des résultats obtenus avec une fuite à ceux obtenus sans fuite. La fuite, lors d'un essai à volume constant, influence beaucoup la variation de la pression radiale et, par conséquence, la valeur de la contrainte de cisaillement. Mais les courbes obtenues ont la même allure et ne permettent pas d'identifier le problème.

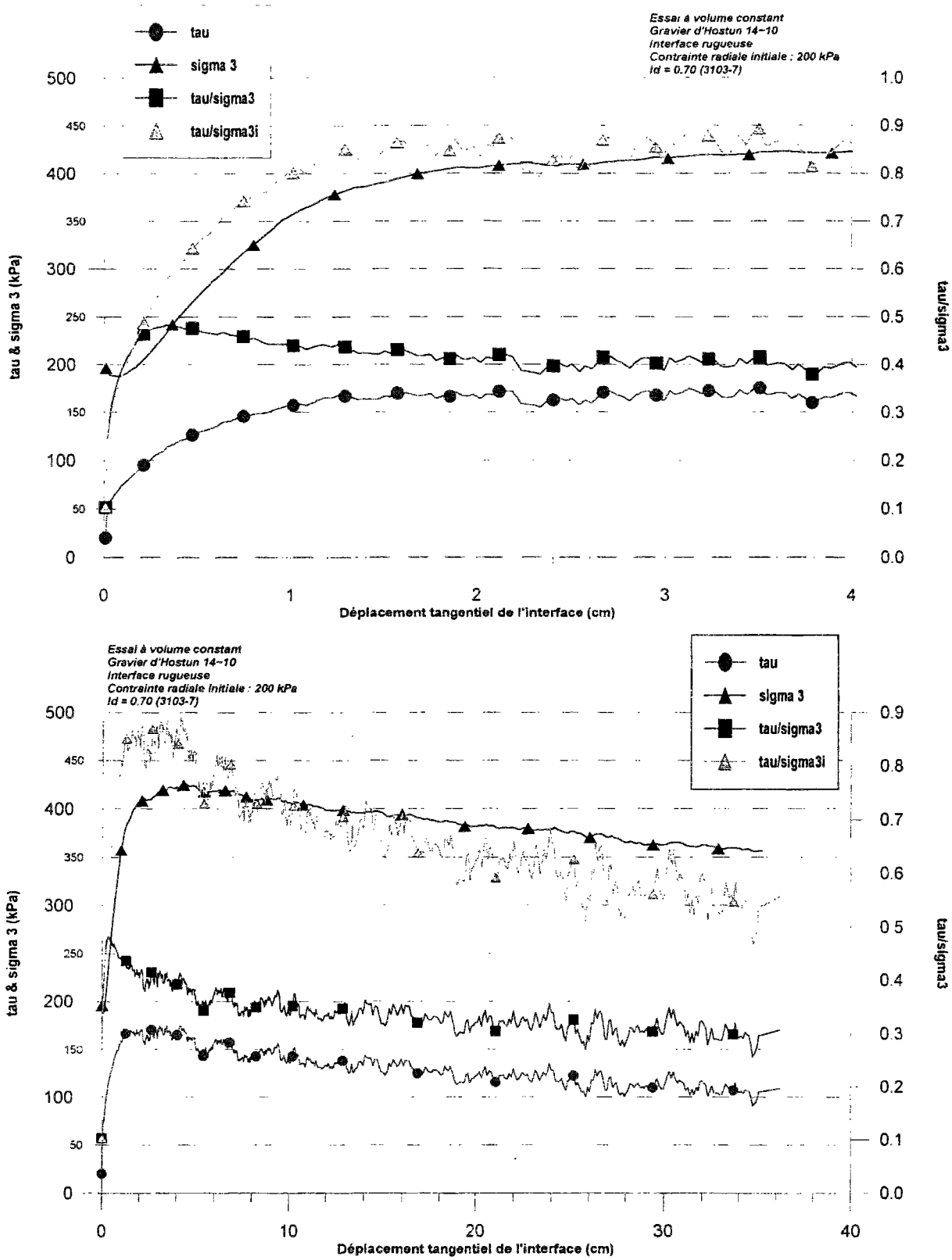


Figure III-9. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,70, σ_{ri} = 200 kPa (essai 3103-7)*

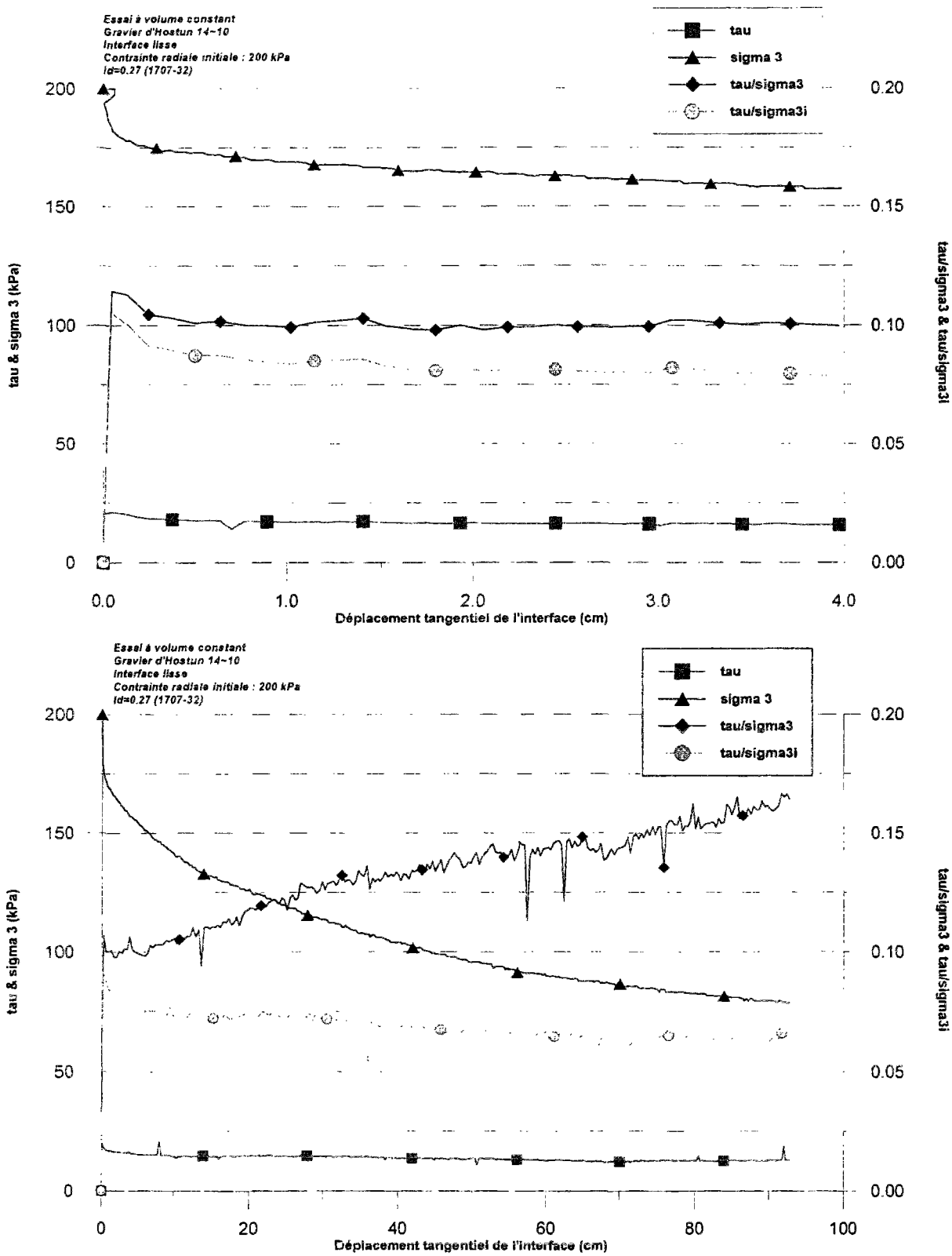


Figure III-10. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface lisse, volume constant, Id = 0,27, σ_{ri} = 200 kPa (essai 1707-32)*

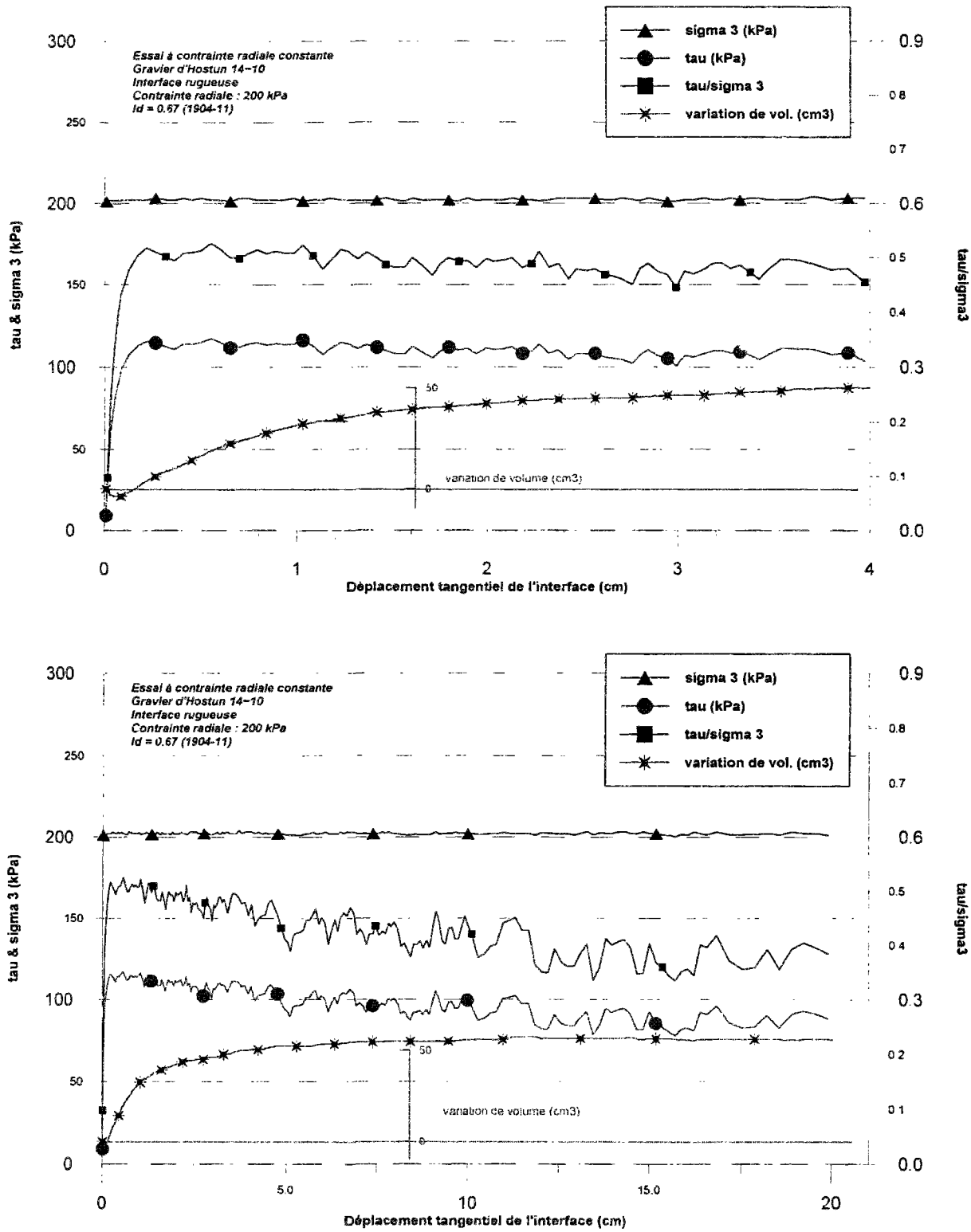


Figure III-11. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,67, σ_{ri} = 200 kPa (essai 1904-11)*

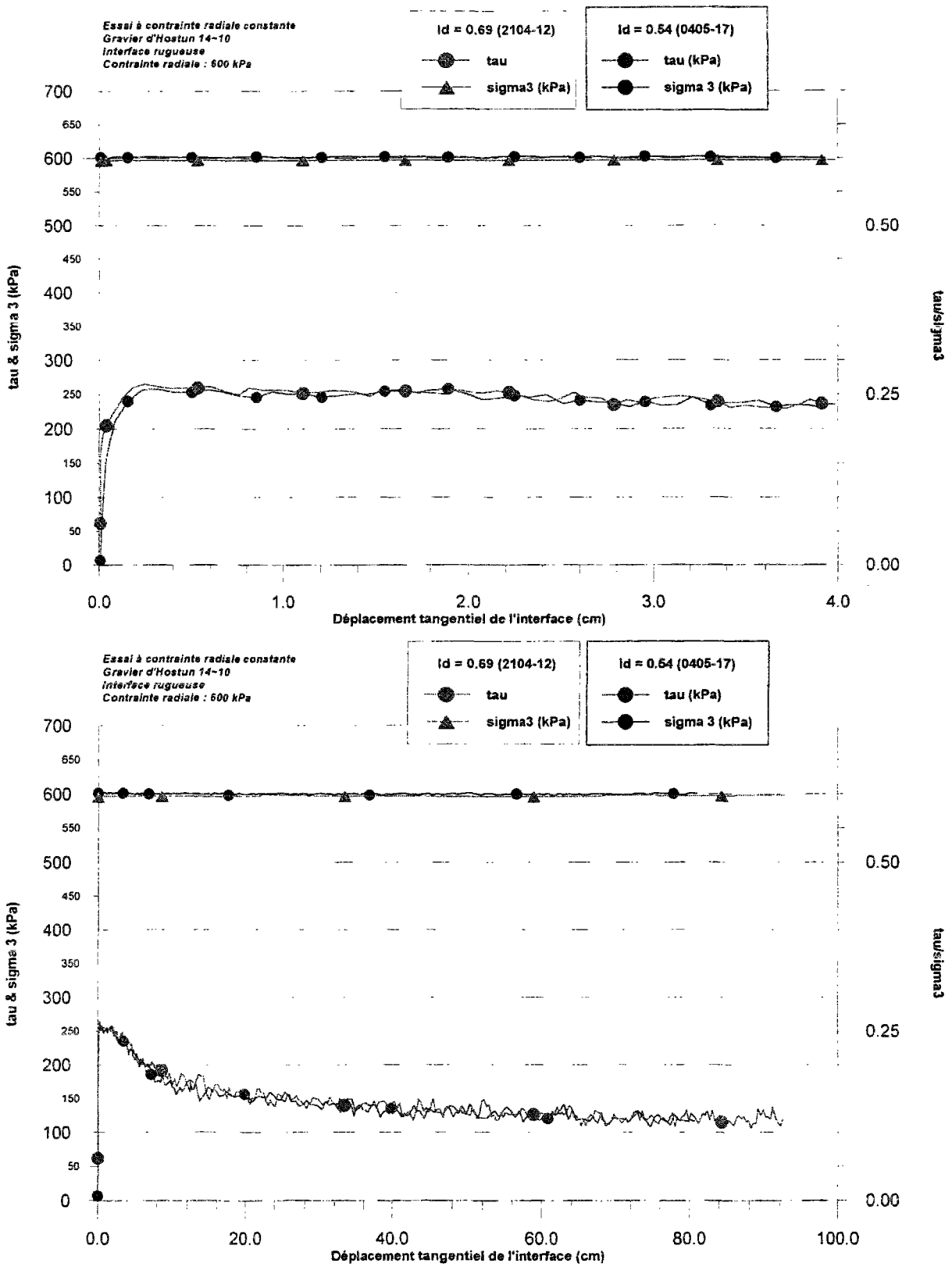


Figure III-12. *Reproductibilité des essais de cisaillement simple annulaire : essais à pression normale constante (600 kPa), gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse*

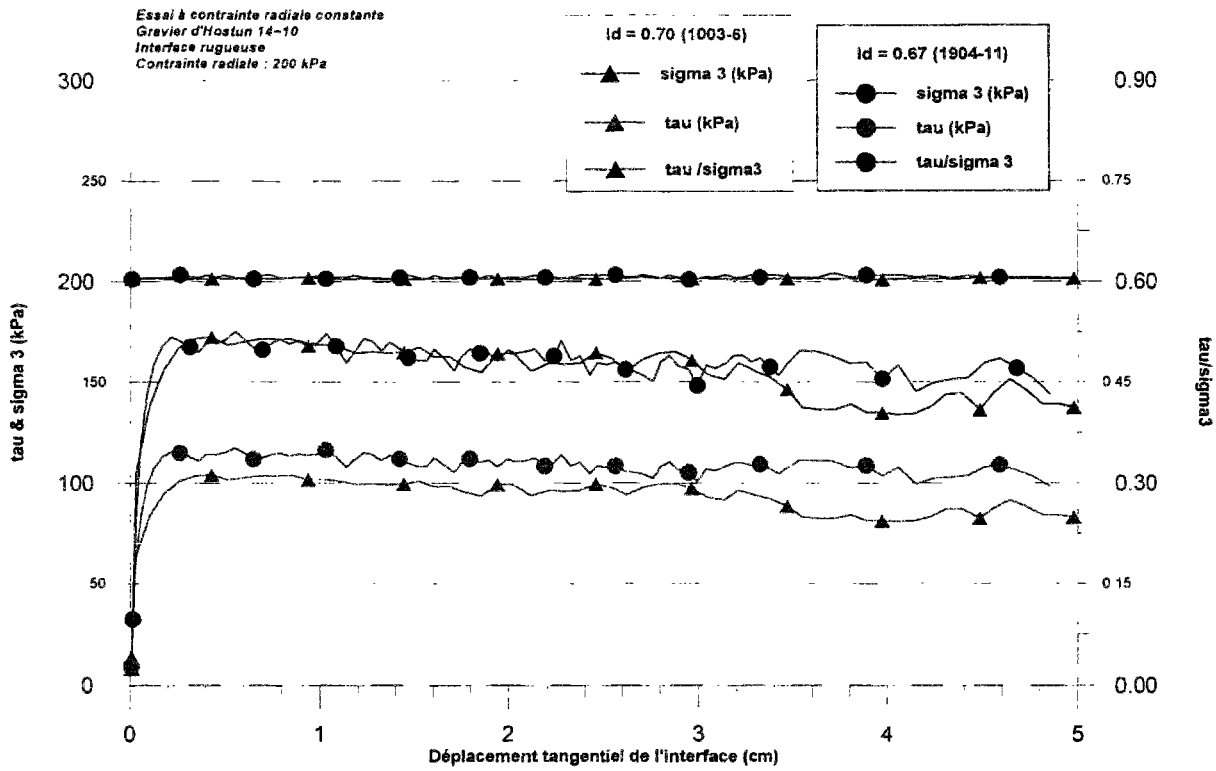


Figure III-13. *Reproductibilité des essais de cisaillement simple annulaire : essais à pression normale constante (200 kPa), gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse*

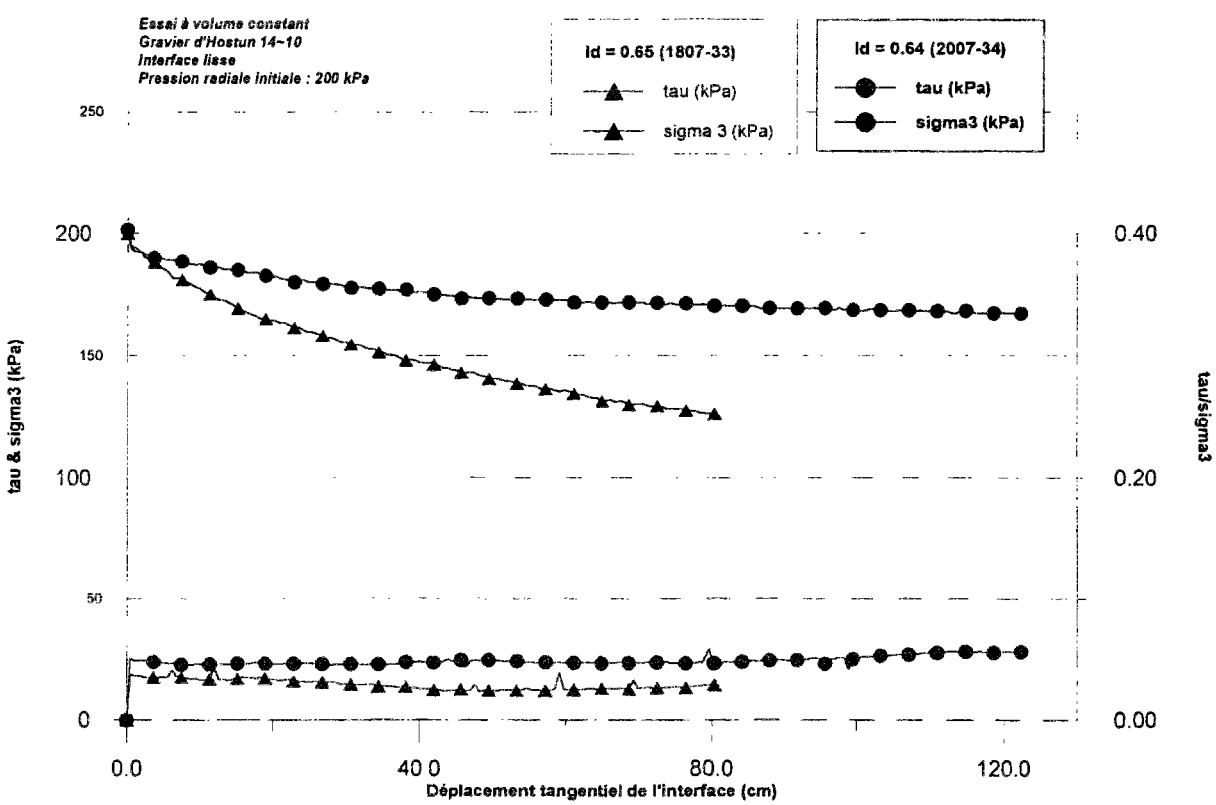


Figure III-14. *Exemple de problèmes rencontrés en cours d'essai : perte d'étanchéité: essais à volume constant (200 kPa), gravier d'Hostun 14~10 dense, interface lisse*

III.4. SYNTHESE DES RESULTATS ET ANALYSE DE L'INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES

Les résultats des différents essais réalisés sur le sable d'Hostun RF et sur le gravier d'Hostun 14~10, présentés précédemment et en annexe, vont nous permettre de mettre en évidence l'influence des différents paramètres sur le comportement de l'interface (Lerat et Yahia-Aïssa, 1995; Lerat, 1996; Lerat et Schlosser, 1996; Lerat *et al.*, 1996; Yahia-Aïssa et Lerat, 1996). Nous interprétons, successivement, les résultats obtenus sur le sable d'Hostun RF, sur le gravier d'Hostun 14~10 puis nous les comparons pour faire une synthèse générale et mettre en évidence l'influence de la granulométrie.

III.4.1. Résultats obtenus avec le sable d'Hostun RF

Le tableau III-5 présente les valeurs des coefficients de frottement obtenues à partir des différents essais. Ces valeurs ont été déterminées pour différentes valeurs du déplacement tangentiel : 1 millimètre, 2 centimètres et 1 mètre. La mobilisation de la contrainte de cisaillement se fait pour un très faible déplacement, de l'ordre de 1 millimètre. La valeur de 2 centimètres correspond à une valeur après pic, quand celui-ci existe, et également à une valeur de déplacement tangentiel final dans de nombreux essais de cisaillement d'interface à la boîte de cisaillement direct modifié. Enfin, la valeur de 1 mètre correspond aux coefficients de frottement obtenus pour de grands déplacements tangentiels. Notons que nous ne prenons pas comme définition de μ et μ^* les définitions présentées dans le chapitre bibliographique où ces deux paramètres sont définis pour la valeur maximale de la contrainte de cisaillement.

III.4.1.1 Influence de la pression radiale initiale

a. Essais à volume constant

Les figures III-15 à III-20 présentent une synthèse des essais de cisaillement simple annulaire réalisés à volume constant, avec une interface lisse sur du sable d'Hostun RF dense avec des pressions radiales initiales de 50, 100, 200 et 400 kPa.

Les quatre courbes représentant la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement ont la même allure (figure III-15). La valeur maximale de la contrainte de cisaillement $\tau_{max.}$ est obtenue pour de faibles valeurs de déplacement, de l'ordre de 1 millimètre. Après le pic, d'autant plus marqué que la pression radiale initiale est importante, la contrainte de cisaillement diminue. Pour de plus grands déplacements, elle augmente de nouveau et atteint un nouveau pic, plus rapidement si la pression radiale initiale est élevée et une valeur relative plus élevée si la pression radiale initiale est faible.

Les courbes représentant, en fonction du déplacement tangentiel de l'interface, la valeur du coefficient de frottement apparent (figure III-16) ne montrent pas une évolution de ce coefficient avec la pression radiale initiale. La valeur obtenue pour 50 kPa ne confirme pas l'augmentation du coefficient de frottement avec l'augmentation de la pression radiale initiale, obtenue pour les essais à 100, 200 et 400 kPa.

Ceci est confirmé par les courbes représentant la variation de la pression radiale externe en fonction de sa valeur initiale (figure III-17). Le comportement de l'échantillon est globalement contractant, pour toutes les pressions. Mais la diminution relative est plus importante pour l'essai à 50 kPa que pour les essais à 100 et 200 kPa. Pour 50 kPa, nous notons une forte baisse du rapport (sigma3/sigma3i) puis une stabilisation pour de plus grands déplacements. Cette baisse est égale à 10% de la pression radiale initiale pour 100 kPa alors qu'elle est égale à 40 % pour 400 kPa (pour de grands déplacements de 1 mètre). Les coefficients de frottement réel (figure III-18) restent compris entre 0,15 et 0,30.

La lecture des capteurs locaux nous permettent de mettre en évidence une phase initiale de contractance locale pour les pressions radiales initiales de 100 et 200 kPa, phase qui n'apparaît pas pour les pressions radiales initiales de 50 et 400 kPa (figure III-19). Comme nous l'avons déjà mentionné, cette phase est masquée dans la mesure de la pression radiale externe qui montre une contractance continue, traduite par une baisse constante de sa valeur (la majeure partie de l'échantillon se trouvant dans une phase de contractance). Pour

l'essai à 50 kPa de pression radiale initiale, la très forte dilatance initiale est rapidement suivie d'une phase de contractance puis de phases successives de dilatance-contractance.

Les coefficients de frottement réel, déduits de cette mesure dans l'interface, après des valeurs de pics obtenues pour 1mm de déplacement tangentiel, restent compris entre 0,05 et 0,15 pour de grands déplacements (figure III-20).

Tableau III-5. *Résultats des essais sur le sable d'Hostun RF*

(μ^* : coefficient de frottement apparent, μ : coefficient de frottement réel, μ_c : coefficient de frottement réel déterminé à partir de la moyenne des mesures avec les capteurs de contrainte normale)

inter.	comp.	cond.	50 kPa		100 kPa		200 kPa		400 kPa	
			μ^*	μ (μ_c)	μ^*	μ (μ_c)	μ^*	μ (μ_c)	μ^*	μ (μ_c)
lisse	lâche	volume constant					0,14	0,15 (0,18)		
							0,08	0,10 (0,14)		
							0,05	0,08 (0,13)		
	dense	pression radiale const.	0,35	(0,39)	0,27	(0,25)	0,27	(0,24)	0,32	(0,27)
			0,33	(0,14)	0,26	(0,14)	0,29	(0,08)	0,29	(0,12)
			0,23	(0,12)	0,31	(0,15)	0,18	(0,08)	0,18	(0,10)
		volume constant	0,27	0,27 (0,21)	0,20	0,20 (0,20)	0,22	0,22 (0,24)	0,25	0,27 (0,27)
			0,21	0,20 (0,06)	0,15	0,16 (0,10)	0,18	0,20 (0,14)	0,22	0,24 (0,14)
			0,13	0,17 (0,06)	0,25	0,28 (0,10)	0,24	0,29 (0,14)	0,15	0,24 (0,14)
rugueuse	lâche	volume constant					0,18	0,20		
							0,15	0,19		
							0,10	0,16		
	dense	volume constant					0,55	0,50		1 mm
							0,50	0,45		2 cm
							0,40	0,35		1 m

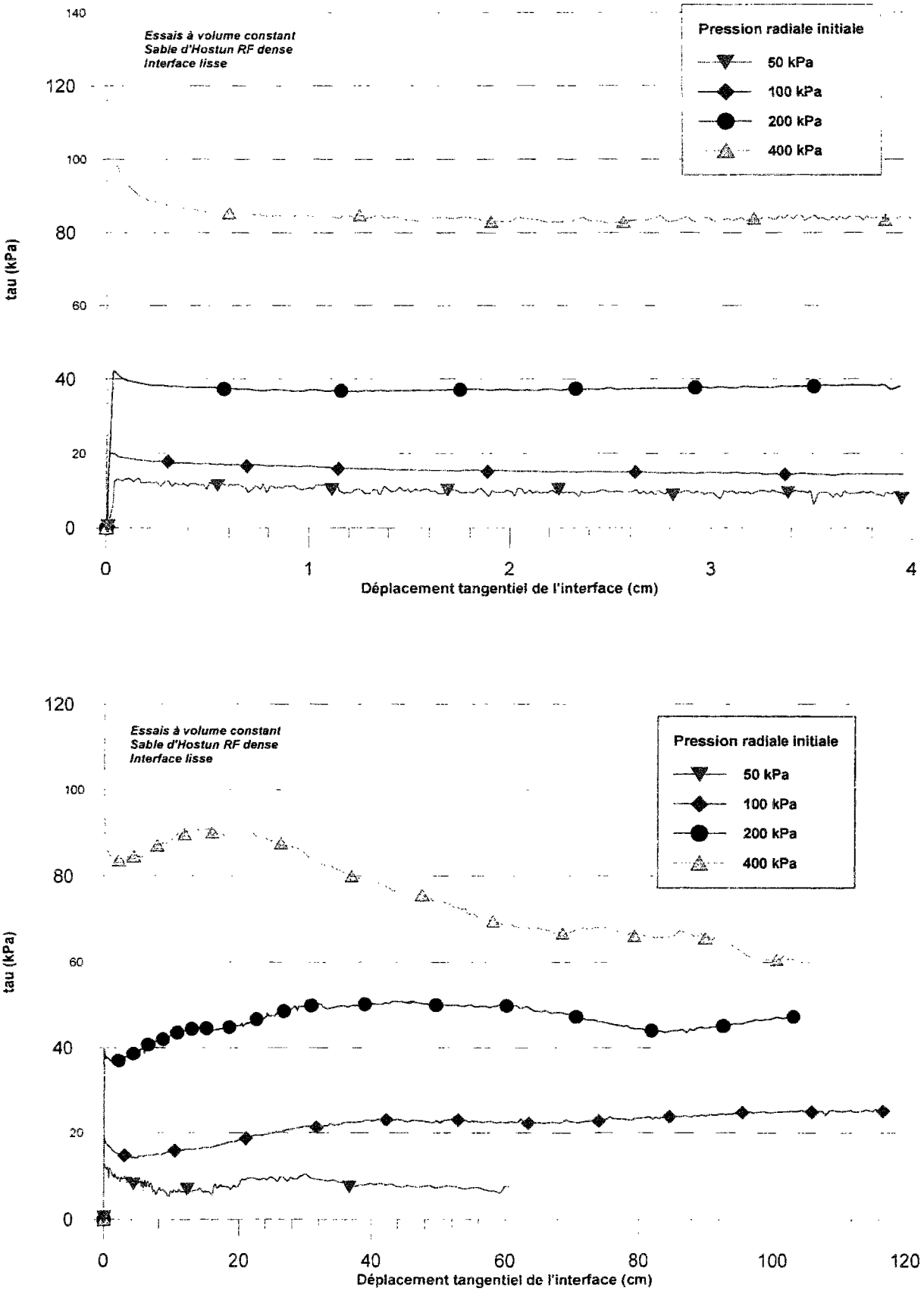


Figure III-15. *Courbes contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense*

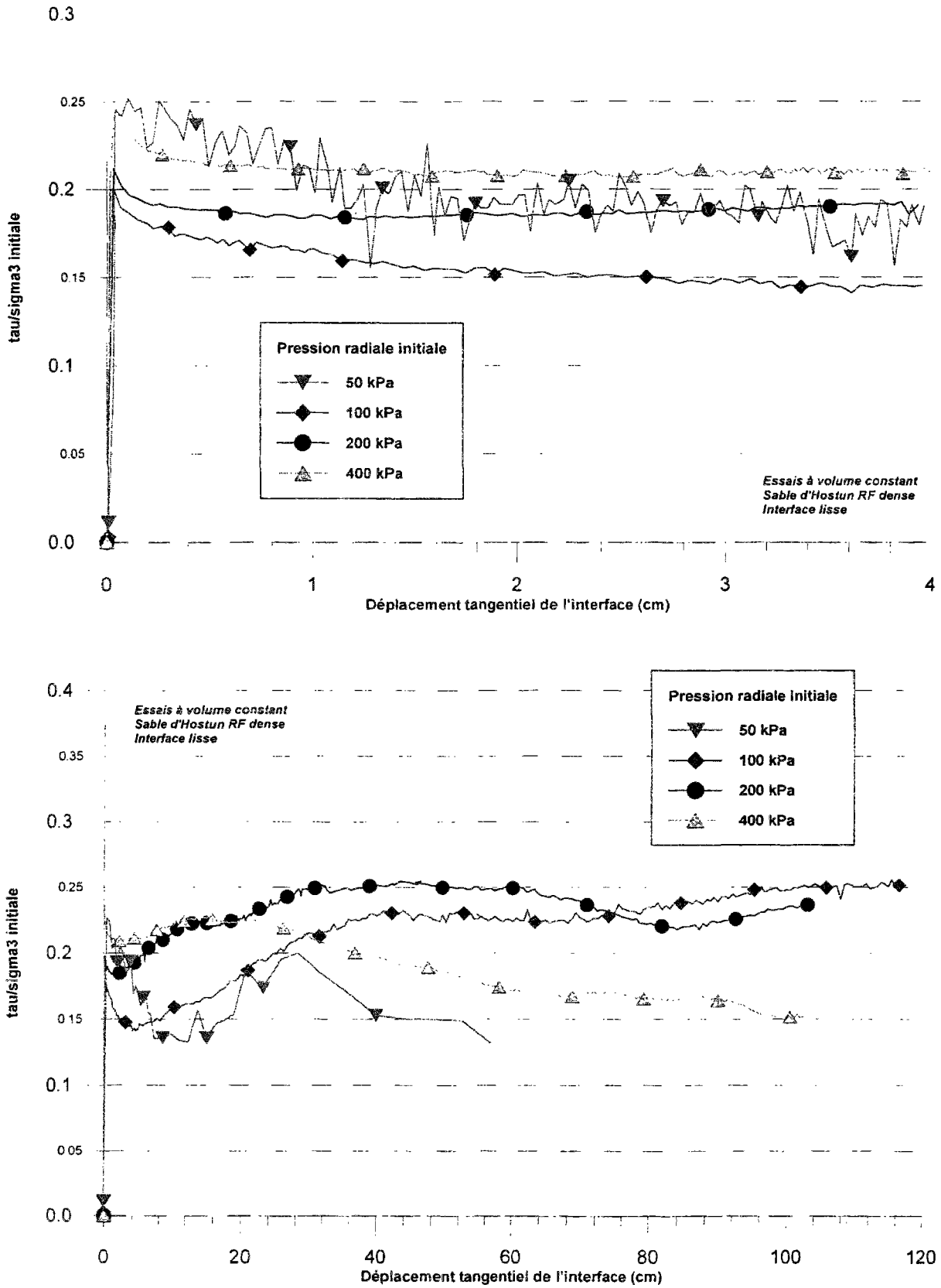


Figure III-16. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense*

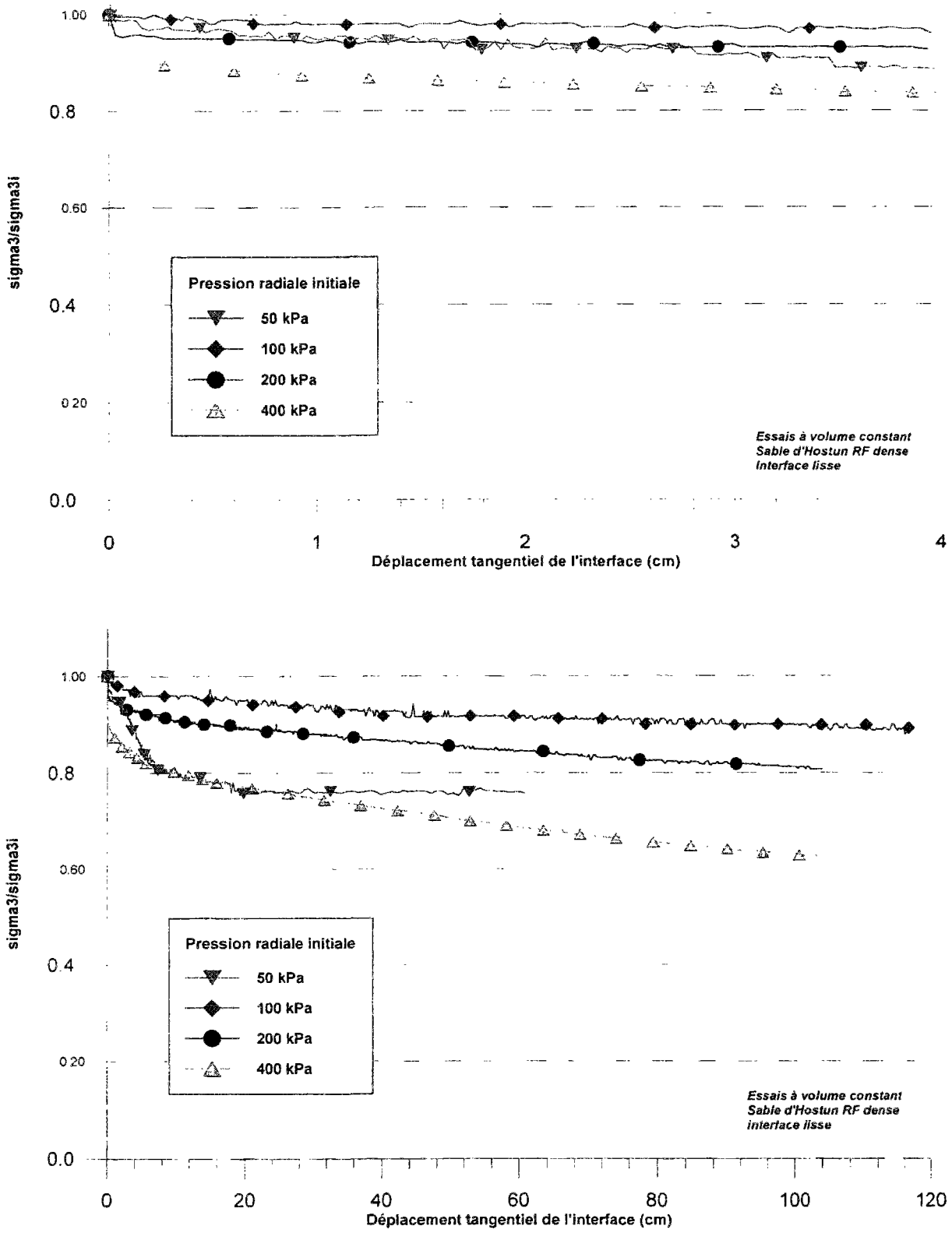


Figure III-17. *Courbes (σ3/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense*

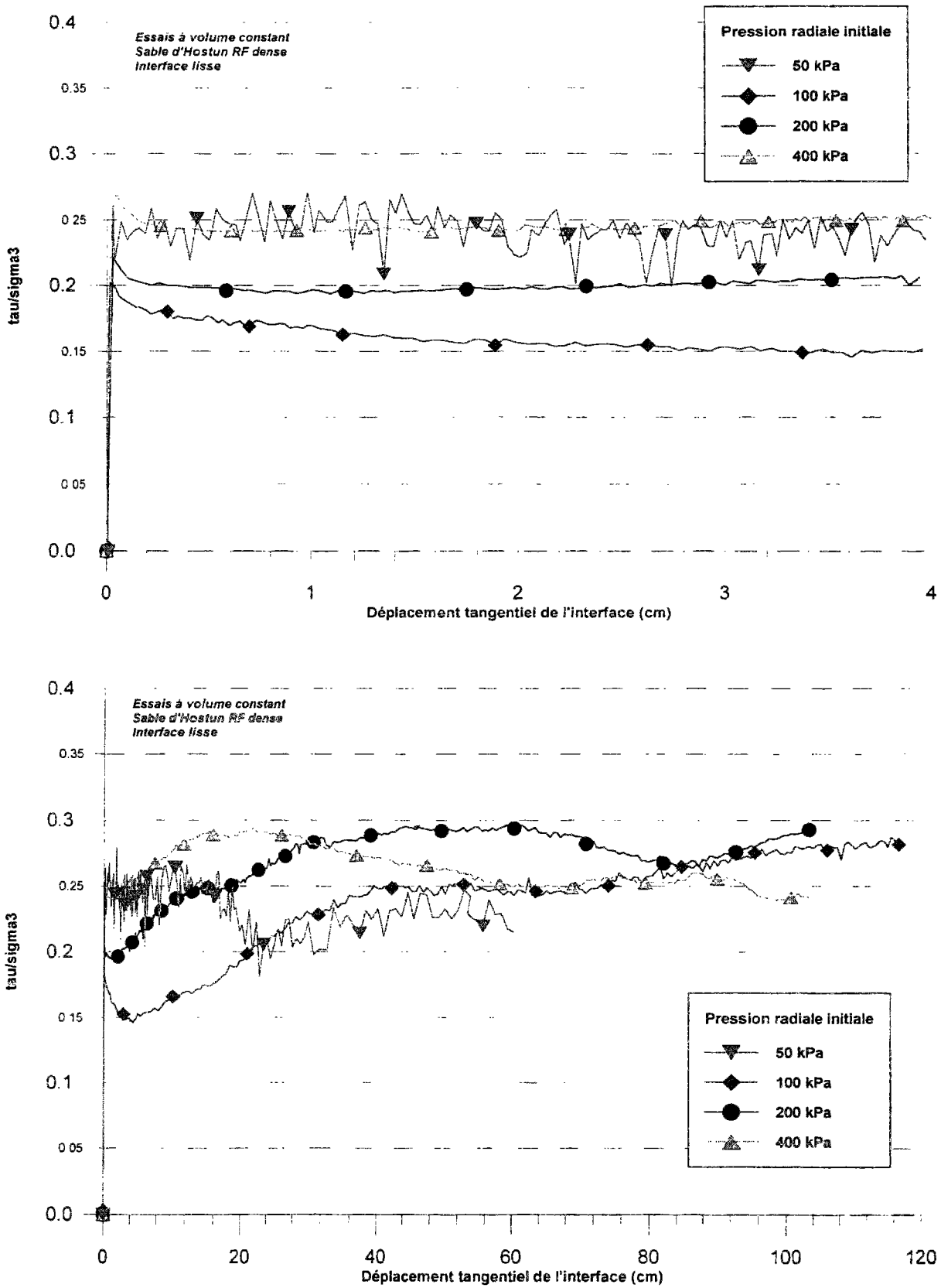


Figure III-18. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense*

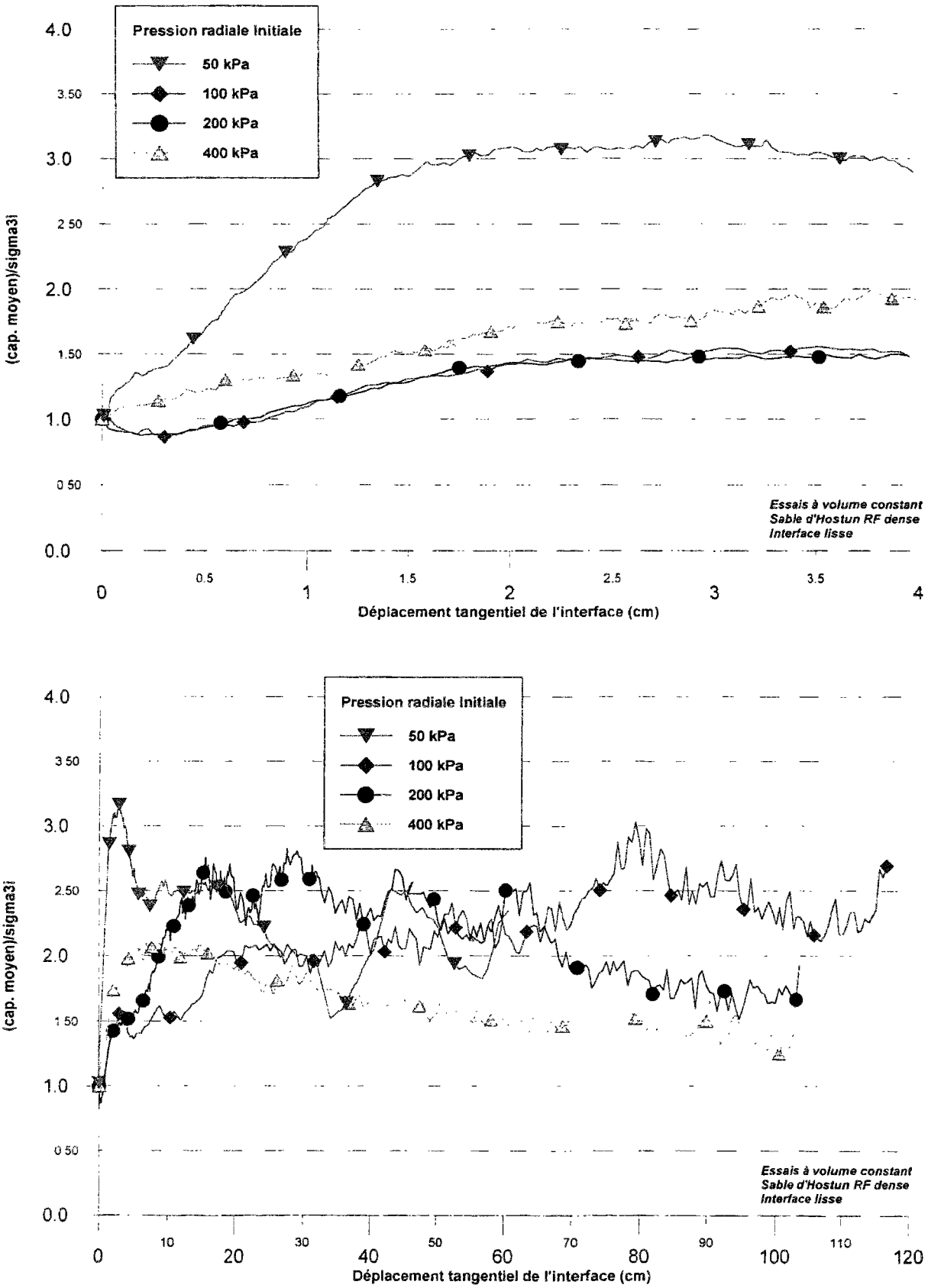


Figure III-19. *Courbes (capteur moyen/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense*

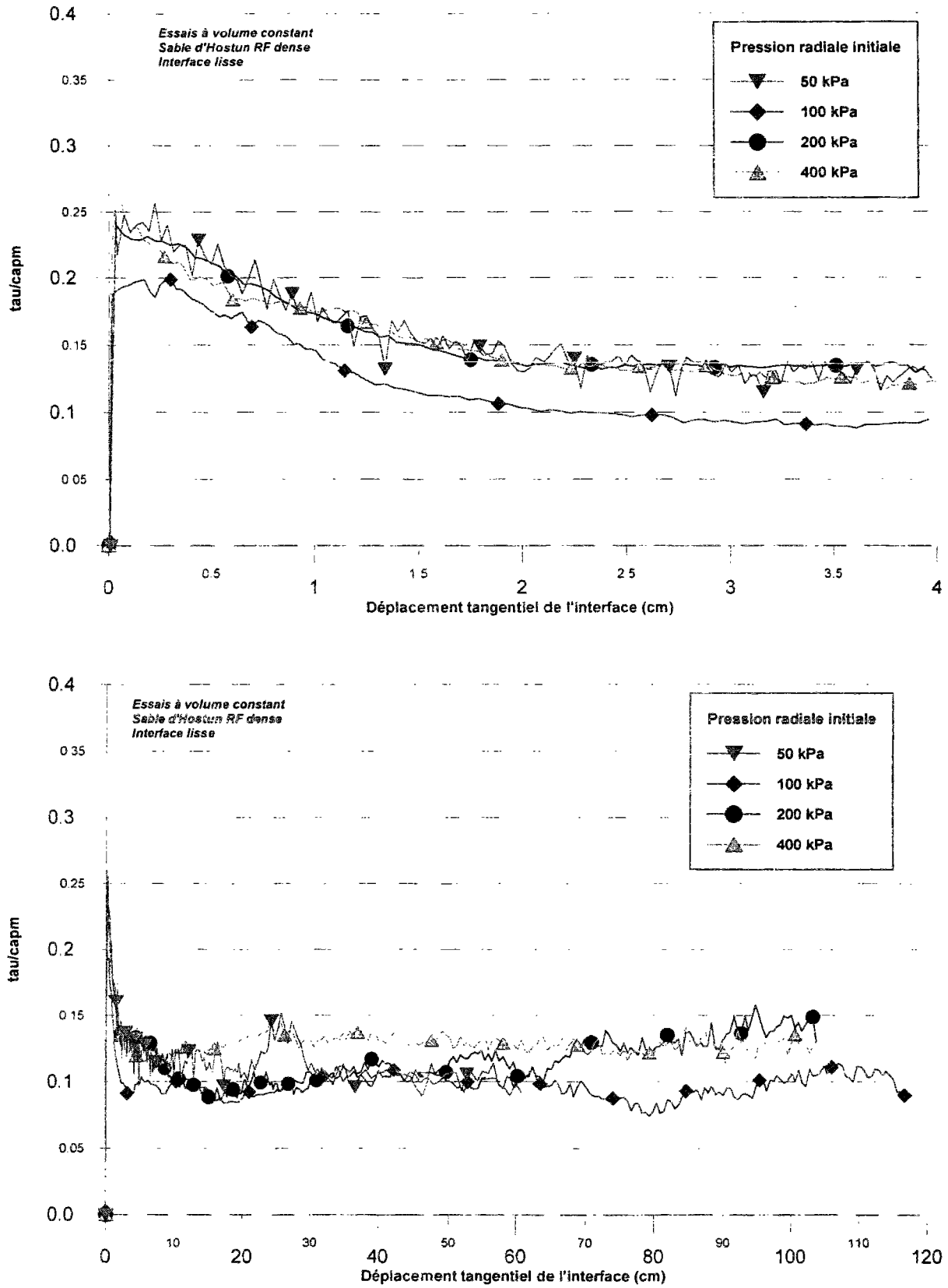


Figure III-20. *Courbes (μ_c = τ/capteur moyen) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense*

b. Essais à pression radiale constante

Les figures III-21 à III-25 présentent une synthèse des essais de cisaillement simple annulaire réalisés à pression normale constante, avec une interface lisse sur du sable d'Hostun RF dense avec des pressions radiales initiales de 50, 100, 200 et 400 kPa.

Les résultats obtenus, au regard de l'influence de la pression radiale initiale, sont très similaires à ceux obtenus à partir des essais à volume constant. La valeur maximale de la contrainte de cisaillement est atteinte pour un déplacement plus important que pour les essais à volume constant, et elle augmente également avec la valeur de la pression radiale initiale (figure III-21). Pour de plus grands déplacements, la contrainte de cisaillement diminue pour les essais à 50, 200 et 400 kPa de pression radiale alors qu'elle augmente légèrement pour l'essai à 100 kPa. Les coefficients de frottement apparent obtenus sont très proches pour de faibles déplacements (autour de 0,30) mais ils sont compris entre 0,20 et 0,30 pour de grands déplacements (figure III-22).

La mesure globale de la variation de volume montre une contractance continue, comme pour les essais à volume constant, d'autant plus forte que la pression radiale initiale est élevée (figure III-23). Pour l'essai à 50 kPa, cette diminution est très faible (3 cm^3), alors qu'elle atteint 80 cm^3 pour 400 kPa.

La lecture des capteurs de contrainte totale dans la couche d'interface montre des comportements différents de ceux observés à volume constant (figure III-24). Il n'apparaît pas de phase initiale de contractance au sein de l'interface, une forte dilatance apparaissant dès le début du cisaillement. A partir de déplacements de l'ordre de 10 cm, apparaît une phase de contractance suivie, pour des déplacements supérieurs à 50 cm, par une seconde phase de dilatance. Ce phénomène particulier ne sera pas confirmé par les essais réalisés sur le gravier 14~10. Les coefficients de frottement réel obtenus, après un pic initial atteignant 0,40 pour l'essai à 50 kPa, restent compris entre des valeurs de 0,08 et 0,15 (figure III-25).

c. Chemins de contrainte

Les figures III-26 et III-27 présentent les chemins de contrainte dans le plan (contrainte de cisaillement - contrainte normale) des huit essais que nous avons interprétés précédemment. Nous avons choisi comme valeurs pour l'axe des abscisses la valeur de la pression radiale à l'extérieur de l'échantillon pour la première représentation et la valeur moyenne mesurée par les cinq capteurs de contrainte totale dans l'interface pour la seconde.

Dans le premier cas, les essais à volume constant ont un chemin qui, pour de grands déplacements, après un pic, vient sur la droite de rupture obtenue pour les contraintes de cisaillement maximales des essais à pression normale constante. Cette droite correspond à un angle de frottement de 16,7°. Les résultats obtenus sont très cohérents entre eux.

En prenant comme valeurs, pour l'axe des abscisses, les contraintes normales dans l'interface correspondant à la moyenne des lectures des cinq capteurs, nous avons des chemins de contrainte qui atteignent une droite de rupture correspondant à un angle de frottement de 15° pour de faibles déplacements. Ensuite, après un palier, nous observons une diminution de la contrainte de cisaillement accompagnée d'une diminution de la contrainte normale. Les valeurs obtenues par les capteurs nous permettent de comprendre quantitativement l'évolution des contraintes au sein de l'interface.

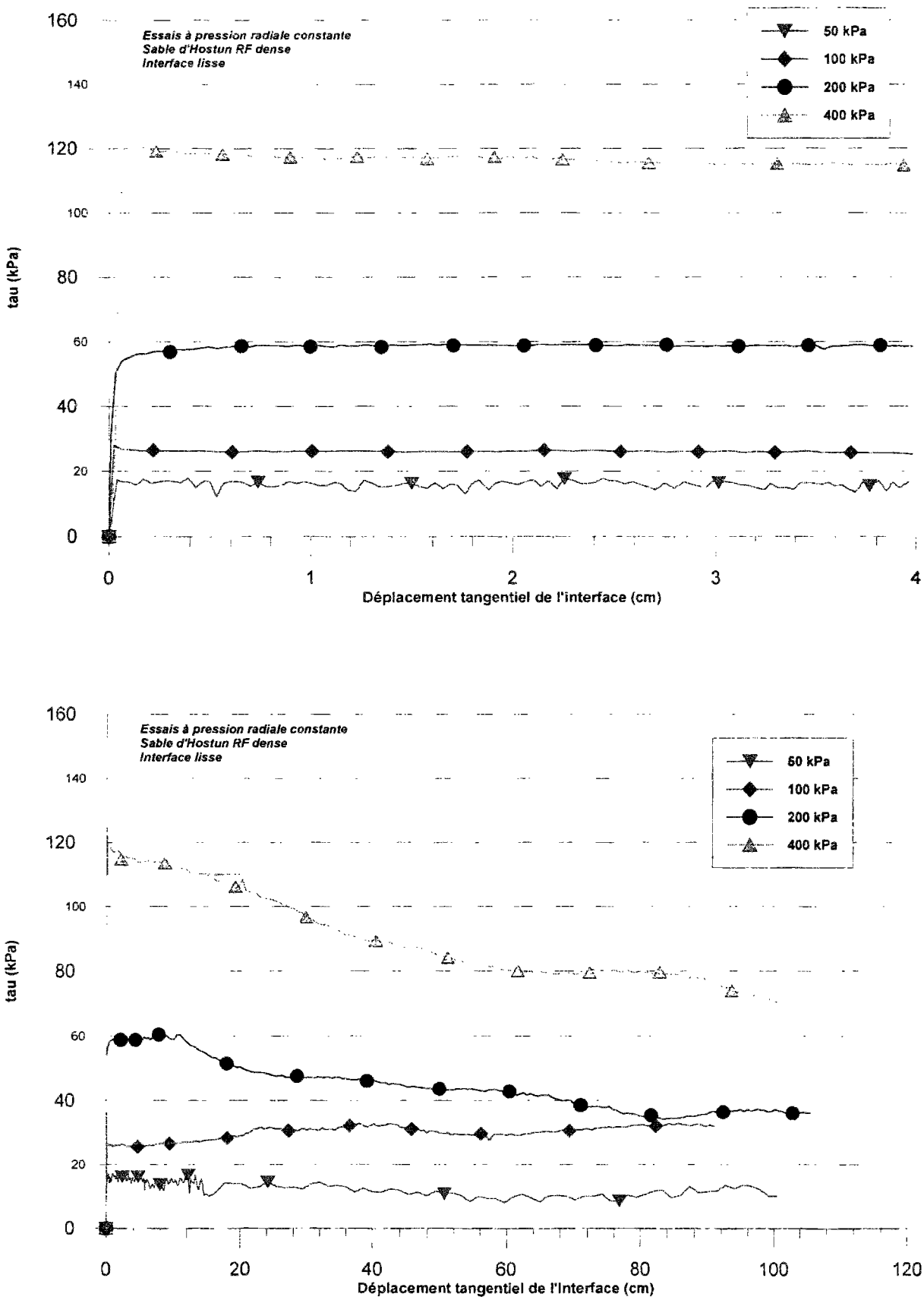


Figure III-21 . *Courbes contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, pression radiale constante, sable d'Hostun RF dense*

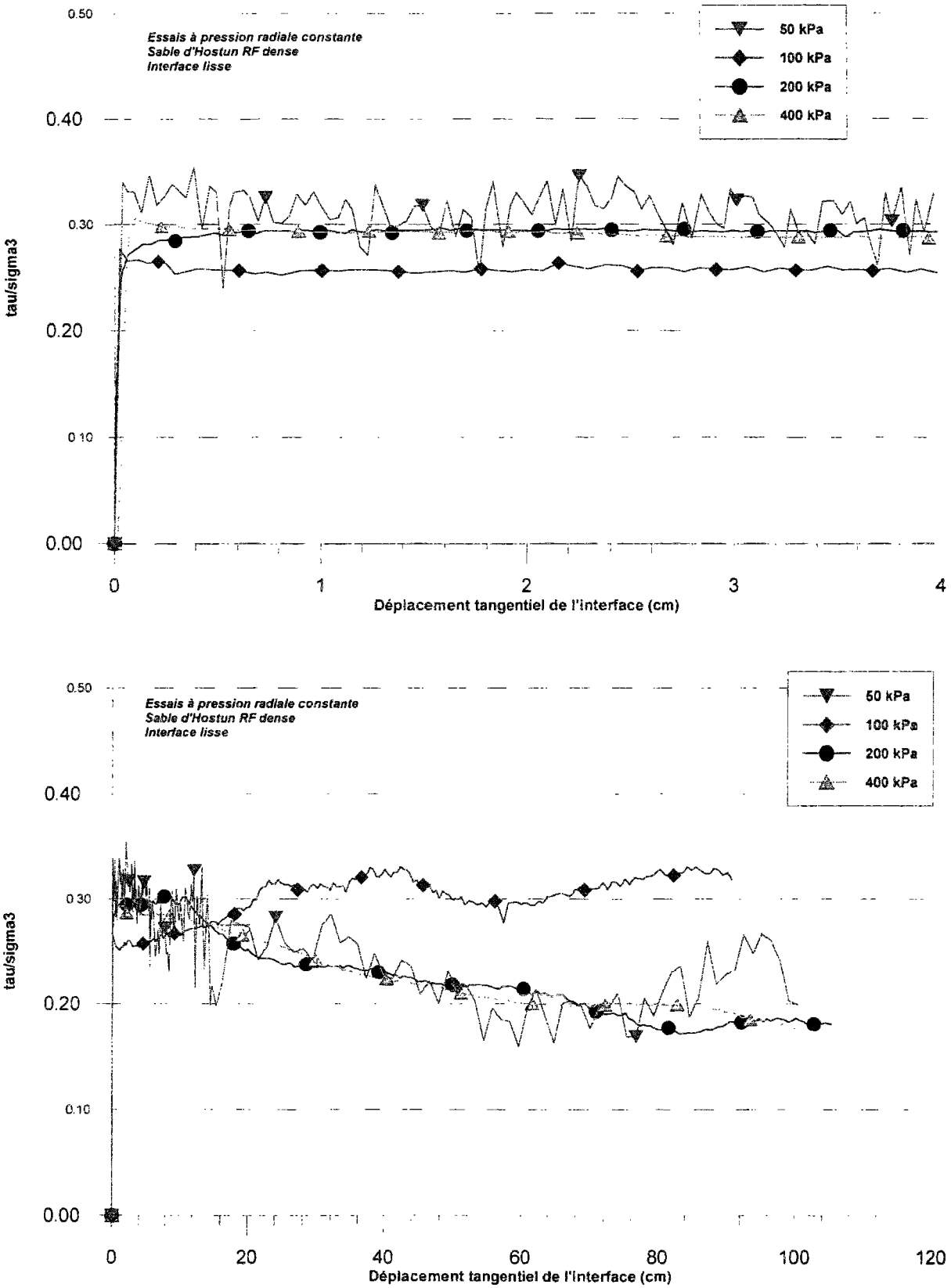


Figure III-22. *Courbes ($\mu^* = \mu = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, pression radiale constante, sable d'Hostun RF dense*

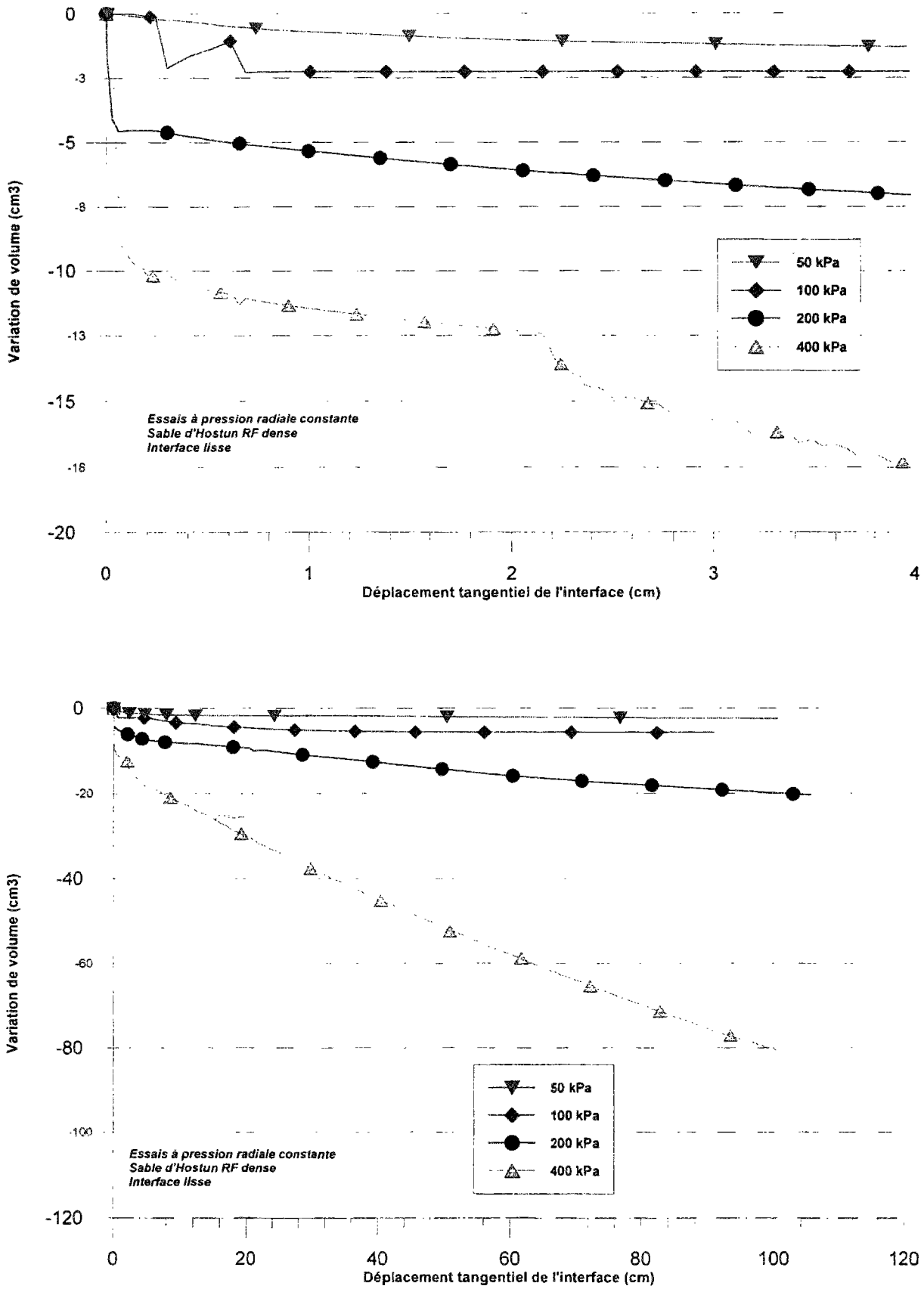


Figure III-23. *Courbes variation de volume de l'échantillon en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, pression radiale constante, sable d'Hostun RF dense*

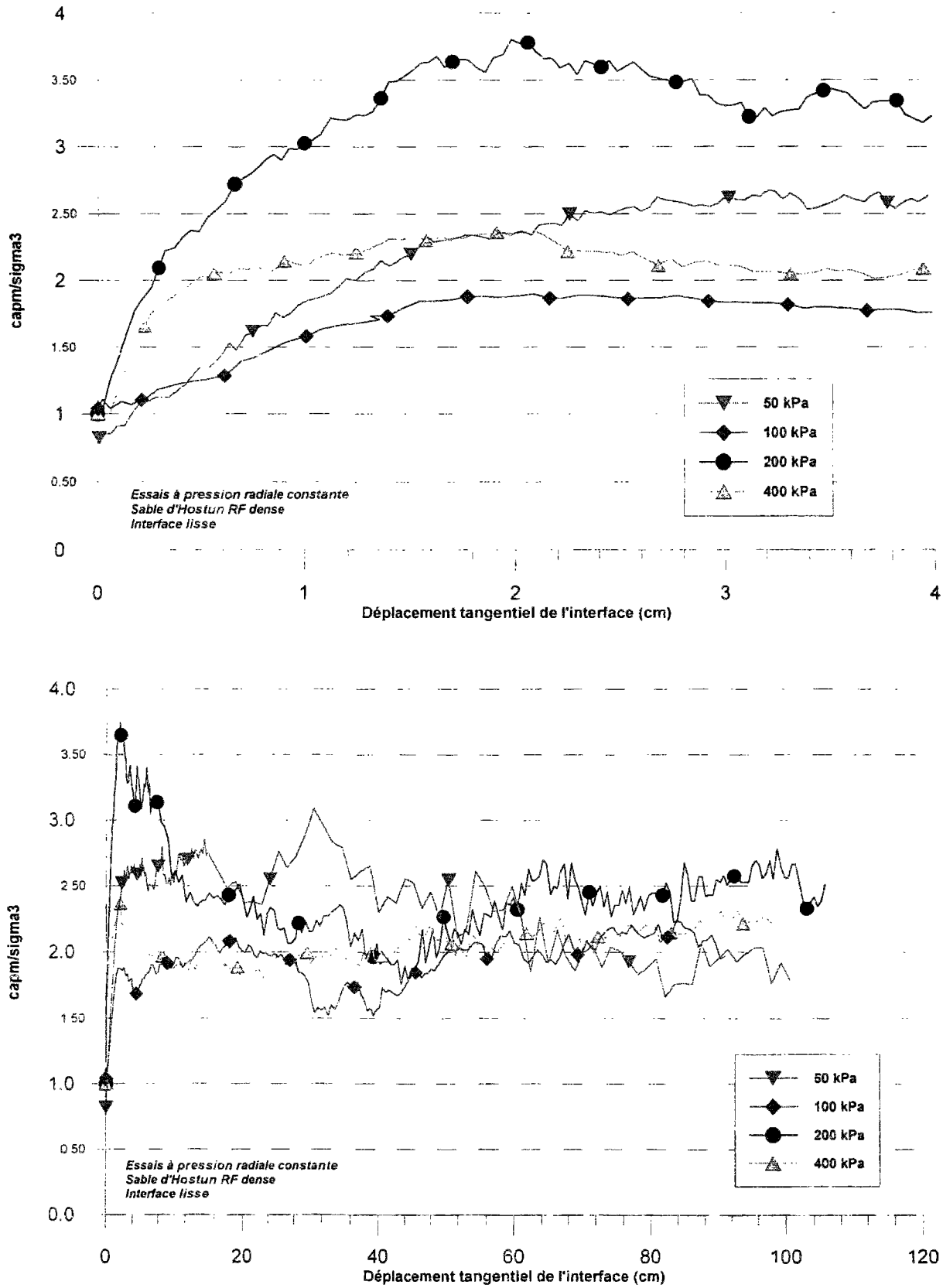


Figure III-24. *Courbes (capteur moyen/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, pression radiale constante, sable d'Hostun RF dense*

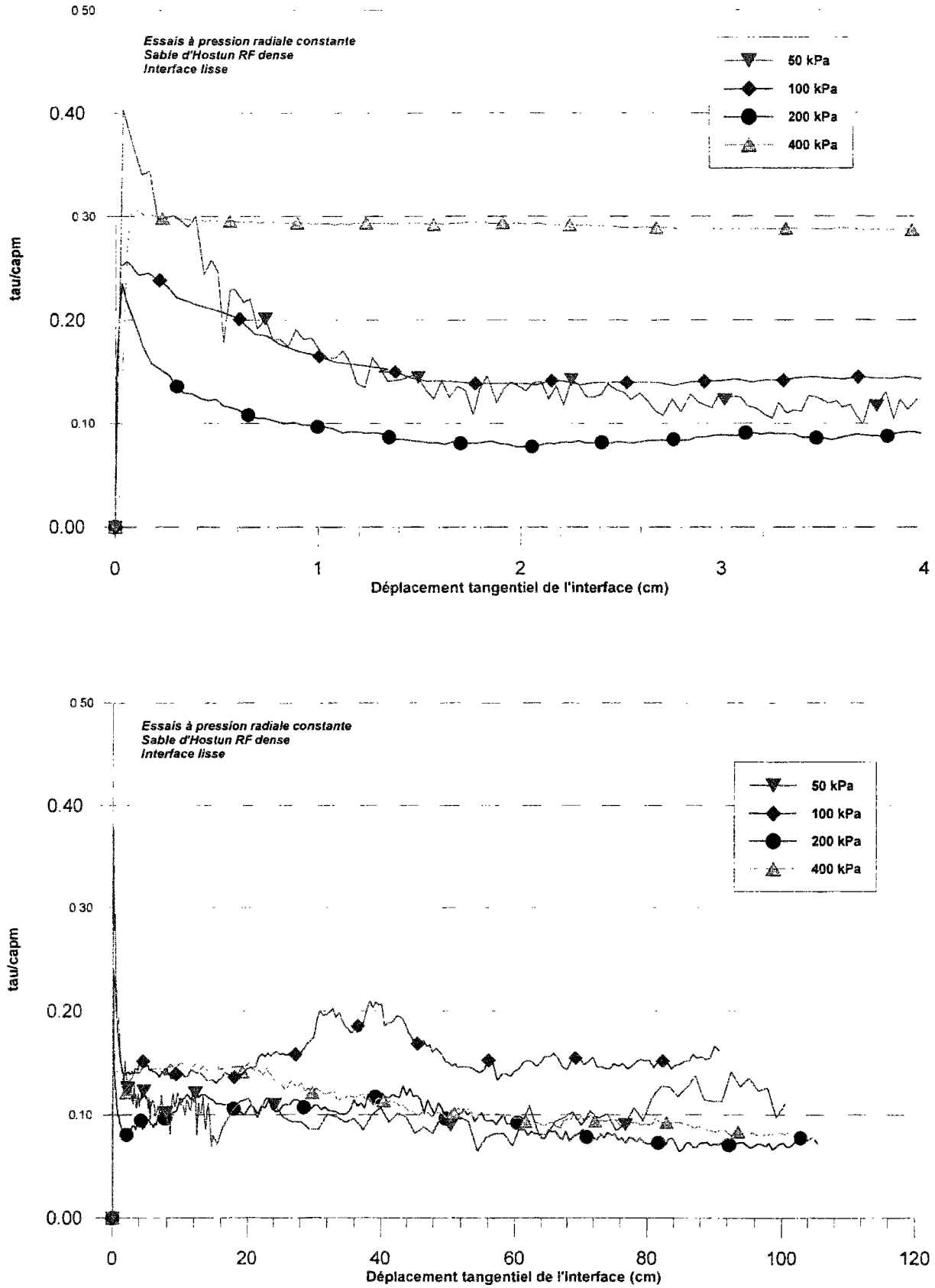


Figure III-25. *Courbes (μ_c = τ/capteur moyen) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, pression radiale constante, sable d'Hostun RF dense*

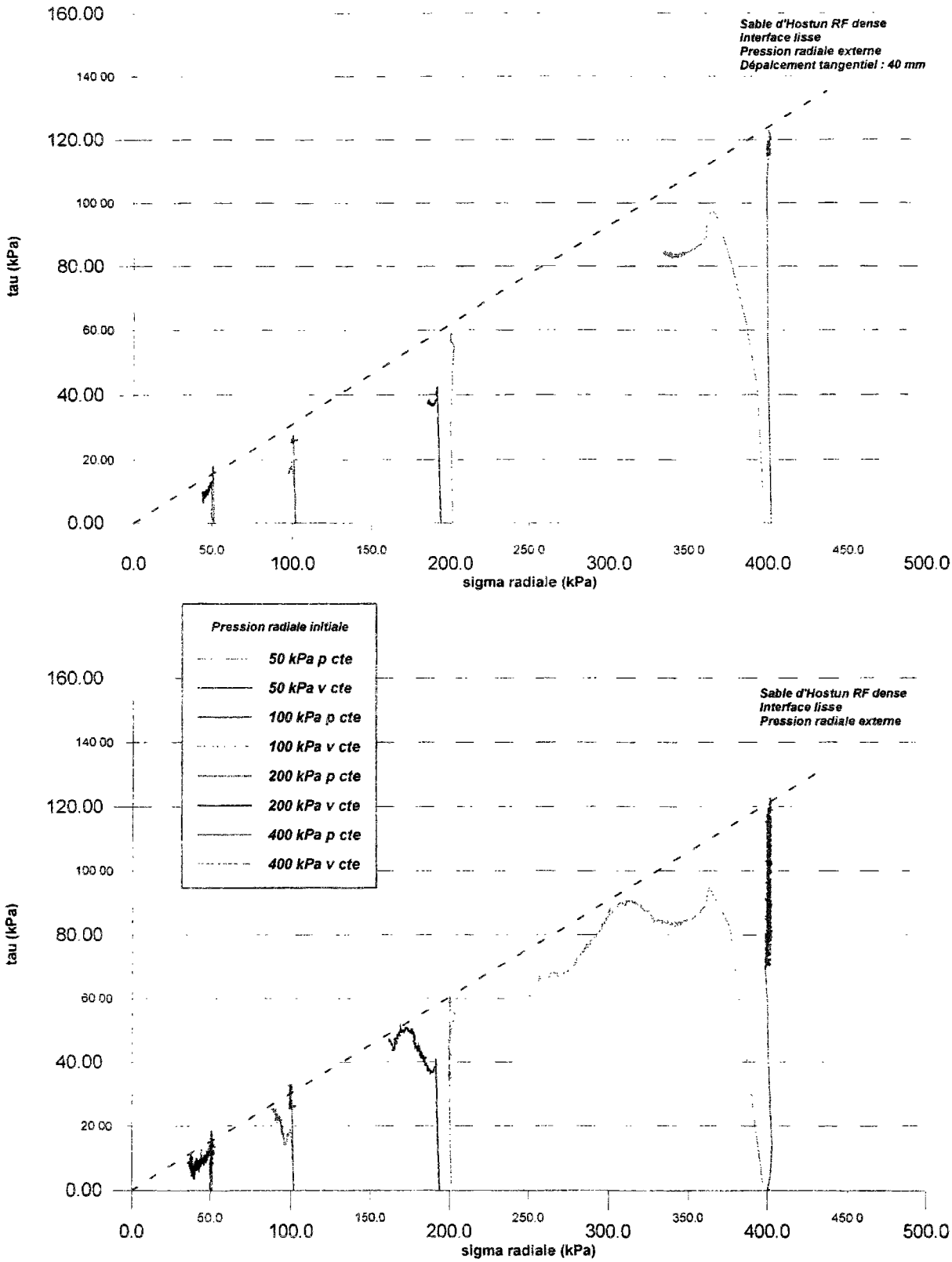


Figure III-26. *Chemins de contrainte (τ- σn) des essais à volume constant et à pression radiale constante; interface lisse, sable d'Hostun RF dense (σn : pression radiale externe)*

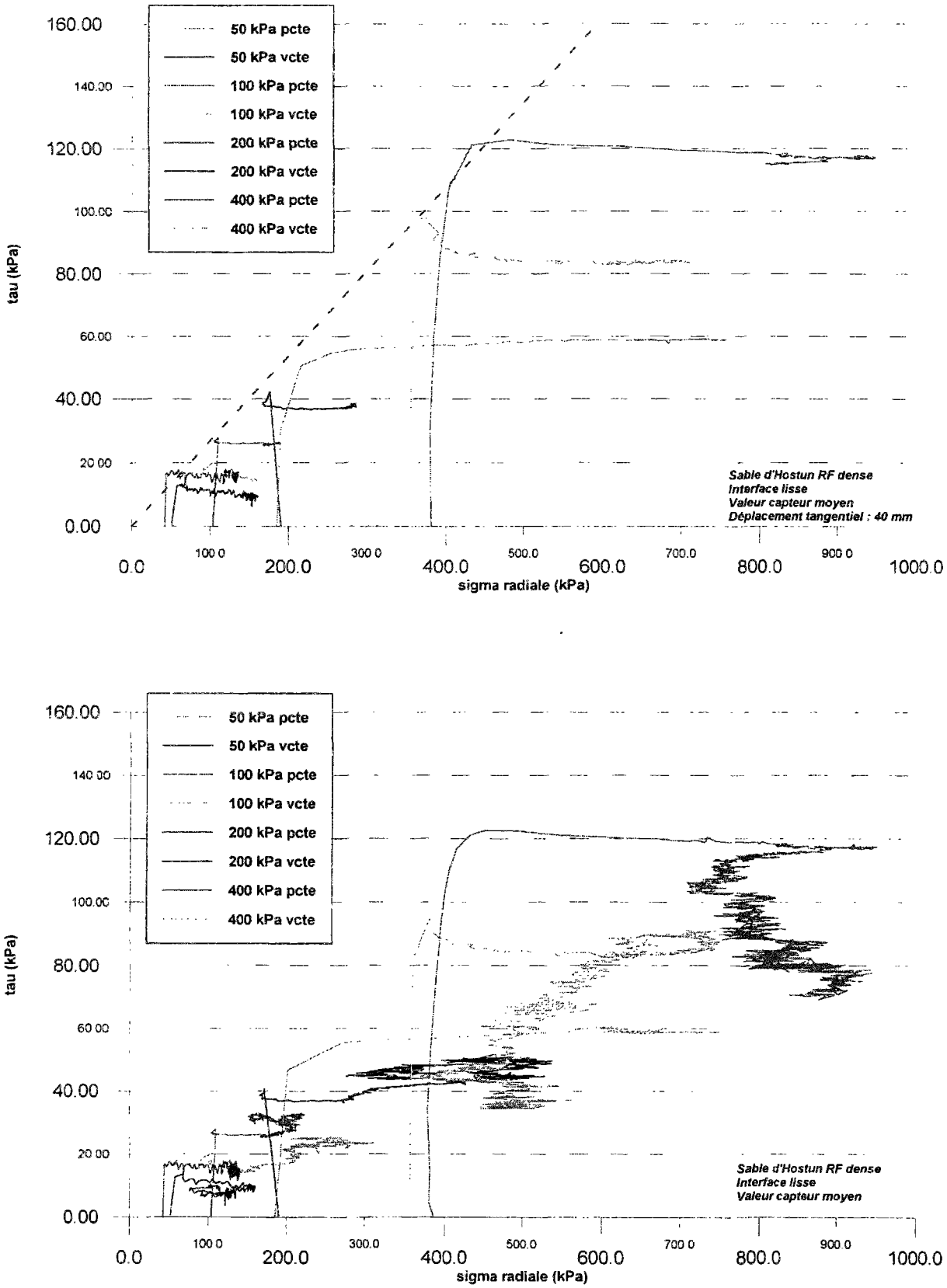


Figure III-27. *Chemins de contrainte (τ- σn) des essais à volume constant et à pression radiale constante; interface lisse, sable d'Hostun RF dense*
(σn : valeur moyenne des capteurs locaux)

III.4.1.2 Influence des conditions aux limites

Nous nous proposons de comparer les résultats obtenus sur le sable d'Hostun RF à pression radiale initiale constante et à volume constant. La figure III-28 présente les valeurs du coefficient de frottement apparent et du coefficient de frottement réel (déterminés à partir de la mesure faite avec les capteurs de contrainte normale dans l'interface) obtenues pour les huit essais réalisés sur des échantillons de sable dense avec une interface lisse.

Pour de petits déplacements tangentiels, les contraintes de cisaillement, pour les essais à pression radiale constante, atteignent des valeurs supérieures à celles obtenues lors des essais à volume constant puis restent sur un palier, alors que, pour les essais à volume constant, les contraintes de cisaillement présentent un pic plus prononcé puis un léger radoucissement. Pour de plus grands déplacements, les valeurs du coefficient de frottement pour les deux types d'essais deviennent très proches l'une de l'autre (à partir de 30 cm de déplacements tangentiels).

Les valeurs des coefficients de frottement obtenues à partir de la valeur moyenne des capteurs de contrainte totale dans l'interface sont très similaires. Cependant, comme nous l'avons déjà mentionné, nous observons une différence de comportement volumique dans l'interface : pour les essais à volume constant, nous observons une contractance initiale (jusqu'à 0,4 mm), puis de la dilatance et une seconde phase de contractance pour de grands déplacements tangentiels. Pour les essais à pression radiale constante, nous observons une phase initiale de dilatance, puis de la contractance et une seconde phase de dilatance. Ces différences de comportement ne seront pas confirmées par les essais sur le gravier d'Hostun 14~10.

Sur les figures III-26 et III-27, nous remarquons que les essais à pression radiale constante atteignent rapidement la droite de rupture alors que pour les essais à volume constant, celle-ci n'est atteinte que pour de grands déplacements. Il faut noter la bonne adéquation entre les différents essais au vu des chemins de contrainte.

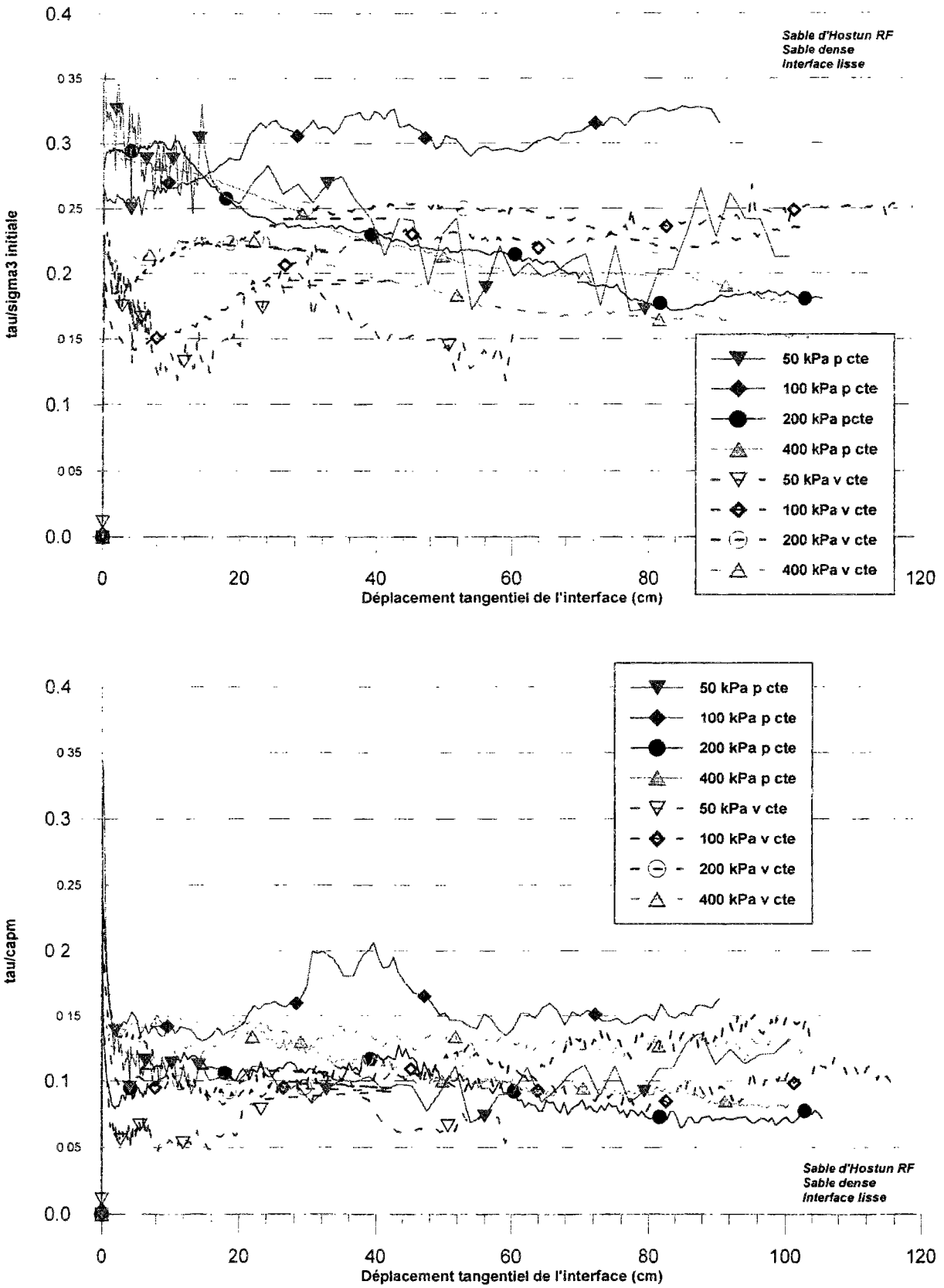


Figure III-28. *Comparaison des courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale)et ($\mu_c = \tau/capm$) en fonction du déplacement pour des essais à volume constant et à pression radiale constante ; interface lisse, sable d'Hostun RF dense*

III.4.1.3 Influence de l'état de compacité de l'échantillon

Pour mettre en évidence l'influence de l'état de compacité sur le comportement de l'interface, nous allons comparer, pour une interface lisse et une interface rugueuse, les résultats d'essais obtenus sur un échantillon dense et sur un échantillon lâche. Ces essais ont été réalisés pour une pression radiale initiale de 200 kPa, à volume constant.

Les figures III-29 à III-34 présentent une synthèse des résultats des essais avec une interface lisse, à partir d'échantillons de sable lâche et d'échantillons de sable dense. Nous ne présenterons que les résultats globaux obtenus dans chaque cas, les représentations spécifiques pour de faibles déplacements (jusqu'à 4 cm) se trouvant en annexe C.

Pour un sable lâche, après un léger pic pour de faibles déplacements ($\mu^* = 0,14$), la contrainte de cisaillement se stabilise pour de grands déplacements avec une valeur très faible ($\mu^* = 0,05$, correspondant à un angle de frottement de 3°).

Pour un sable dense, la contrainte de cisaillement, après un léger pic initial ($\mu^* = 0,22$) et un léger radoucissement, augmente jusqu'à une valeur de μ^* de 0,25 pour de grands déplacements (figure III-29).

La forte contractance de l'échantillon lâche est bien mise en évidence par la mesure de la valeur moyenne des capteurs de contrainte totale (figure III-32). La pression normale à l'interface diminue de 60% pour de grands déplacements. Ce phénomène, caractérisé par un angle de frottement apparent très faible (3°) et une diminution continue de la contrainte normale au sein de l'interface, s'apparente à un phénomène de liquéfaction (annulation des contraintes effectives au sein de l'interface).

Au contraire, pour un échantillon dense, la contractance initiale est suivie d'une forte dilatance (pression normale initiale multipliée par 2,5) puis par une seconde phase de contractance (figure III-32). La pression radiale appliquée globalement à l'échantillon

diminue de plus de 40% pour de grands déplacements pour un échantillon lâche contre 20% pour un échantillon dense (figure III-30).

L'étude du coefficient de frottement μ_c (figure III-33), rapport entre la contrainte de cisaillement et la moyenne des contraintes normales mesurées à partir des capteurs de contraintes normales, nous indique que, hormis pour de faibles déplacements où une légère différence apparaît, l'influence de la densité initiale est négligeable (à partir de deux centimètres de déplacement tangentiel et cela jusqu'à 1 mètre).

Ceci se retrouve sur la figure III-34, où sont représentés les chemins de contraintes. Les chemins déduits de la mesure locale de la contrainte normale viennent, à partir de faibles déplacements, sur une droite correspondant à un angle de frottement de 7°. Cette représentation met également en évidence la forte disparité de comportement, selon que l'on mesure un phénomène local ou bien un phénomène global.

La comparaison des essais réalisés avec une interface rugueuse, sur des échantillons de sable dense et des échantillons de sable lâche, sont présentés en annexe C. Ces résultats sont moins complets que ceux des essais réalisés avec une interface lisse, la mesure de la contrainte normale dans l'interface n'étant pas effectuée.

Les coefficients de frottement apparent μ^* et réel μ, obtenus sur des échantillons de sable dense et des échantillons de sable lâche, sont très différents (tableau III-5). Le coefficient de frottement apparent μ^* varie entre 0,18 et 0,10 pour un échantillon de sable lâche alors qu'il varie entre 0,55 et 0,40 pour un échantillon de sable dense. Des écarts similaires ont été obtenus pour le coefficient de frottement réel.

La mesure de la pression radiale montre, pour un sable lâche, une contractance globale de l'échantillon, alors que pour un échantillon de sable dense, après une contractance initiale, une dilatance globale de l'échantillon est mesurée, mettant en évidence la forte dilatance de la couche d'interface. A partir de 1 cm et pour de plus grands déplacements, après cette phase de dilatance, apparaît une phase de contractance continue, ce qui sera confirmé par les essais réalisés sur le gravier 14~10.

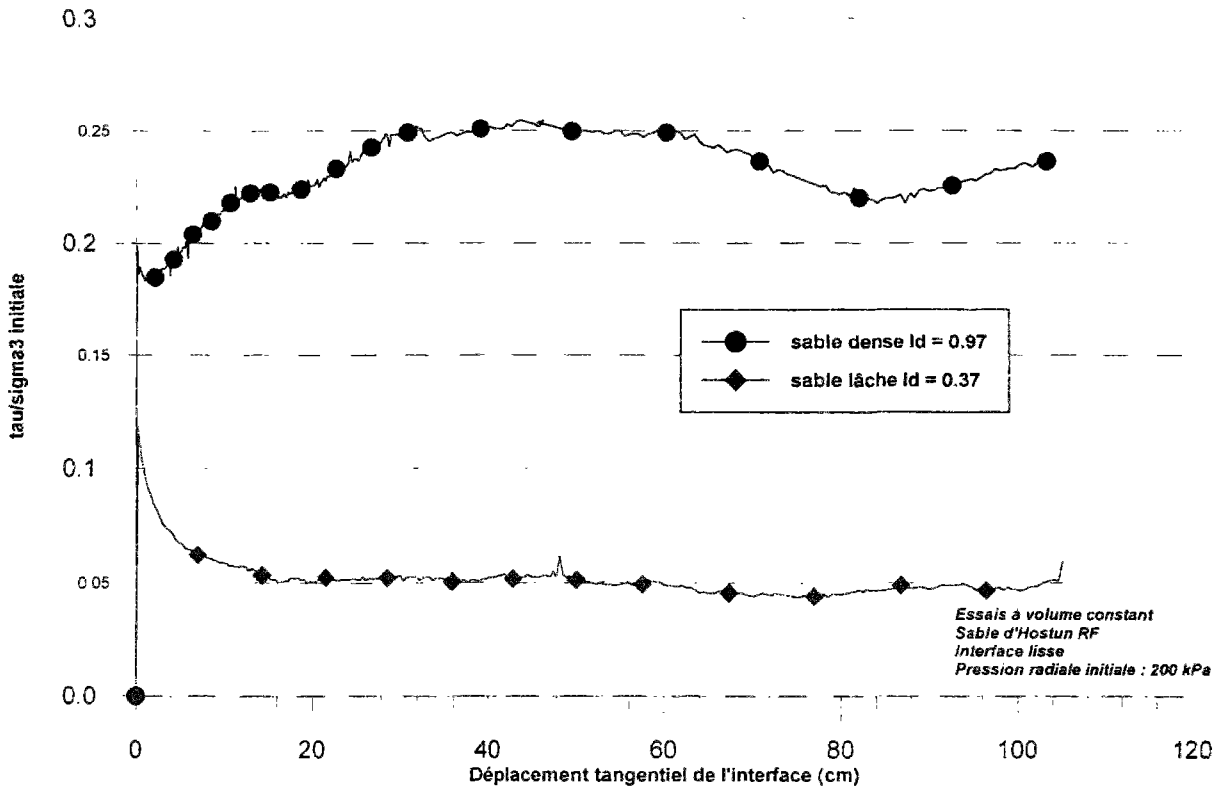


Figure III-29. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

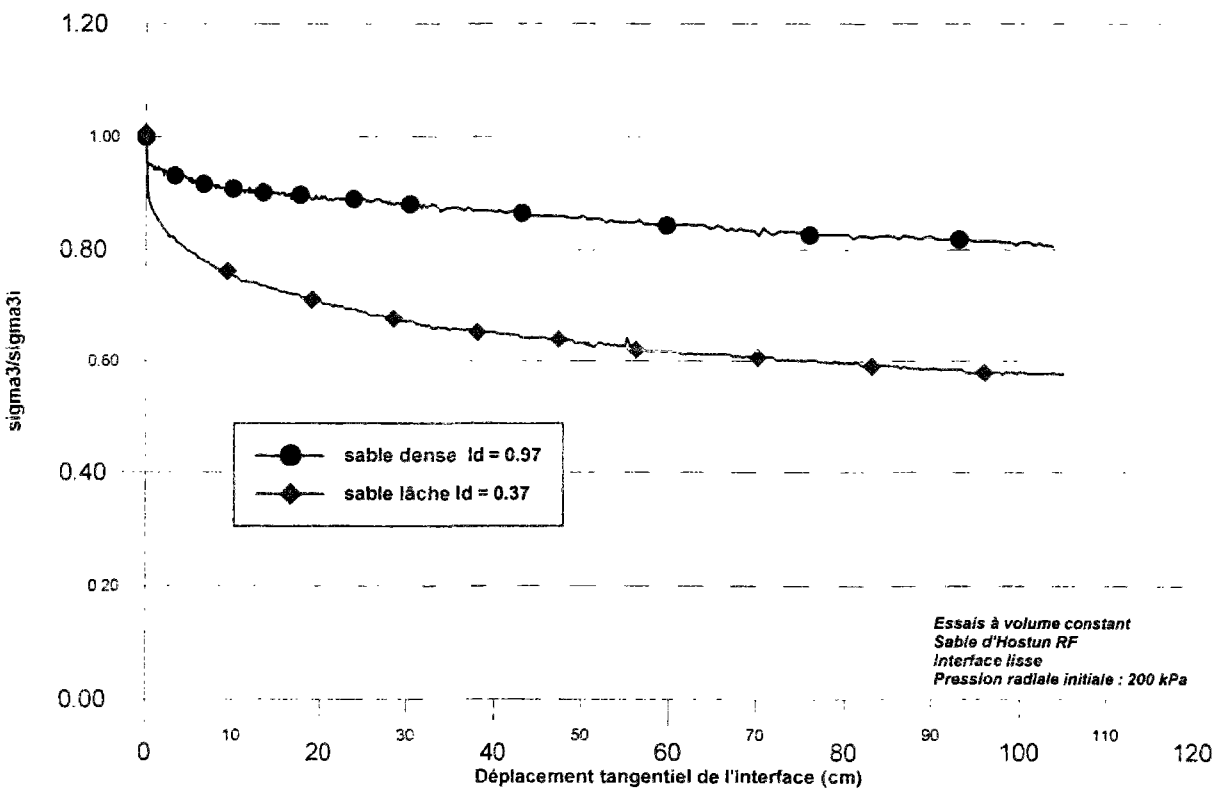


Figure III-30. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

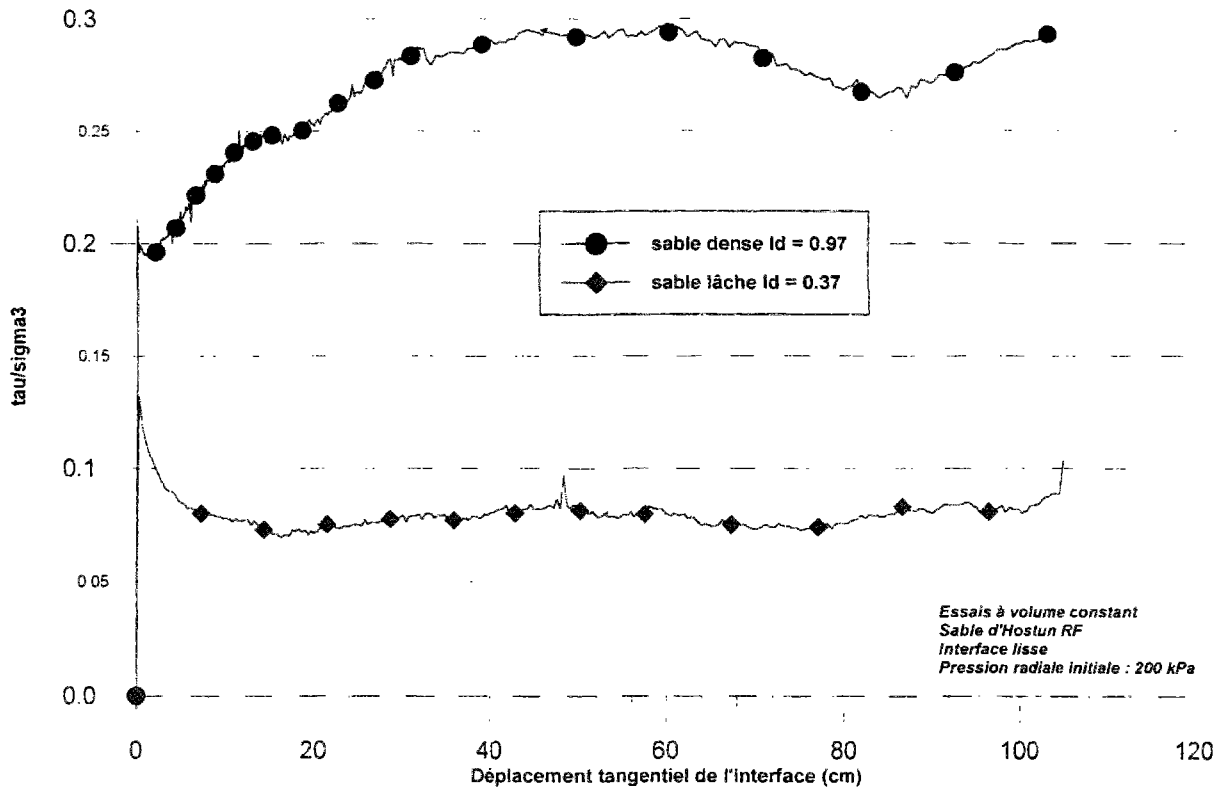


Figure III-31. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

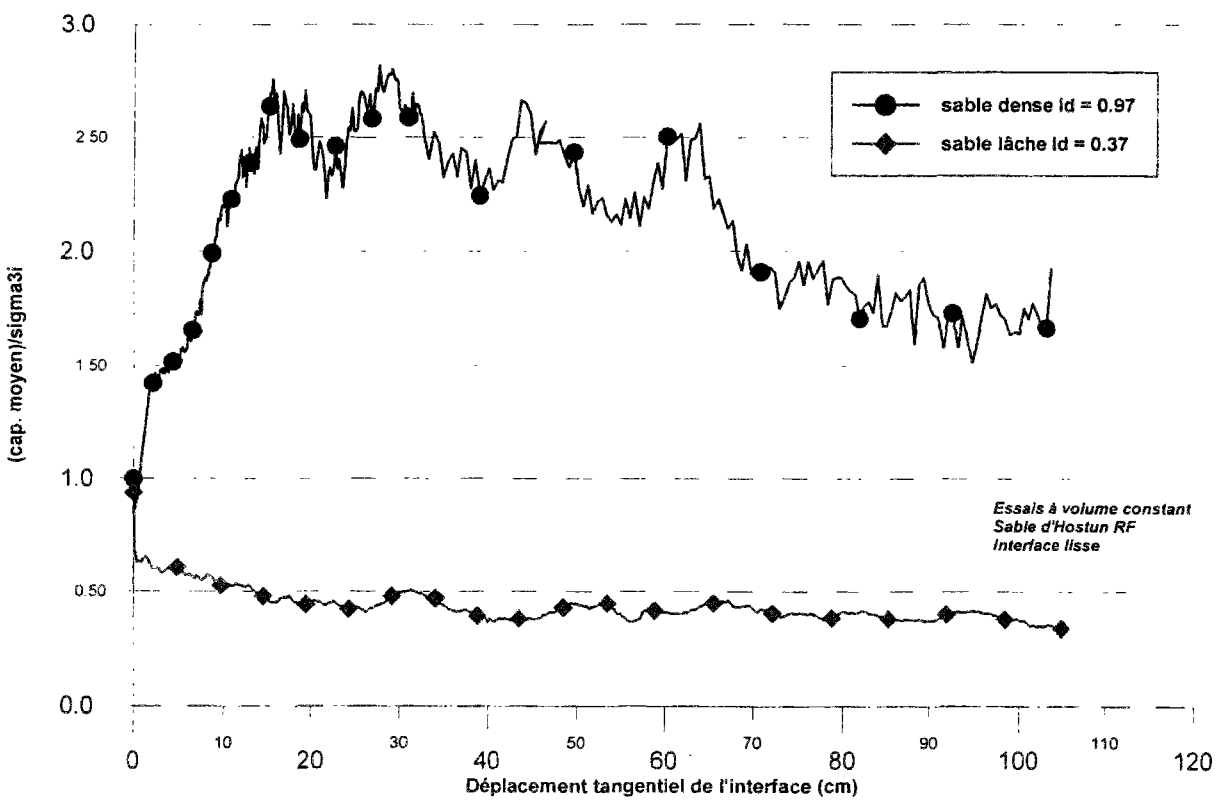


Figure III-32. *Courbes (capteur moyen/$\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

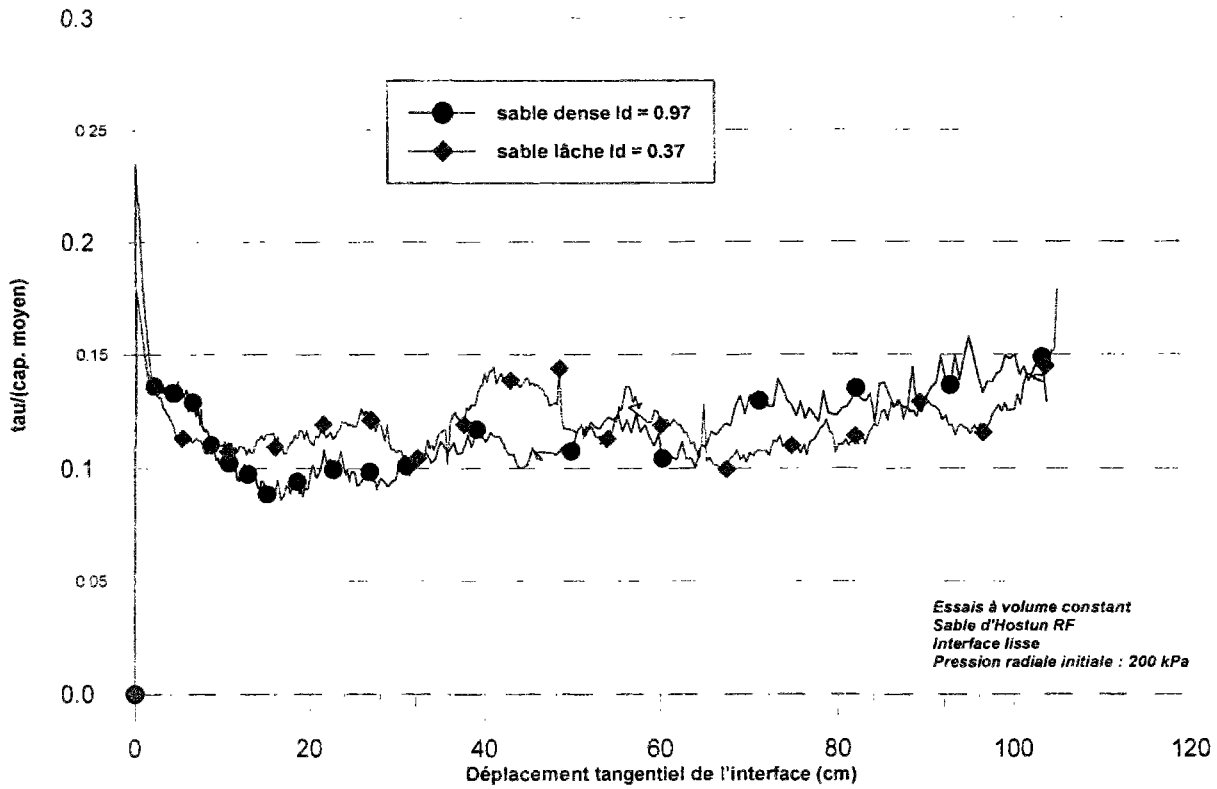


Figure III-33. *Courbes (μ_c = τ/capteur moyen) en fonction du déplacement tangentiel interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

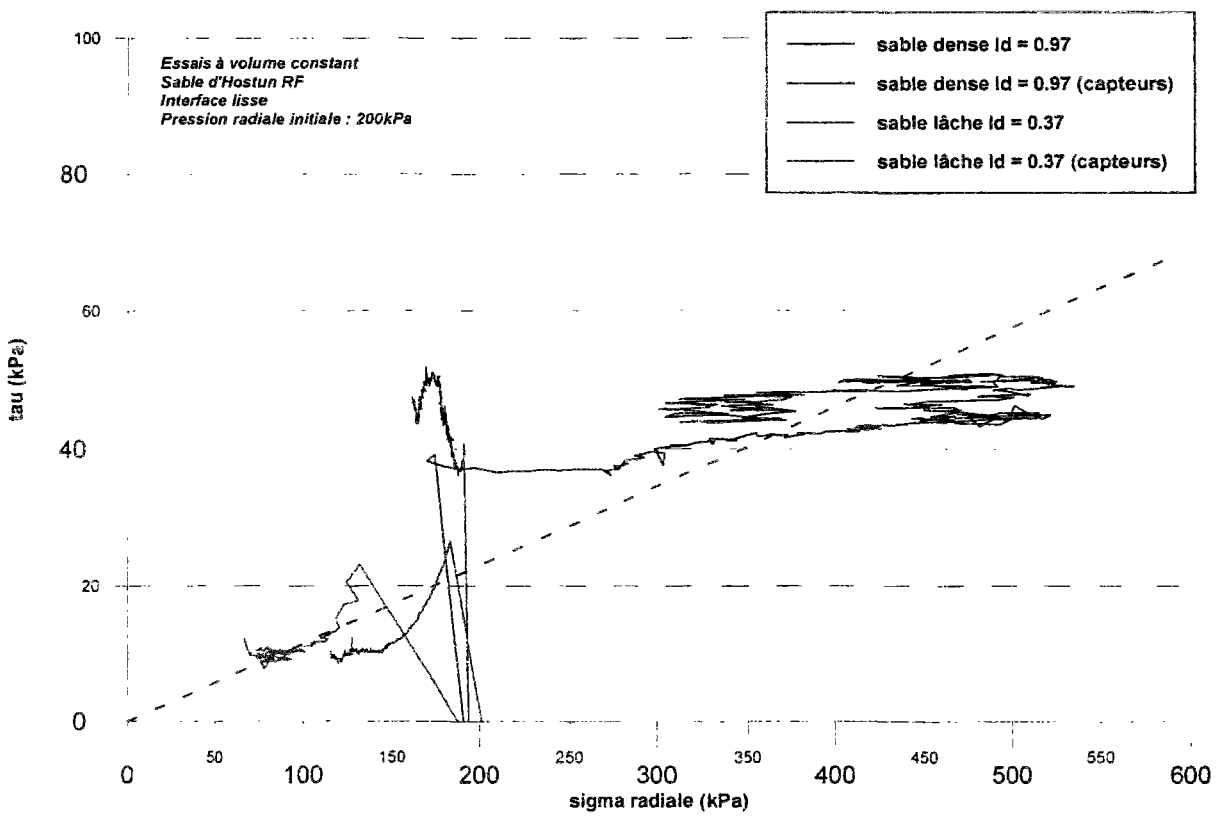


Figure III-34. *Chemins de contrainte (τ- σn) ; interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF dense et lâche*

III.4.1.4 Influence de la rugosité de l'interface

L'influence de la rugosité de la structure, représentée pour notre expérimentation par le cylindre métallique, est mise en évidence par la comparaison, pour un échantillon de sable dense et pour un échantillon de sable lâche, des résultats obtenus avec une interface lisse et une interface rugueuse. Ces essais ont été réalisés pour une pression radiale initiale de 200 kPa, à volume constant.

La synthèse des résultats des essais, avec un échantillon de sable dense, pour une interface lisse et pour une interface rugueuse, est présentée dans les figures III-35 à III-38. Nous ne retenons ici que les résultats globaux obtenus dans chaque cas, les représentations spécifiques pour de faibles déplacements (jusqu'à 4 cm) se trouvant en annexe D

Pour une interface rugueuse, la valeur de la contrainte de cisaillement obtenue à partir de la lecture du couplemètre est beaucoup plus irrégulière que celle obtenue pour une interface lisse (figure III-35). Pour de faibles déplacements et jusqu'à 10 cm, le coefficient de frottement apparent garde une valeur oscillant entre 0,50 et 0,55. Pour de plus grands déplacements, il diminue progressivement pour osciller entre 0,30 et 0,40. Pour une interface lisse, il augmente progressivement jusqu'à 0,25 pour 30 cm de déplacement avant de diminuer légèrement pour de plus grands déplacements.

La mesure de la pression radiale nous montre, pour une interface rugueuse, une contractance initiale (pour les premiers millimètres de cisaillement), puis une phase de dilatance jusqu'à 1 cm de déplacement avant de montrer une phase de contractance régulière pour de grands déplacements (figure III-36). Dans le cas d'une interface lisse, seulement une phase de contractance est observée, si l'on ne tient pas compte des lectures des capteurs de contraintes totales. Ceci se traduit par des coefficients de frottement réel pour une interface lisse et une interface rugueuse beaucoup plus proches, pour de grands déplacements, que les coefficients de frottement apparent (figure III-37).

Le chemin de contrainte, pour une interface rugueuse, devient tangent à une droite de rupture associé à un angle de frottement de 27°, avant de redescendre sur une droite correspondant à une résistance résiduelle (en grands déplacements), d'angle de frottement 14°. Cette droite représente également la droite de rupture pour l'essai avec une interface lisse (figure III-38).

La comparaison des essais réalisés sur des échantillons de sable lâche, avec une interface lisse et avec une interface rugueuse, est présentée en annexe D.

Les coefficients de frottement apparent μ^* et réel μ, obtenus avec une interface lisse, sont très faibles (correspondant pour de grands déplacements à un angle de frottement de l'ordre de 3°), ceux obtenus avec une interface rugueuse leur étant approximativement deux fois supérieurs pour de grands déplacements.

La mesure de la pression radiale montre des valeurs très similaires pour une interface lisse et pour une interface rugueuse, avec une baisse de 40% pour des déplacements de l'ordre de 1 mètre. Les chemins de contrainte suivis ont une allure similaire, la contrainte de cisaillement pour une interface lisse étant plus faible que pour une interface rugueuse.

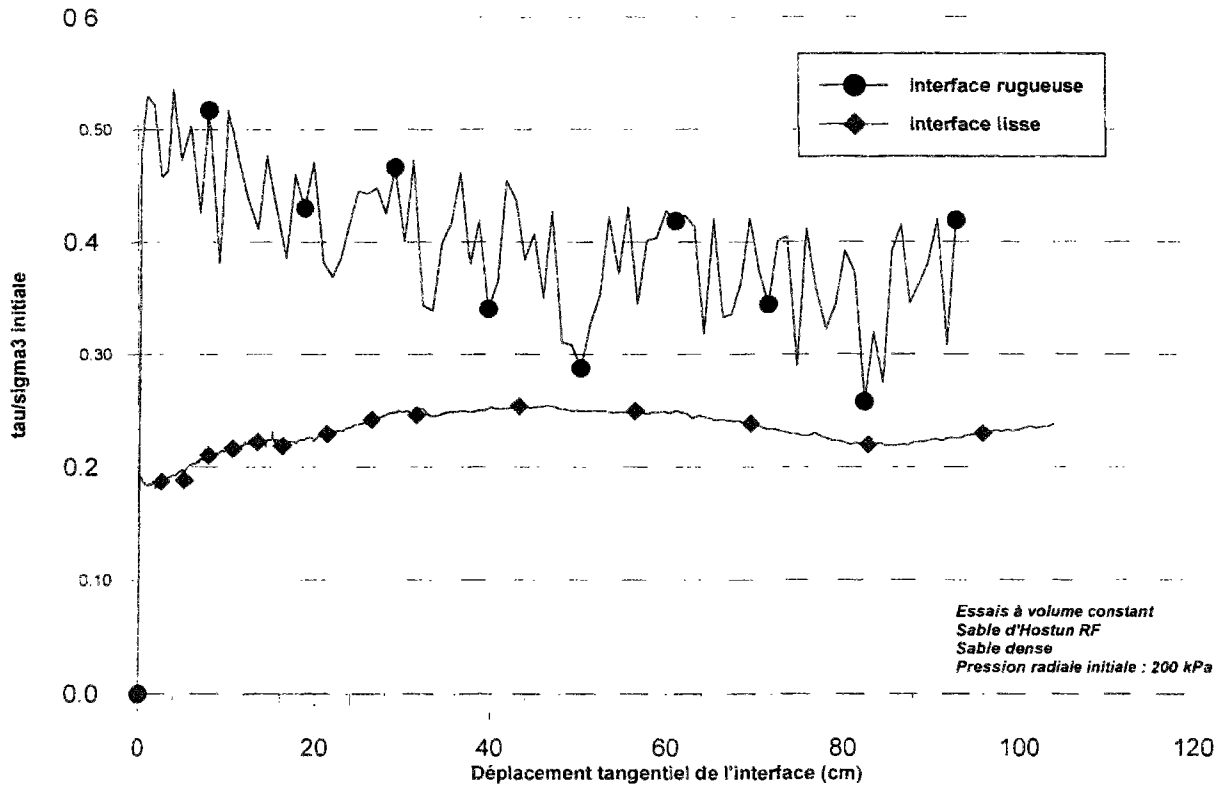


Figure III-35. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

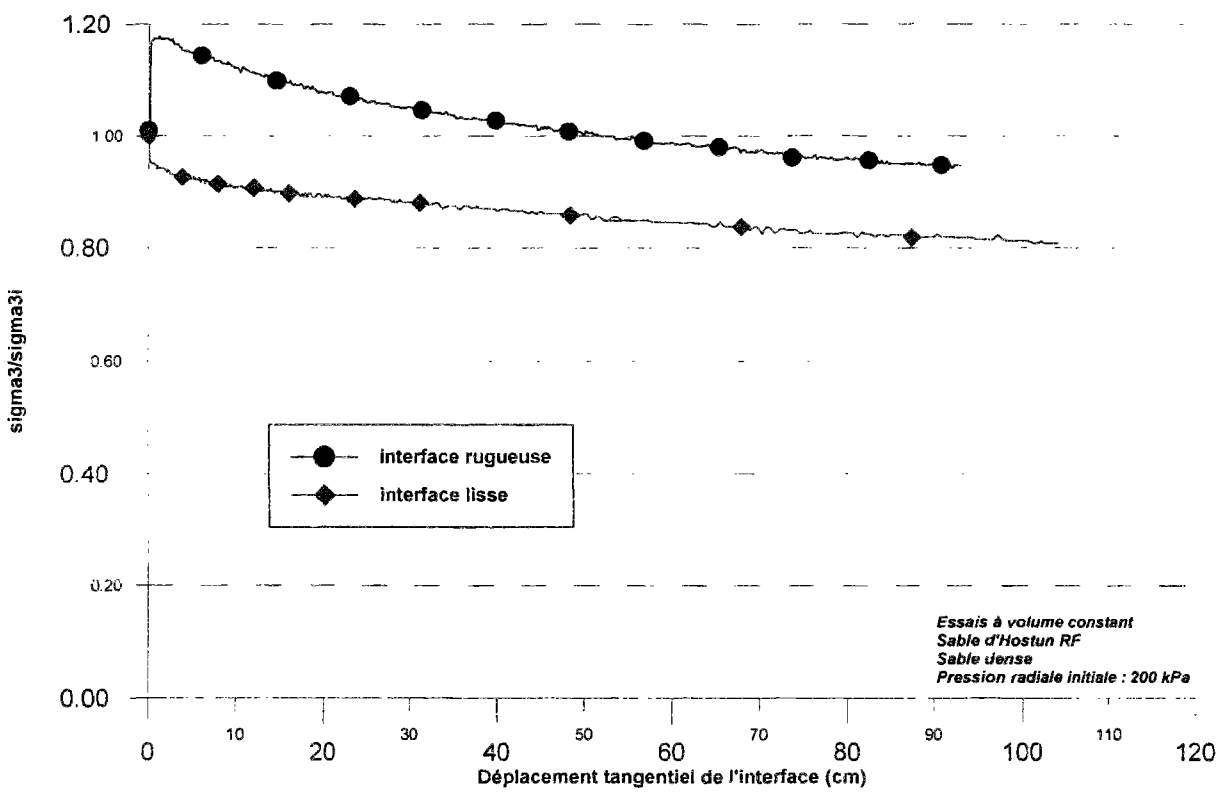


Figure III-36. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

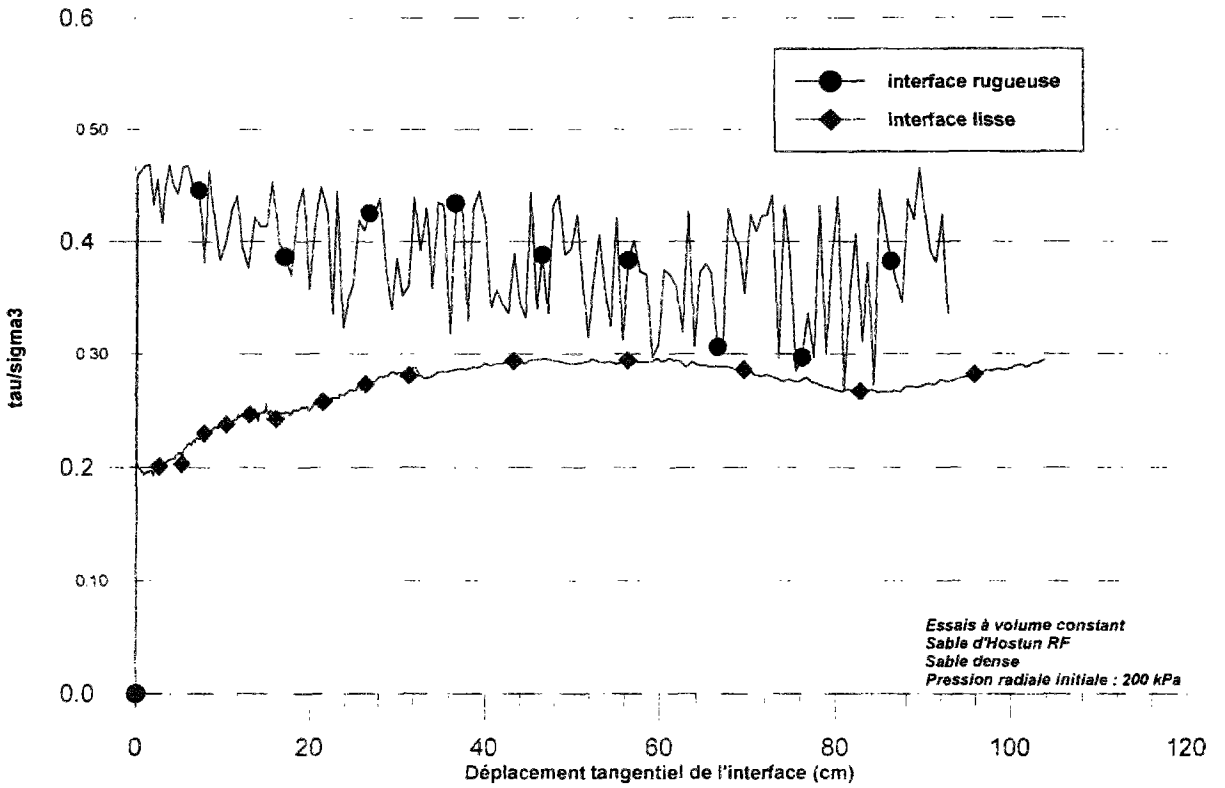


Figure III-37. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

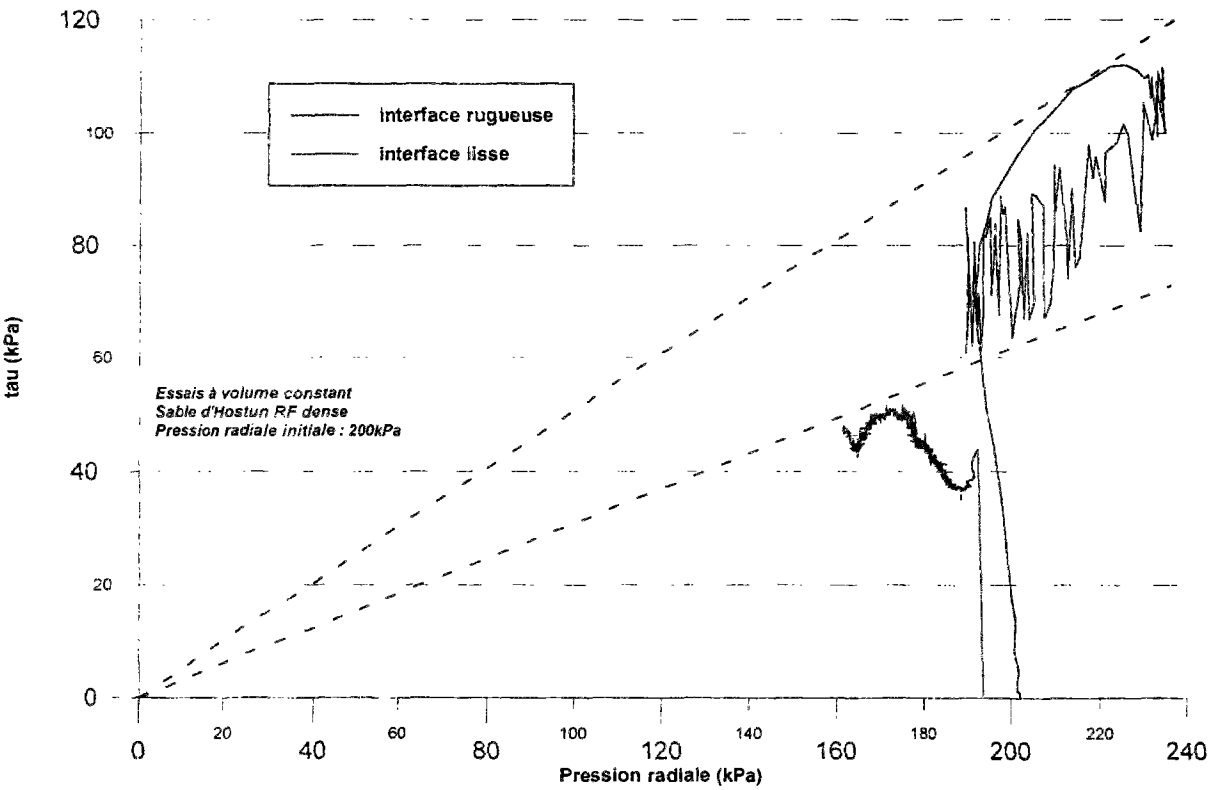


Figure III-38. *Chemins de contrainte (τ- σn) sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

III.4.2. Résultats obtenus avec le gravier d'Hostun 14~10

Le tableau III-6 présente les valeurs des coefficients de frottement obtenues à partir des différents essais. Ces valeurs de coefficient ont été déterminées pour différents déplacements tangentiels, 2 millimètres, 2 centimètres et 80 cm. Ces valeurs sont différentes de celles retenues pour les essais sur le sable d'Hostun 14~10 car, d'une part, le pic de la contrainte de cisaillement apparaît plus tard (le D_{50} du gravier 14~10 est 10 fois supérieur au D_{50} du gravier 14~10) et, d'autre part, les essais ont souvent été arrêtés pour des déplacements plus faibles.

Tableau III-6. *Résultats des essais sur le gravier d'Hostun 14~10*

(μ* : coefficient de frottement apparent, μ : coefficient de frottement réel)

inter.	comp.	cond.	*50 kPa*		*100 kPa*		*200 kPa*		*400 kPa*		*600 kPa*	
			μ*	μ	μ*	μ	μ*	μ	μ*	μ	μ*	μ
lisse	lâche	volume constant					0,11	0,14				
							0,08	0,10				
							0,06	0,15				
	dense	volume constant					0,17	0,16				
							0,14	0,15				
							0,12*	0,14*				
rugueuse	lâche	pression radiale const.					0,18				2 mm	
							0,14				2 cm	
							0,20*				80 cm	
		volume constant					0,22	0,26			20 cm	
							0,14	0,20				
							0,13*	0,25*				
	dense	pression radiale const.	0,46		0,65		0,48		0,51		0,38	
			0,40		0,60		0,50		0,46		0,40	
			0,30		0,46		0,38*		0,27		0,18	
		volume constant	0,46	0,41	0,60	0,58	0,42	0,42	0,28	0,36	0,28	0,38
			0,51	0,36	0,86	0,48	0,84	0,42	0,46	0,37	0,42	0,36
			0,37	0,28	0,70	0,36	*0,60**	*0,32**	0,20	0,24	0,15	0,18

III.4.2.1 Influence de la pression radiale initiale

a. Essais à volume constant

Les figures III-39 à III-42 présentent une synthèse des essais de cisaillement simple annulaire réalisés à volume constant, avec une interface rugueuse, sur du gravier d'Hostun 14~10 dense, avec des pressions radiales initiales de 50, 100, 200, 400 et 600 kPa.

La valeur maximale de la contrainte de cisaillement $\tau_{max.}$ est obtenue pour des valeurs du déplacement tangentiel de l'ordre de 2 centimètres (figure III-39). Ce pic est atteint plus rapidement pour de fortes valeurs de la pression radiale initiale. Le coefficient de frottement apparent est plus élevé pour les pressions radiales initiales de 100 et 200 kPa que pour les pressions radiales initiales de 50, 400 et 600 kPa ($\mu^* = 0,86$ pour 100 kPa et $\mu^* = 0,42$ pour une pression radiale initiale de 600 kPa). Les résultats obtenus à 50 kPa de pression radiale initiale sont situés entre ceux obtenus pour 100 / 200 kPa d'une part, et 400 / 600 kPa d'autre part.

La figure III-41 représente l'évolution de la pression radiale appliquée à l'échantillon au cours du cisaillement. Une contractance initiale apparaît pour les 2 ou 3 premiers millimètres de déplacement pour les essais à 200, 400 et 600 kPa de pression radiale initiale. Cette contractance initiale est plus marquée pour les fortes valeurs de la pression radiale initiale. Ensuite une phase de dilatance se développe pendant cinq centimètres de déplacement. L'augmentation de la pression radiale est plus forte pour de faibles valeurs initiales (2 fois la pression radiale initiale pour 100 et 200 kPa; 1,15 fois la pression radiale initiale pour 600 kPa), l'essai à 50 kPa étant encore intermédiaire. Pour de grands déplacements, la pression radiale diminue progressivement.

Les valeurs des coefficients de frottement réel sont inférieures à celles des coefficients de frottement apparent, mais sont moins dispersées.

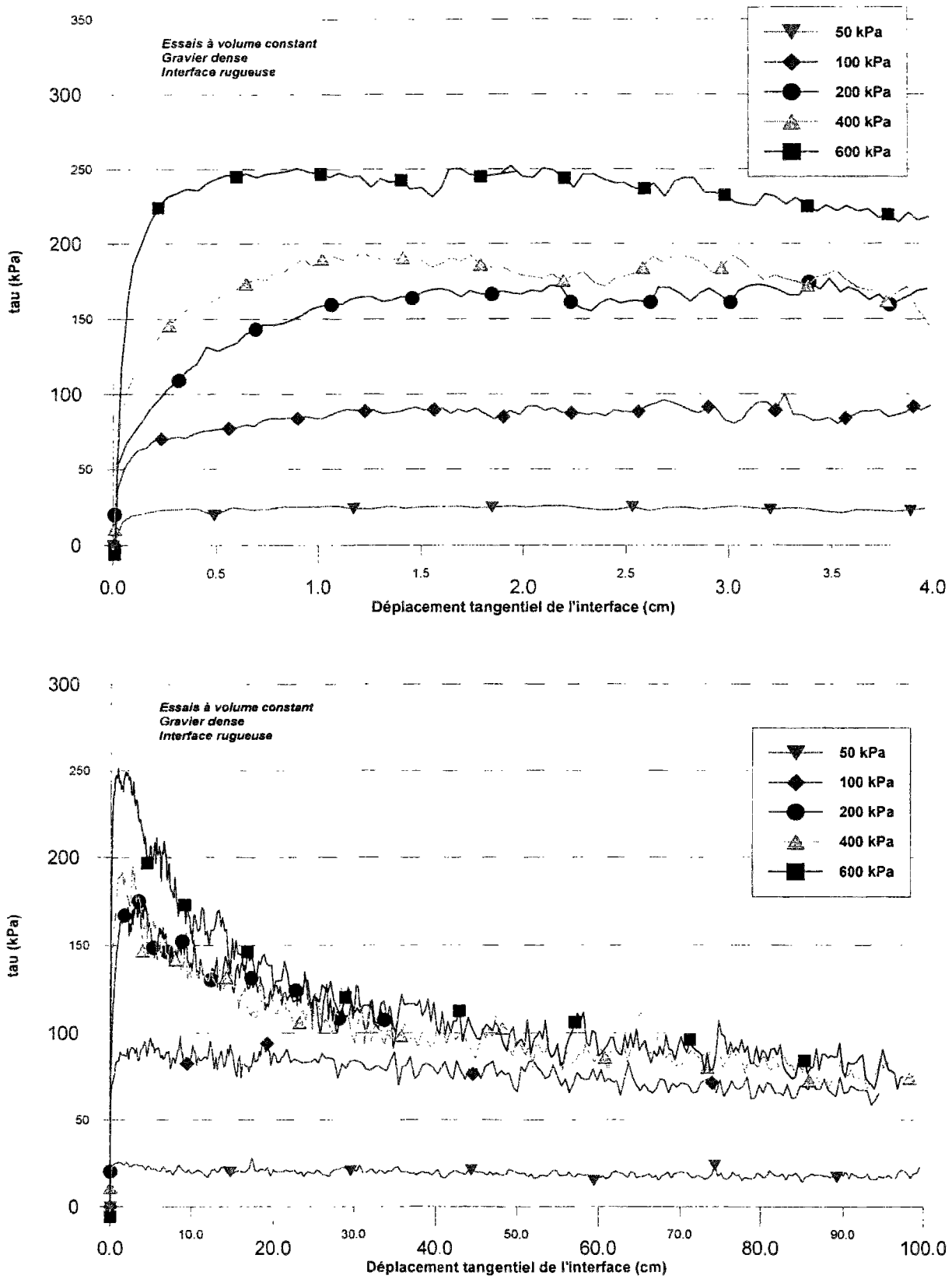


Figure III-39. *Courbes contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 dense*

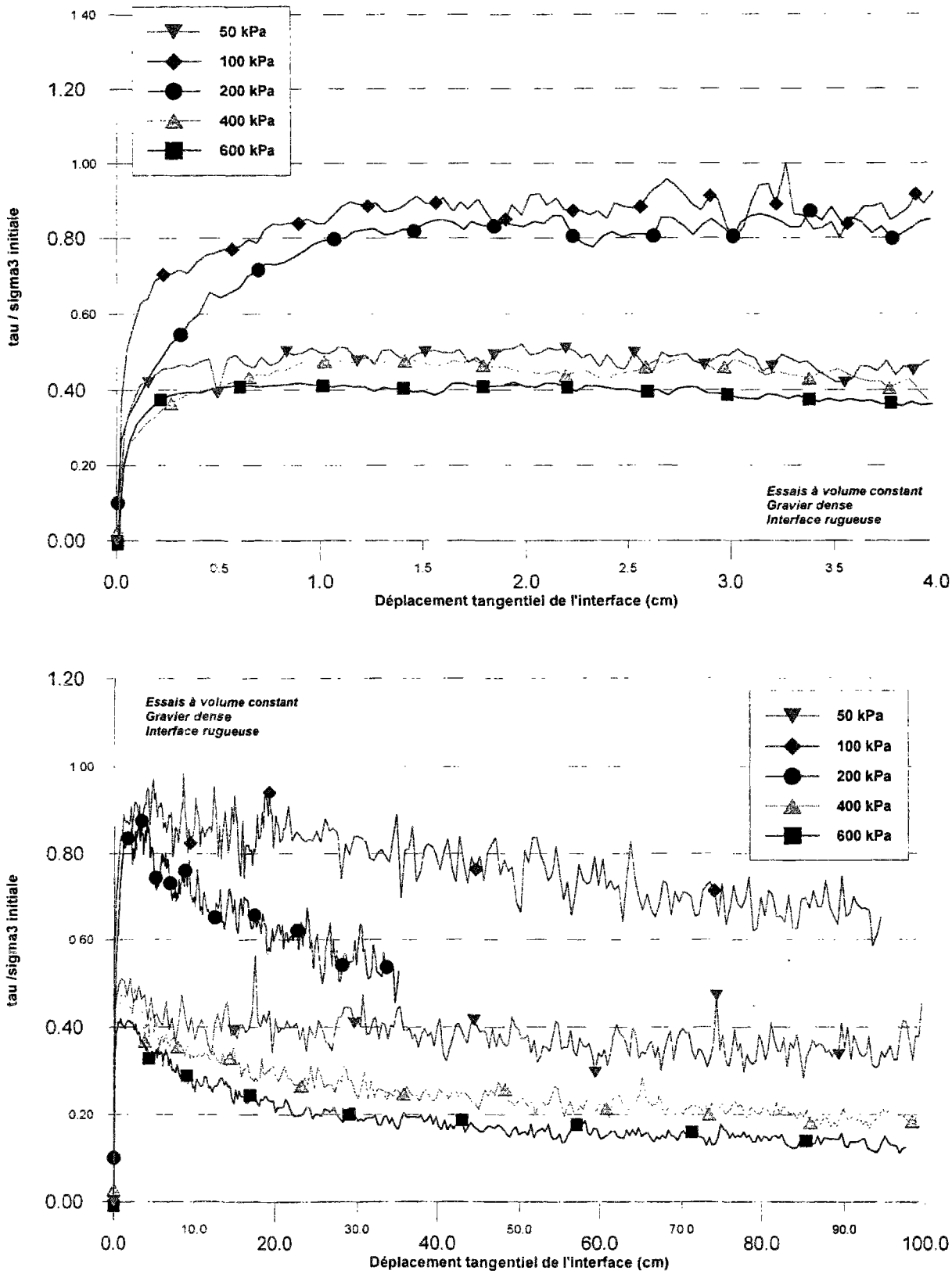


Figure III-40. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 dense*

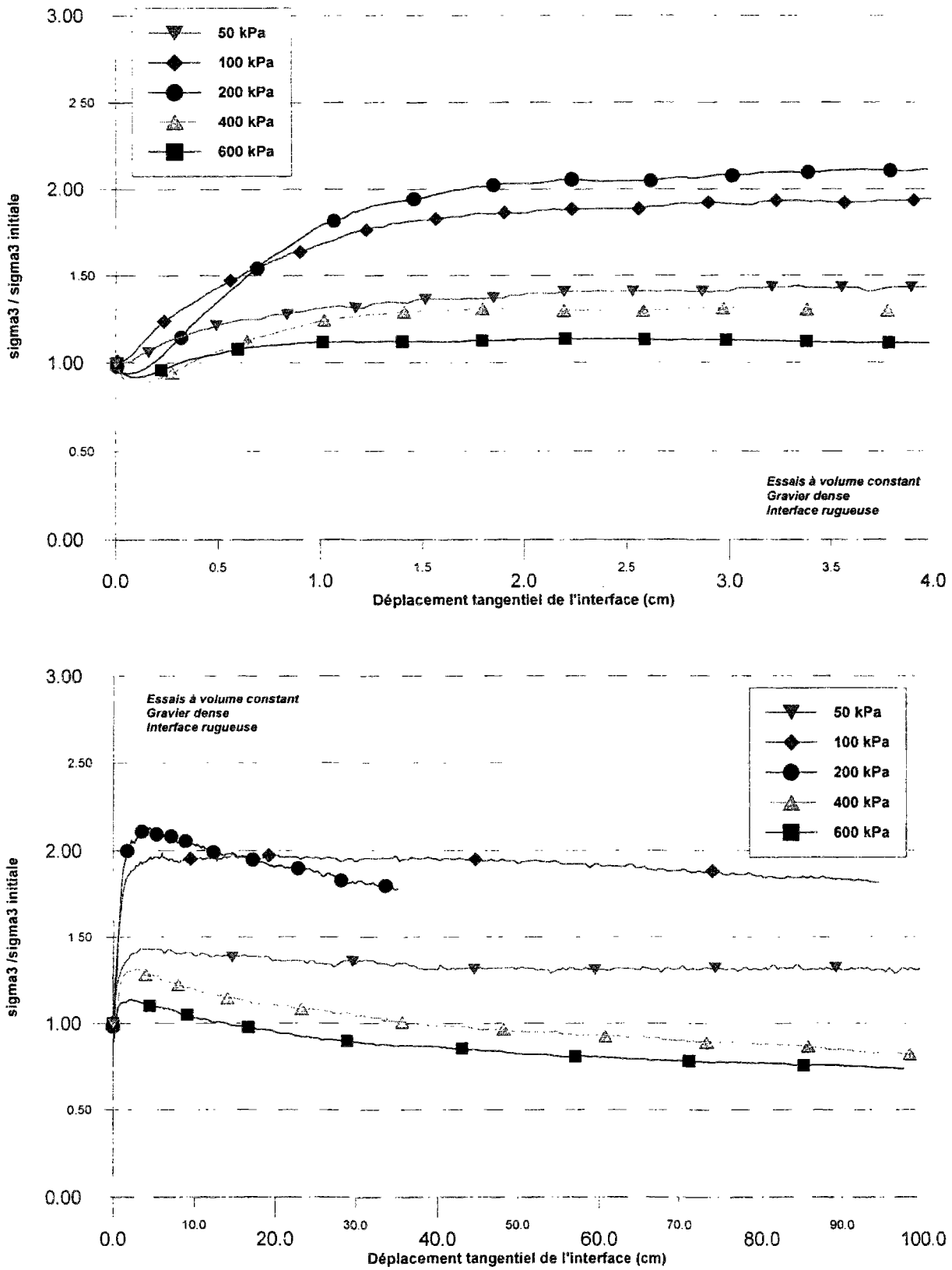


Figure III-41. *Courbes (σ3/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 dense*

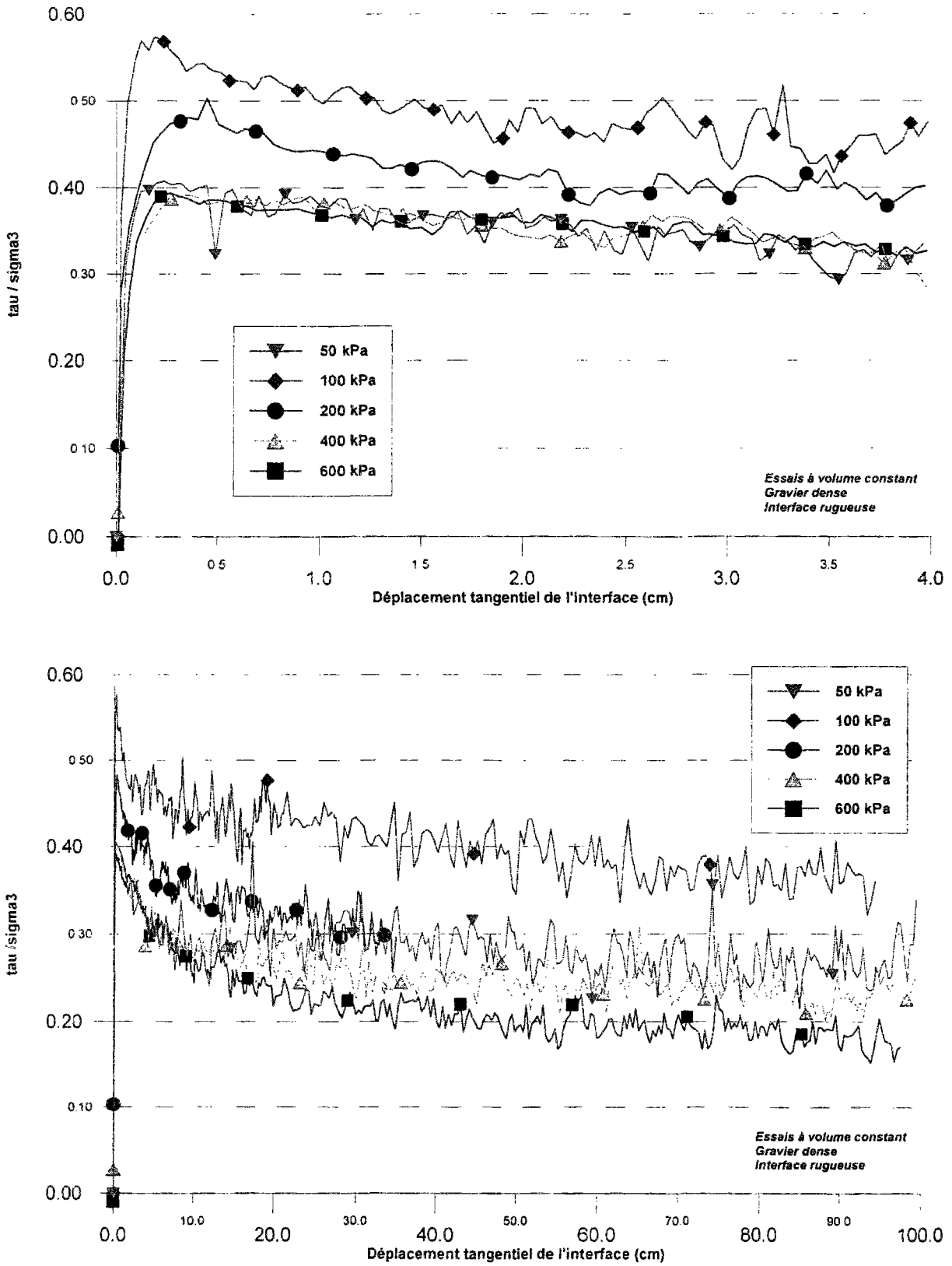


Figure III-42. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 dense*

b. Essais à pression radiale constante

Une synthèse des essais de cisaillement simple annulaire réalisés à pression normale constante, avec une interface rugueuse, sur du gravier d'Hostun 14~10 dense, avec des pressions radiales initiales de 50, 100, 200, 400 et 600 kPa, est présentée dans les figures III-43 à III-45.

Ces résultats sont très similaires à ceux obtenus à volume constant. La valeur maximale de la contrainte de cisaillement est atteinte pour un déplacement plus faible que pour les essais à volume constant, et elle augmente également avec la valeur de la pression radiale initiale (figure III-43). Pour de plus grands déplacements, la contrainte de cisaillement diminue régulièrement.

La mesure globale de la variation de volume montre une phase de contractance initiale pour les essais à 200, 400 et 600 kPa, comme pour les essais à volume constant, et également pour l'essai à 100 kPa (figure III-45). La phase de dilatance qui suit la contractance initiale est plus marquée pour les faibles valeurs de la pression radiale initiale. Pour les essais à 400 et 600 kPa, une seconde phase de contractance apparaît à partir d'un déplacement tangentiel de 5 cm. Cette différence de comportement observée peut s'expliquer par une rupture des grains et une production de fines particules augmentant avec la pression radiale est importante.

c. Chemins de contrainte

La figure III-46 présente les chemins de contrainte dans le plan (contrainte de cisaillement - contrainte normale) des dix essais que nous avons interprétés précédemment. La figure supérieure correspond aux chemins obtenus pour un déplacement tangentiel limité à 40 mm. Sept des huit essais permettent de déterminer une droite de rupture correspondant à un angle de frottement de 23°. Seule la contrainte de cisaillement maximale obtenue pour l'essai à pression radiale constante à 400 kPa dépasse cette droite. Pour de grands déplacements, les chemins redescendent de façon très similaire, indépendamment de la pression radiale initiale.

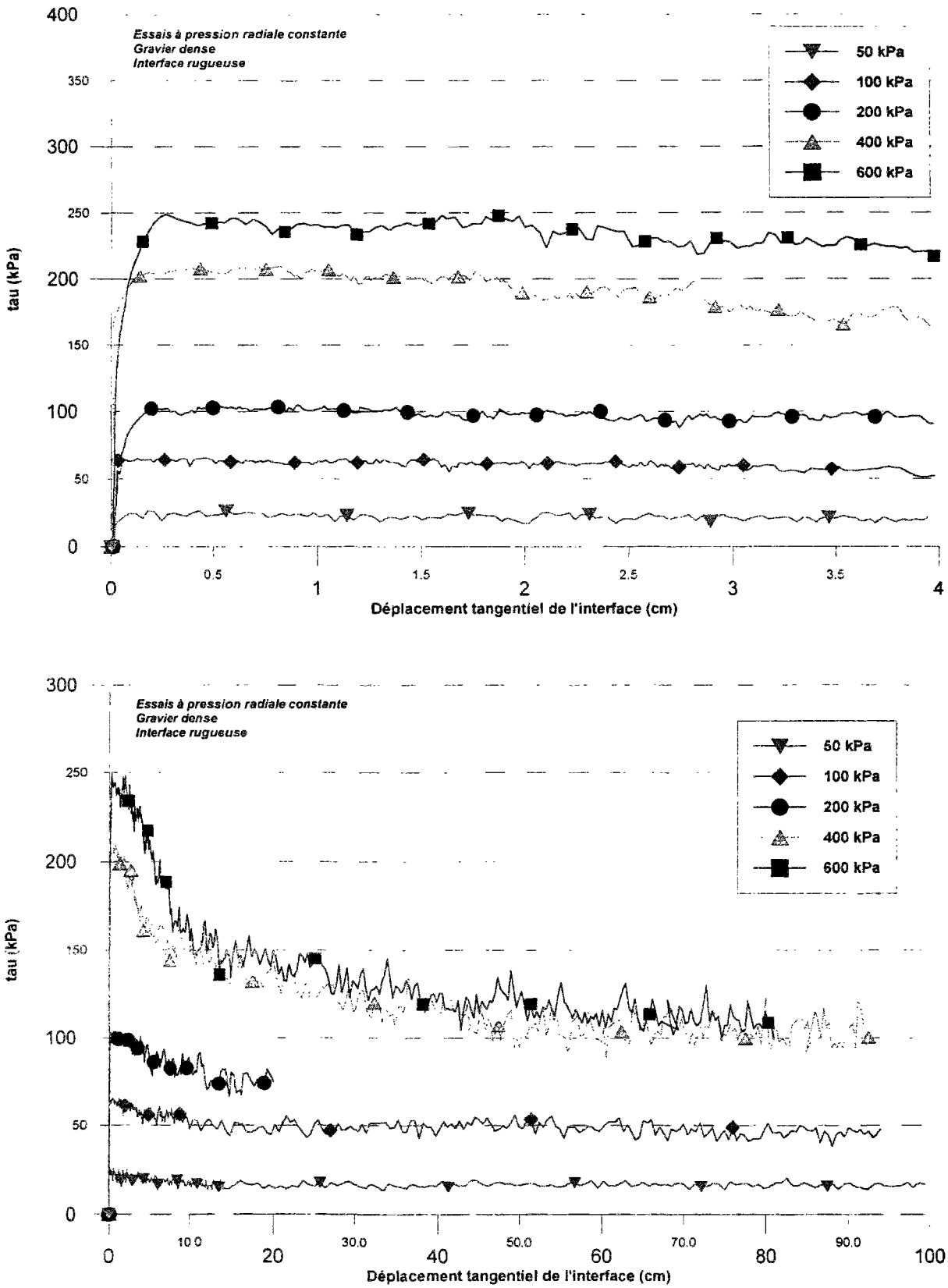


Figure III-43. *Courbes contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 dense*

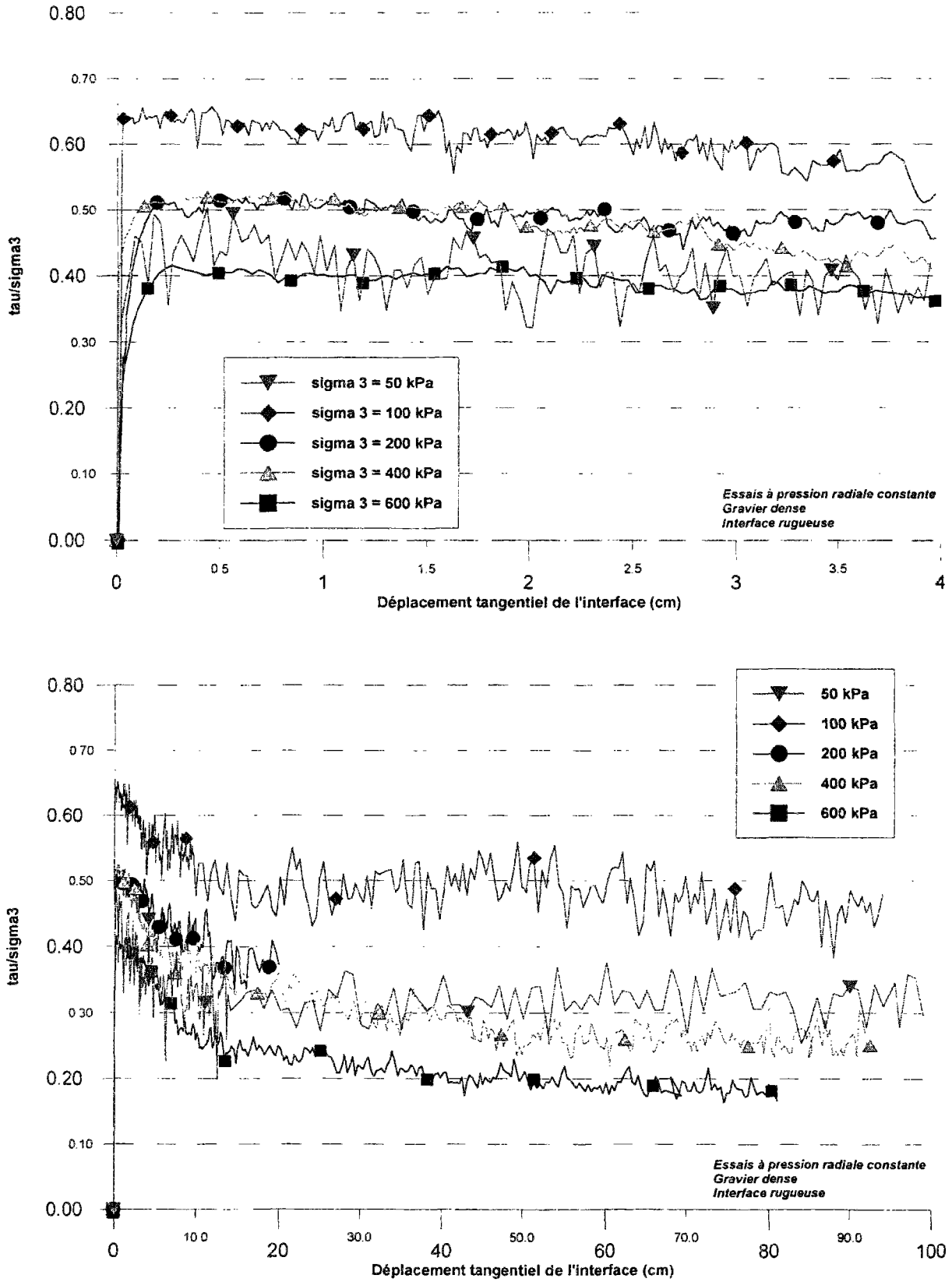


Figure III-44. *Courbes ($\mu^* = \mu = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 dense*

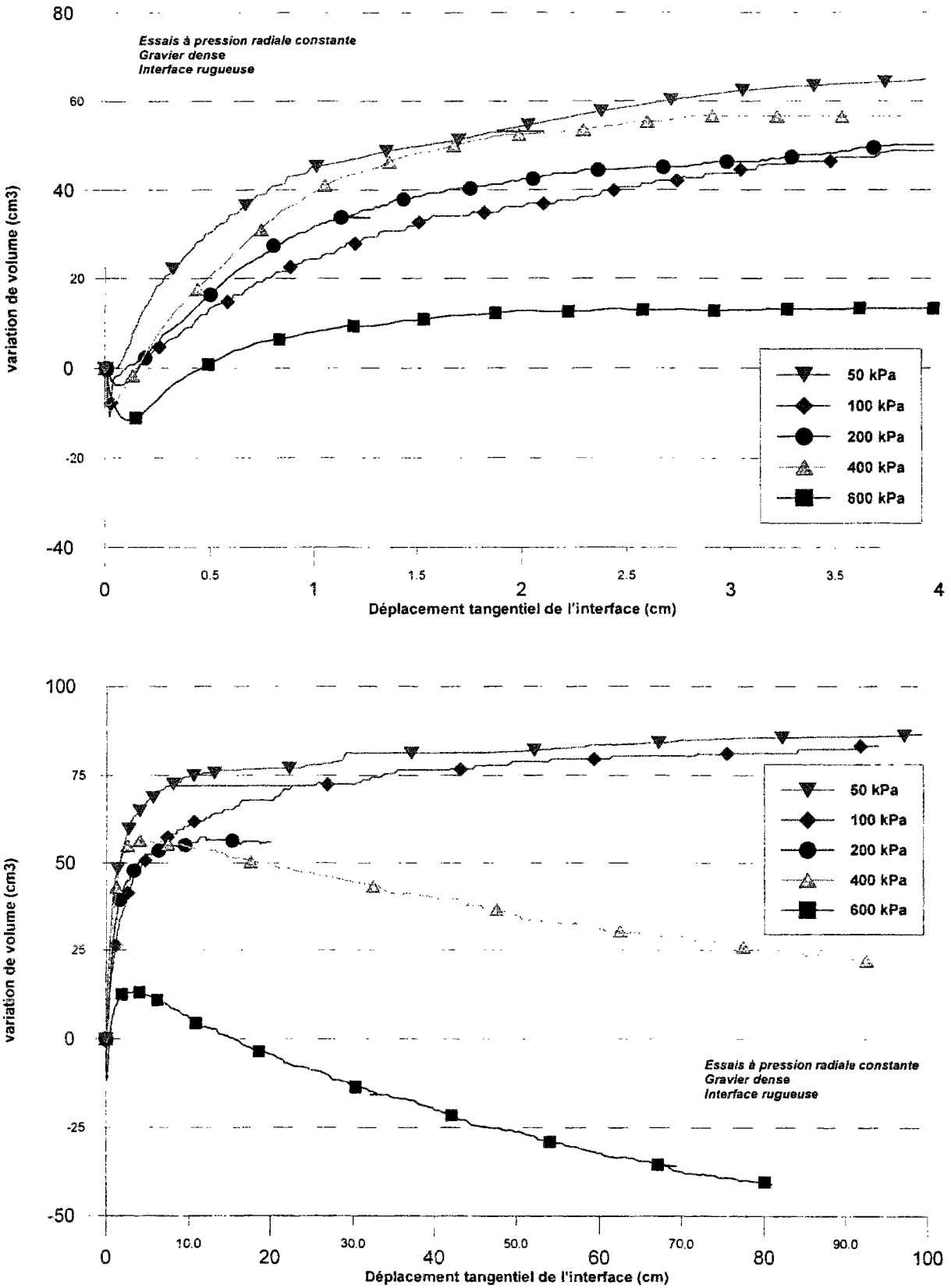


Figure III-45. *Courbes variation de volume de l'échantillon en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 dense*

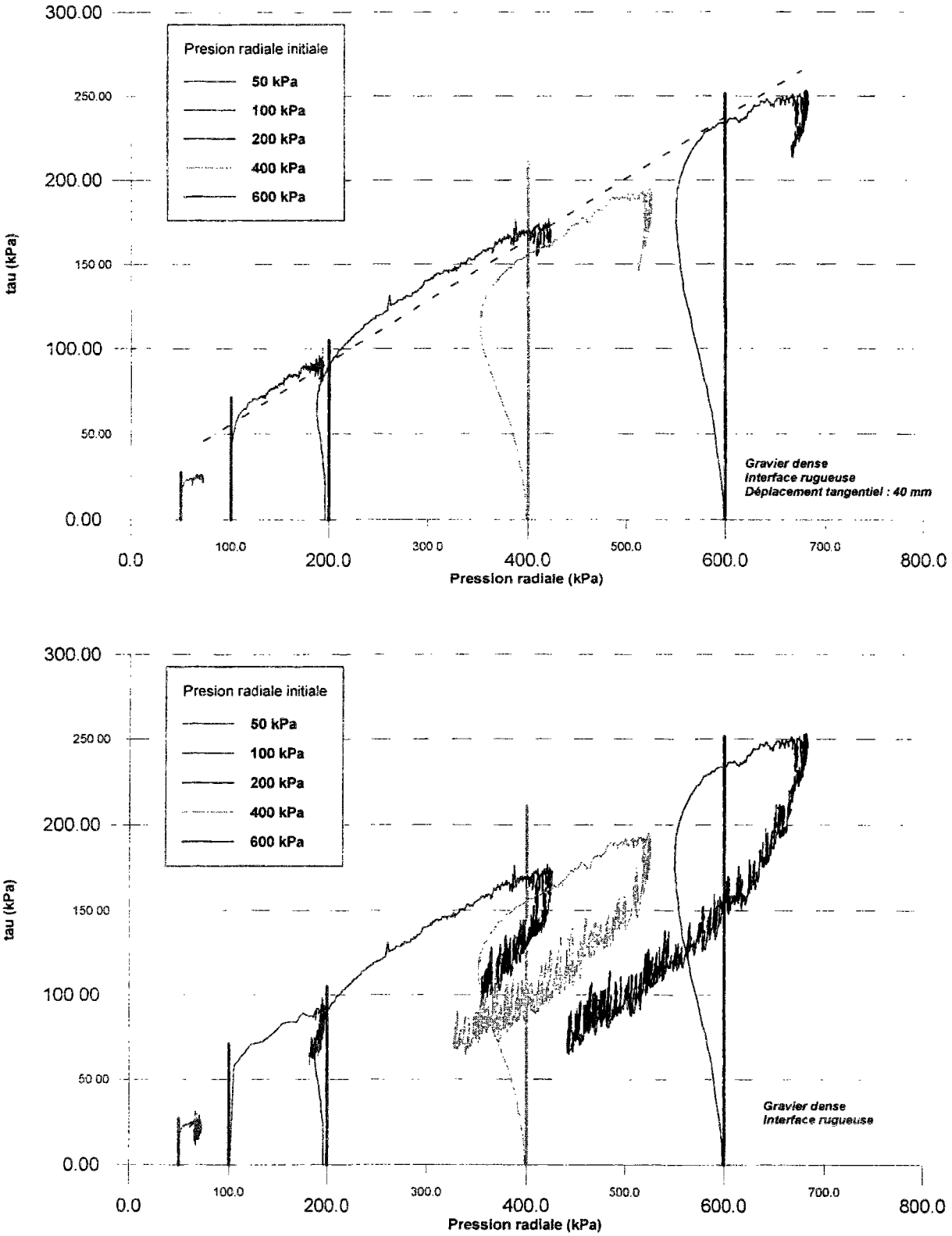


Figure III-46. *Chemins de contrainte (τ- σn) des essais à volume constant et à pression radiale constante; interface rugueuse, gravier d'Hostun 14~10 dense*

III.4.2.2 Influence des conditions aux limites

Nous allons comparer les résultats obtenus à partir des essais, sur le gravier d'Hostun 14~10, à pression radiale initiale constante et à volume constant. La figure III-47 présente la valeur du coefficient de frottement apparent obtenu pour les dix essais réalisés sur le gravier dense, avec une interface rugueuse.

Les résultats réalisés à 50, 400 et 600 kPa donnent de mêmes valeurs de coefficient de frottement apparent. Par contre, les essais réalisés à 100 et 200 kPa de pression radiale initiale à volume constant atteignent des valeurs supérieures à celles obtenues à partir des essais à pression radiale constante. Pour les essais à volume constant, les contraintes de cisaillement présentent un pic plus prononcé puis un léger radoucissement.

L'évolution de la pression radiale externe pour les essais à volume constant et l'évolution de la variation de volume pour les essais à pression radiale constante traduisent le même comportement. Pour les essais à 50 et 100 kPa de pression radiale initiale, la pression radiale externe (ou le volume de l'échantillon) augmente puis se stabilise alors que pour les essais à 400 et 600 kPa de pression radiale initiale, après une augmentation, la pression radiale externe (ou le volume de l'échantillon) diminue fortement. Les essais à 200 kPa de pression radiale initiale traduisent un comportement intermédiaire. Cette différence de comportement, que l'on retrouve dans les deux types d'essais, est directement liée à la rupture des grains dans l'interface. A partir de 200 kPa, la rupture de grains est importante. 200 kPa peut être considéré comme la limite. Les chemins de contrainte, représentés sur la figure III-46, montrent une bonne cohérence entre ces différents essais.

III.4.2.3 Influence de l'état de compacité de l'échantillon

Pour mettre en évidence l'influence de l'état de compacité sur le comportement de l'interface, nous allons comparer, pour une interface rugueuse, les résultats d'essais obtenus sur un échantillon dense et sur un échantillon lâche à volume constant et à pression constante. Ces

essais ont été réalisés pour une pression radiale initiale de 200 kPa. Pour une interface lisse, nous comparerons les résultats d'essais obtenus à volume constant uniquement.

Les figures III-48 à III-50 présentent une synthèse des résultats des essais avec une interface rugueuse, à partir d'échantillons de gravier lâche et d'échantillons de gravier dense. Seuls les résultats globaux obtenus dans chaque cas sont présentés, les représentations spécifiques pour de faibles déplacements (jusqu'à 4 cm) se trouvant en annexe E.

Pour un gravier lâche, après un léger pic pour de faibles déplacements ($\mu^* = 0,22$), la contrainte de cisaillement se stabilise pour de grands déplacements avec une valeur de 0,14. Pour un gravier dense, la contrainte de cisaillement atteint un pic pour des déplacements tangentiels compris entre 2 et 4 cm ($\mu^* = 0,84$) avant de diminuer régulièrement pour de plus grands déplacements, jusqu'à une valeur de μ^* de 0,60 (figure III-48). La contractance de l'échantillon lâche est mise en évidence par la mesure de la pression radiale. Pour 20 cm de déplacement, celle-ci a diminué de 50%. Pour un échantillon dense, après une légère phase de contractance, une forte dilatance se développe jusqu'à 4 cm de déplacement suivie d'une phase de contractance continue (figure III-49). Ceci se traduit par des coefficients de frottement réel très différents initialement (0,48 et 0,26), qui tendent vers la même valeur (0,30) pour de plus grands déplacements.

Les essais réalisés à pression constante donnent des résultats analogues (résultats présentés en annexe E). Les chemins de contrainte des essais à volume constant et à pression radiale constante sont représentés sur la figure III-51. Les différences de comportement que nous avons mises en évidence sont bien illustrées sur cette figure. Le gravier lâche mobilise un angle de frottement maximum de 17° alors que le gravier dense peut mobiliser un angle de frottement de 27°.

La comparaison des essais réalisés avec une interface lisse, sur des échantillons de gravier dense et des échantillons de gravier lâche, sont présentés en annexe E. Les coefficients de frottement apparent μ^* et réel μ obtenus sur des échantillons de gravier dense et des échantillons de gravier lâche sont très faibles (inférieurs à 0,18, correspondant à un angle de frottement de 9°), les coefficients pour le sable dense étant environ de 50% supérieurs à ceux du sable lâche.

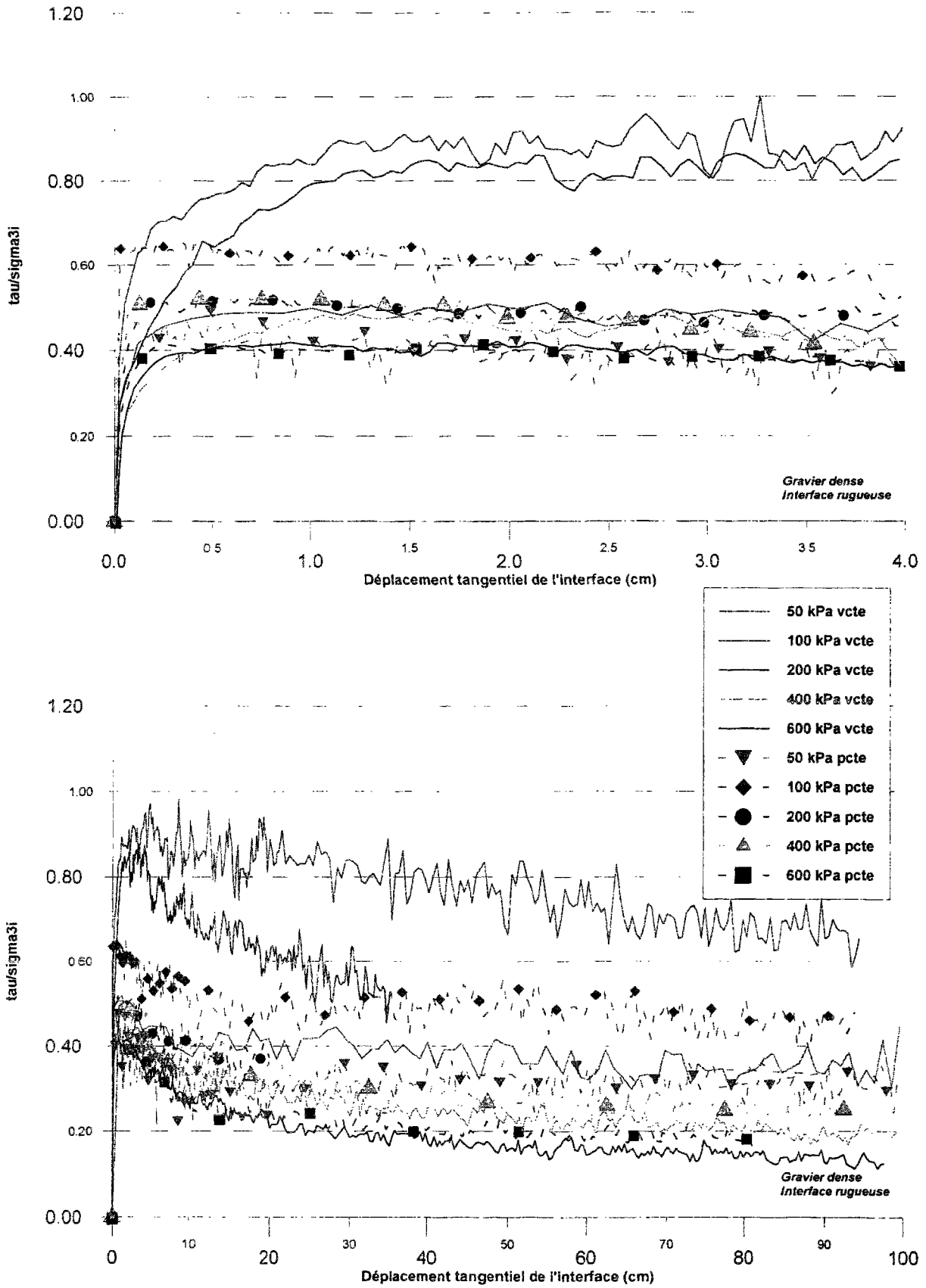


Figure III-47. *Comparaison des courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement : essais à volume constant et à pression radiale constante; interface rugueuse, gravier 14~10 dense*

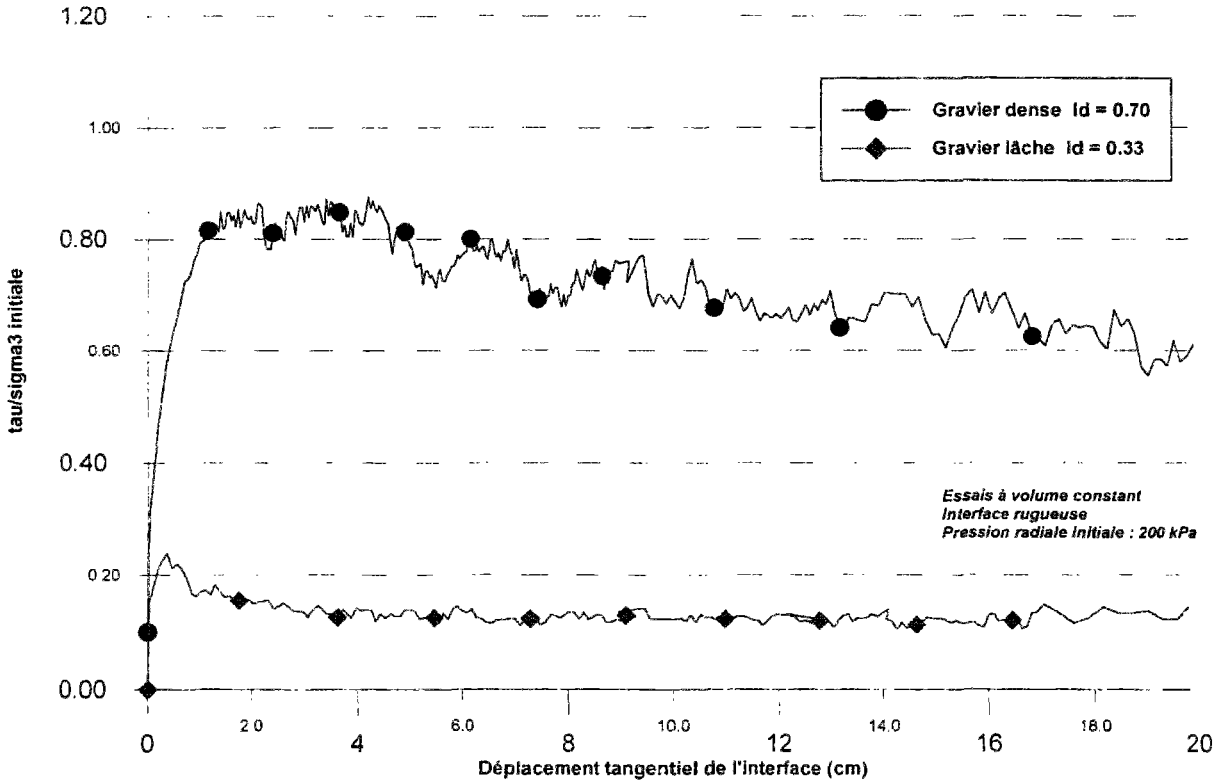


Figure III-48. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

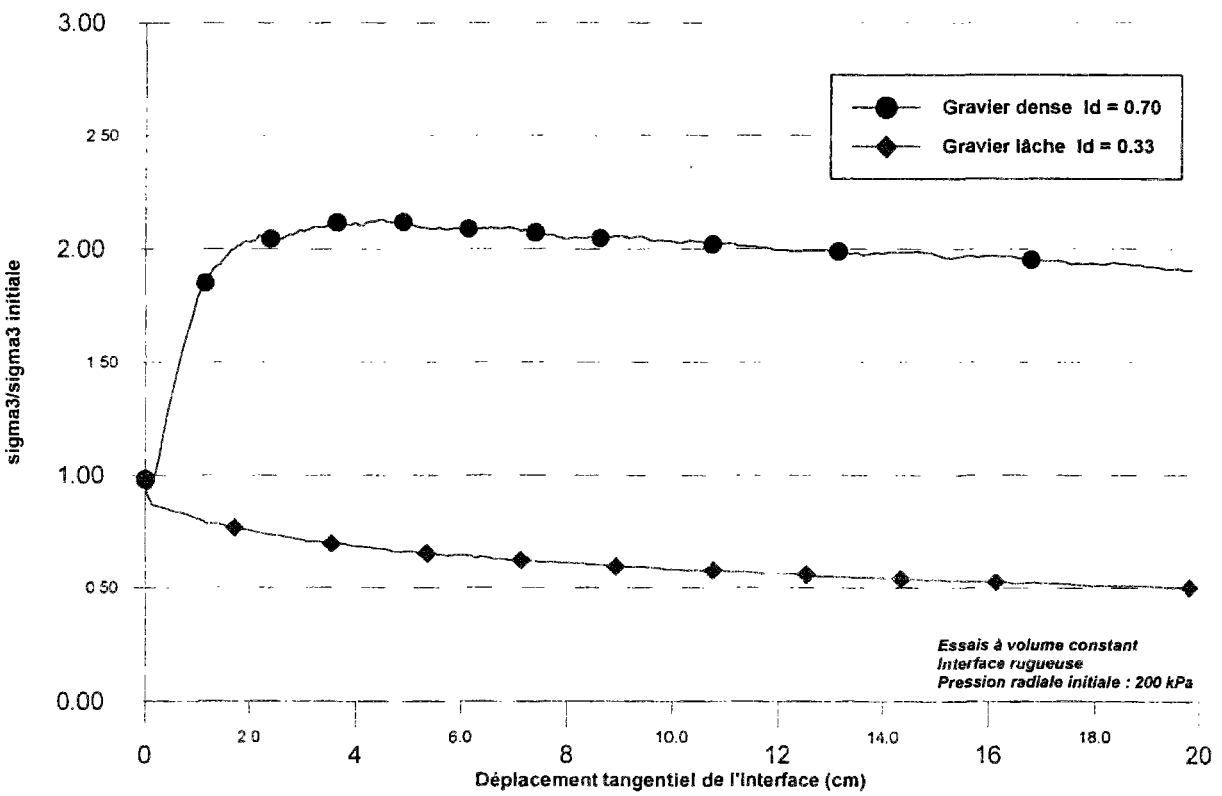


Figure III-49. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

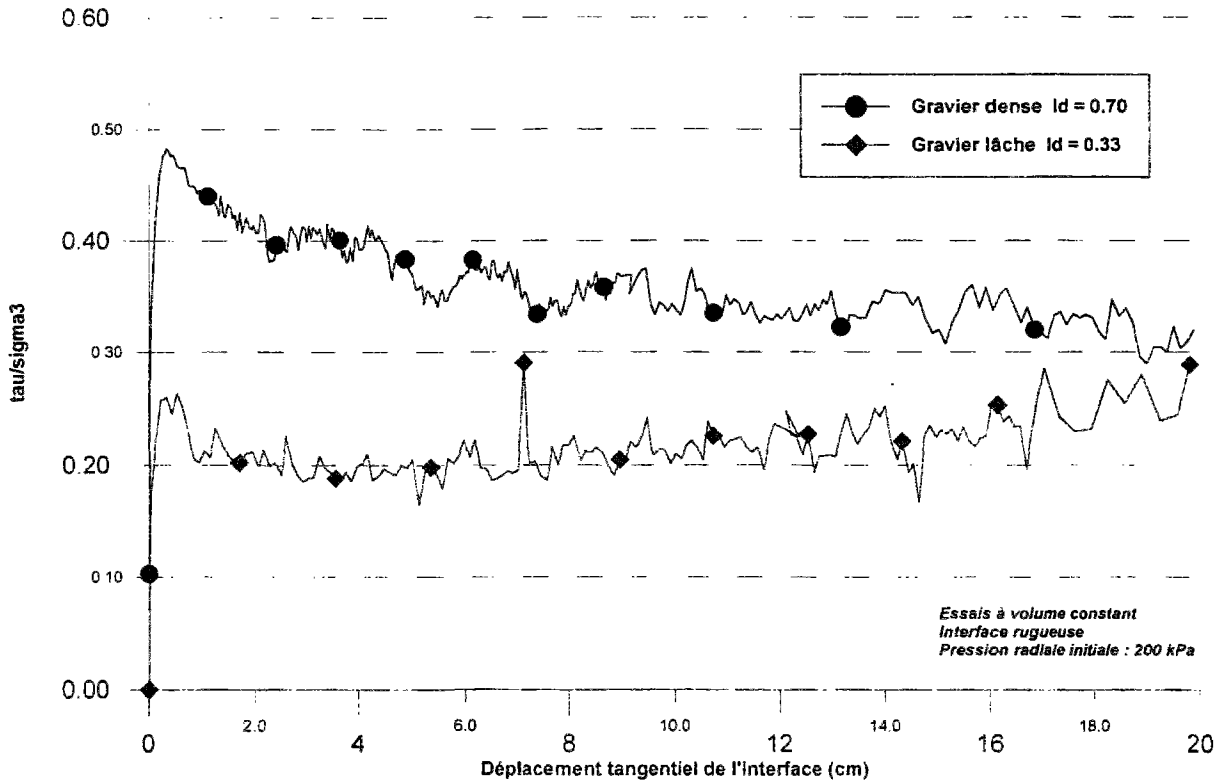


Figure III-50. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentielinterface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

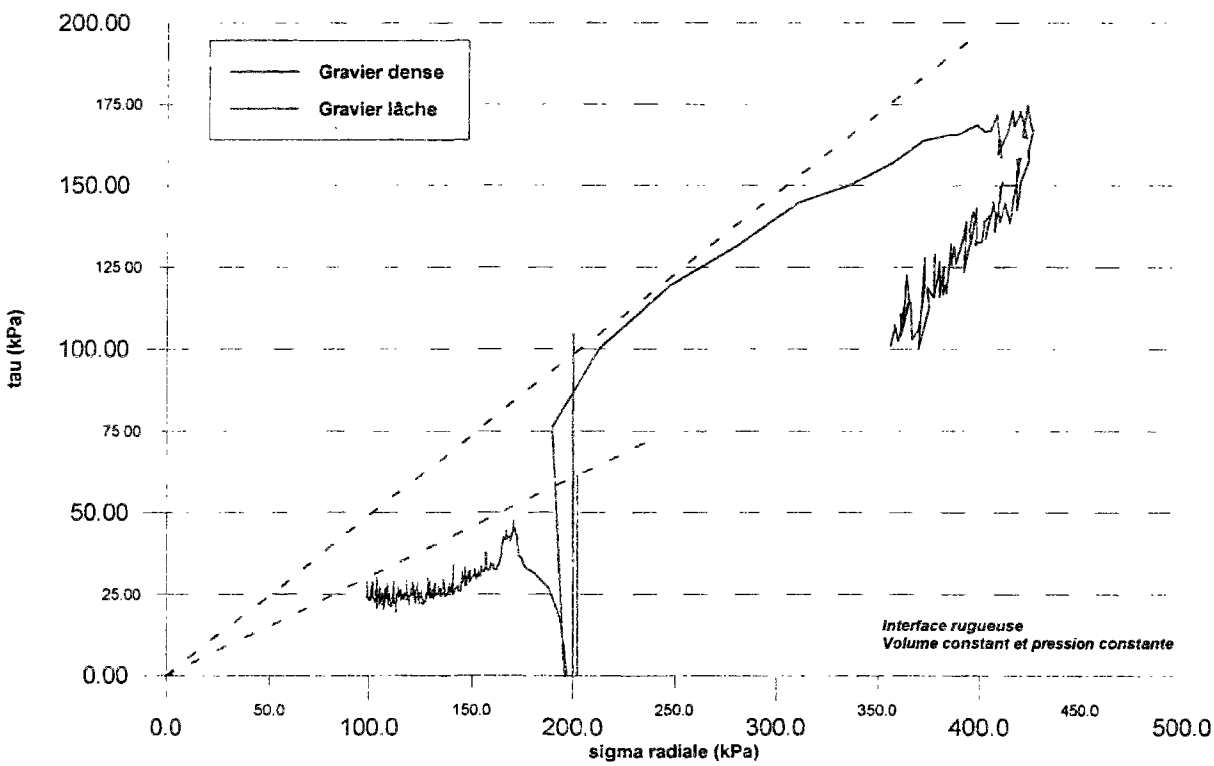


Figure III-51. *Chemins de contrainte (τ- σn), interface rugueuse, volume constant et pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

III.4.2.4 Influence de la rugosité de l'interface

Nous avons réalisé des essais à volume constant, pour une pression radiale initiale de 200 kPa, avec un échantillon de gravier dense et un échantillon de gravier lâche, avec une interface rugueuse et une interface lisse.

Les figures III-52, III-53 et III-54 présentent une synthèse des résultats des essais, avec un échantillon de gravier dense, pour une interface lisse et pour une interface rugueuse. Nous ne présenterons que les résultats globaux obtenus dans chaque cas, les représentations spécifiques pour de faibles déplacements (jusqu'à 4 cm) se trouvant en annexe F

Pour une interface rugueuse, la valeur de la contrainte de cisaillement augmente jusqu'à 2 cm de déplacement, pour atteindre un coefficient de frottement de 0,84. Elle diminue ensuite progressivement avec le déplacement tangentiel (figure III-52). Pour une interface lisse, dès 2 mm de déplacement, la contrainte de cisaillement reste constante, correspondant à un coefficient de frottement de 0,14.

La mesure de la pression radiale nous montre, pour une interface rugueuse, une contractance initiale (pour les premiers millimètres de cisaillement), puis une phase de dilatance suivie d'une seconde phase de contractance régulière pour de grands déplacements (figure III-53). Dans le cas d'une interface lisse, seulement une phase de contractance est observée, de faible amplitude (diminution de 15% pour 40 cm de déplacement tangentiel). Les coefficients de frottement réel, pour une interface lisse et une interface rugueuse, même s'ils ont tendance à se rapprocher pour de grands déplacements, sont très différents (figure III-54).

Les chemins de contrainte suivis lors de ces deux essais sont représentés à la figure III-55. Le cisaillement avec une interface lisse est limité à une contrainte de cisaillement autour de 25 kPa, alors que le cisaillement avec une interface rugueuse s'accompagne de fortes variations des contraintes.

La comparaison des essais réalisés sur des échantillons de gravier lâche, avec une interface lisse et avec une interface rugueuse, sont présentés en annexe F. Ces deux essais de cisaillement se développent avec une contractance continue de l'échantillon, et cette contractance est plus importante pour une interface rugueuse que pour une interface lisse. Cette contractance s'accompagne d'une augmentation du coefficient de frottement réel, pour les deux types d'essais, pour de grands déplacements.

Les chemins de contrainte suivis lors de ces deux essais, très éloignés pour de petits déplacements, ont tendance à se rejoindre pour de plus grands déplacements. En effet, alors que la contrainte de cisaillement, lors d'un essai avec une interface rugueuse, diminue fortement, elle varie peu lors d'un essai avec une interface lisse.

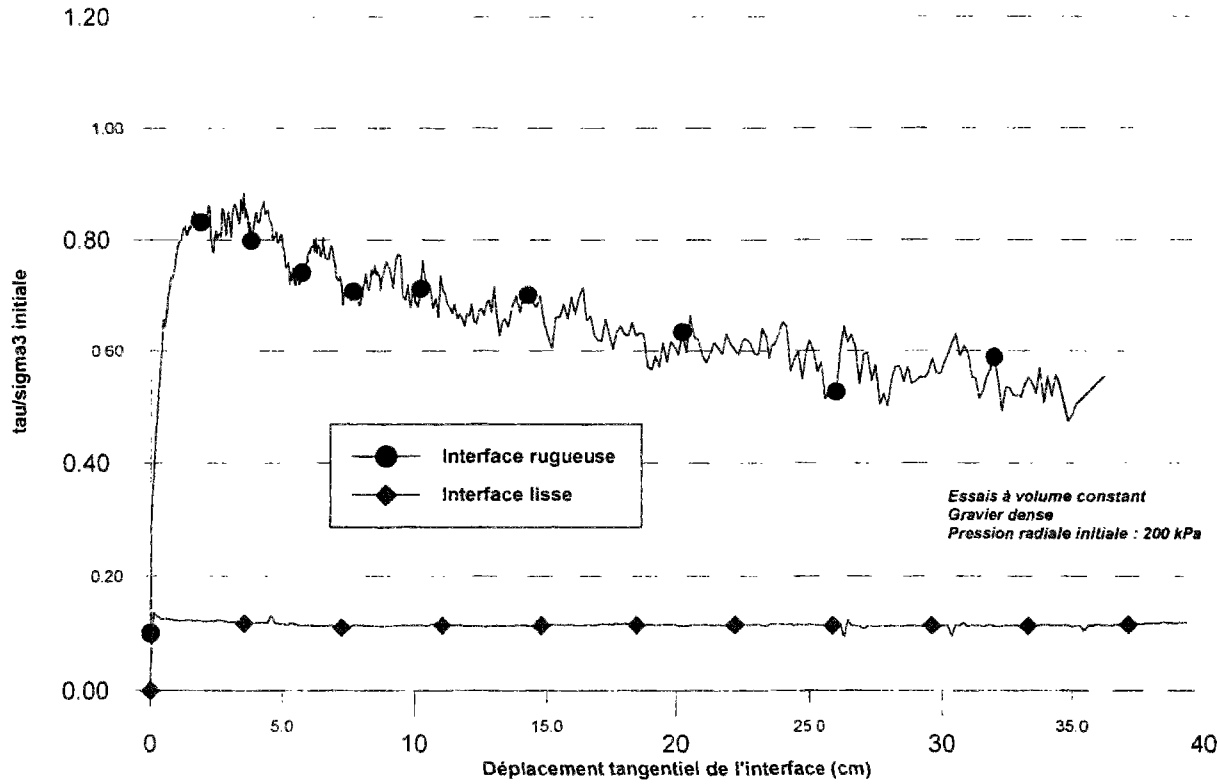


Figure III-52. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

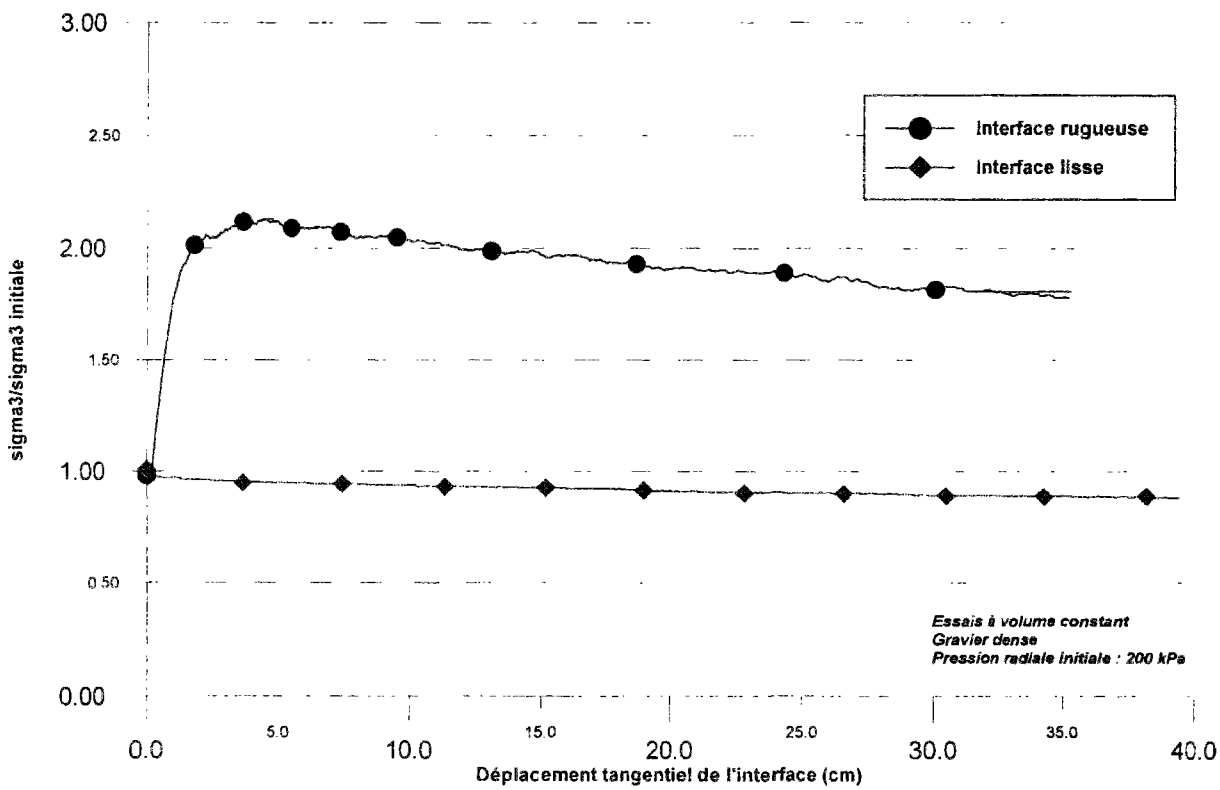


Figure III-53. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

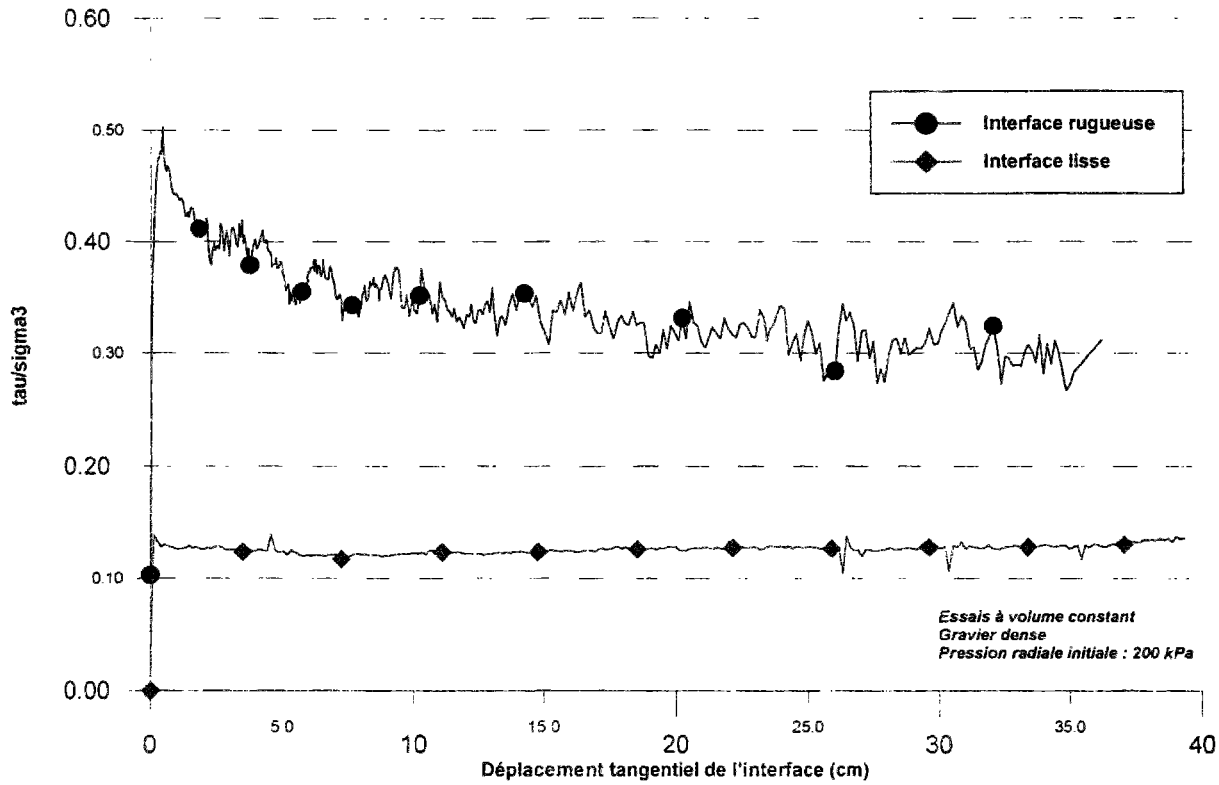


Figure III-54. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

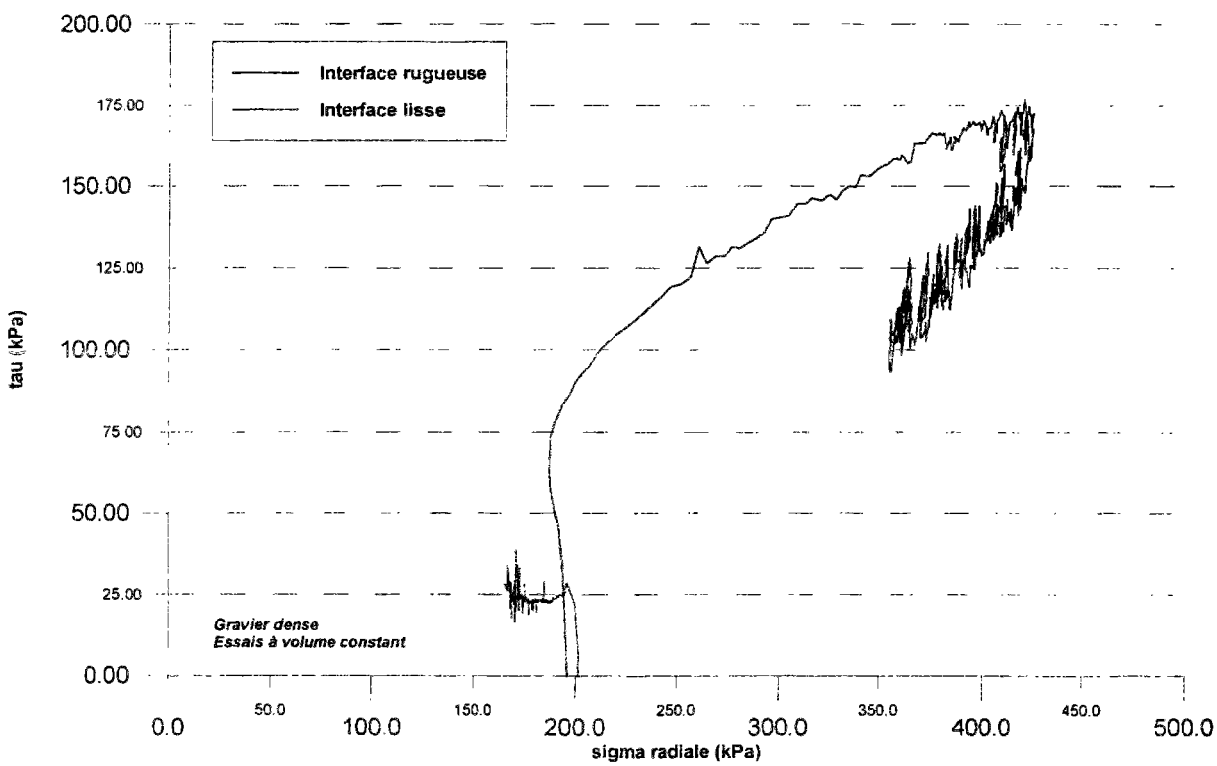


Figure III-55. *Chemins de contrainte (τ- σn) gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

III.4.3. Influence de la granulométrie

L'influence de la granulométrie, caractérisée par le D_{50}, diamètre moyen des particules, doit être analysée relativement à la rugosité de la structure d'interface. Les clous utilisés ont une rugosité maximale de 15 µm pour le clou lisse (inférieure au rapport $D_{50}/10$ pour le sable RF et le gravier 14~10) et de 1 mm pour le clou rugueux (supérieure au rapport $2D_{50}/10$ pour le sable RF et le gravier 14~10). Nous allons comparer les résultats obtenus à partir d'essais à volume constant, avec une pression radiale initiale de 200 kPa, une interface lisse ou rugueuse, sur des échantillons de sable RF ou gravier 14~10.

Avec une interface lisse et des échantillons lâches (figure III-56), les résultats obtenus sont très proches, en particulier pour de petits déplacements. Pour de plus grands déplacements, la contrainte de cisaillement reste identique pour les deux matériaux, mais la diminution de la pression radiale externe est plus importante pour l'échantillon de gravier, la contractance se faisant sur un plus grand volume.

Avec une interface lisse et des échantillons denses (figure III-57), nous observons une assez grande différence sur les valeurs de la contrainte de cisaillement. Pour 1 mm de déplacement tangentiel, celle-ci atteint un pic de 42 kPa pour le sable RF alors qu'elle est limitée à 26 kPa pour le gravier 14~10. Pour de grands déplacements, elle atteint 50 kPa pour le sable mais reste constante et égale à 25 kPa pour le gravier. Les variations de la pression radiale externe sont identiques pour les deux matériaux. Cette différence de comportement s'explique par une rugosité d'interface qui apparaît très lisse pour le gravier ($R_{max} \sim D_{50}/200$) alors qu'elle mobilise plus de frottement pour le sable RF ($R_{max} \sim D_{50}/20$).

Avec une interface rugueuse et des échantillons lâches (figure III-58), la contrainte de cisaillement atteint un pic plus prononcé pour le gravier (48 kPa) que pour le sable (38 kPa). Pour de plus grands déplacements, les contraintes de cisaillement obtenues sont

identiques. L'échantillon de gravier a un comportement contractant plus important que l'échantillon de sable.

Pour une interface rugueuse et des échantillons denses (figure III-59), les valeurs obtenues sont très différentes. La contrainte de cisaillement atteint un pic de 110 kPa pour un déplacement tangentiel de 1mm pour l'échantillon de sable alors que le pic, pour l'échantillon de gravier (175 kPa), est obtenu pour un déplacement de 2 cm. Ce déplacement est directement proportionnel au D_{50} de chaque matériau.

L'évolution de la pression radiale externe indique des phases de contractance initiale assez identiques. La phase de dilatance est très importante pour le gravier et plus limitée pour le sable et se développe sur des déplacements tangentiels similaires aux déplacements tangentiels correspondant aux pics de contrainte. Cette différence d'évolution est liée à l'épaisseur de l'échantillon correspondant à 30 D_{50} pour le gravier 14~10 contre 300 D_{50} pour le sable RF. Les phases de contractance ou de dilatance, au niveau de l'interface, se répercutent de façon différente en fonction du nombre de grains présents sur l'épaisseur de l'échantillon. Après la phase de dilatance, les deux échantillons ont un comportement contractant et, pour de grands déplacements tangentiels, mobilisent un contrainte de cisaillement du même ordre (100 kPa). La plus forte contrainte de cisaillement obtenue pour l'échantillon de gravier est due à la valeur de son D50 qui favorise une forte dilatance, dilatance empêchée qui se traduit par une forte augmentation de la pression radiale externe.

Cette analyse nous montre donc que la granulométrie a une influence très faible sur le comportement d'une interface entre un matériau lâche, avec une structure lisse ou rugueuse. Par contre, son influence est très importante dans le cas d'un matériau dense. Pour une structure lisse, le sable RF mobilise une contrainte de cisaillement plus importante que le gravier 14~10, la structure paraissant moins lisse, comparée à un grain de sable plutôt qu'à un grain de gravier. Par contre, pour une structure rugueuse, le gravier mobilise une contrainte de cisaillement supérieure à celle mesurée pour du sable, du fait de la dilatance empêchée, qui se développe sur une grande partie de l'échantillon de gravier.

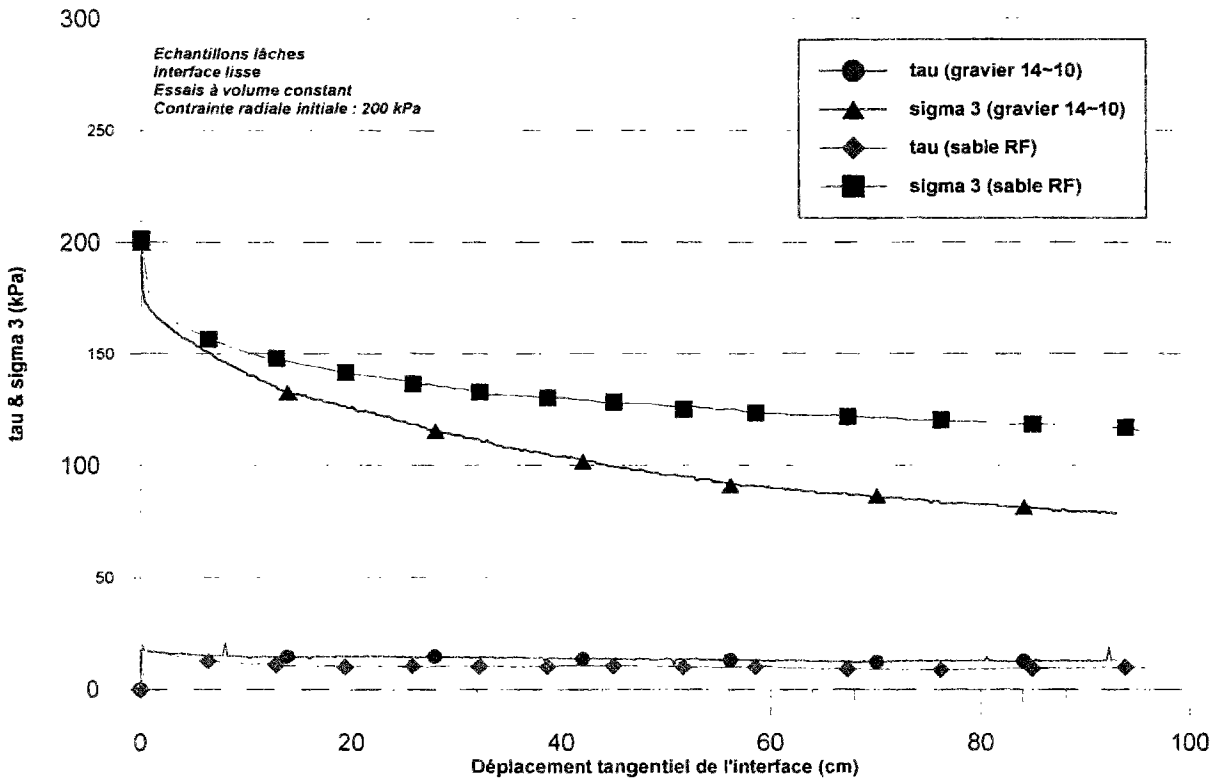


Figure III-56. *Influence de la granulométrie : sable RF et gravier 14~10, essais à volume constant, σ_{ri} = 200 kPa, interface lisse, échantillons lâches*

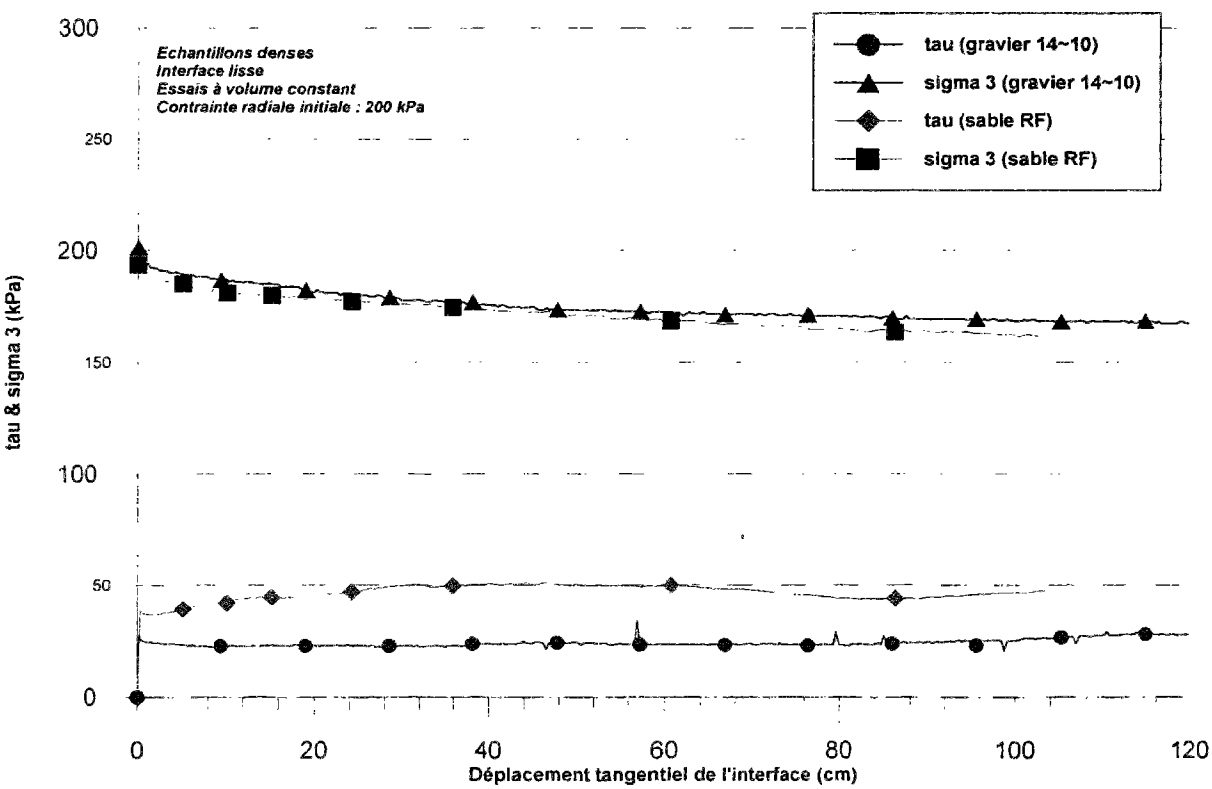


Figure III-57. *Influence de la granulométrie : sable RF et gravier 14~10, essais à volume constant, σ_{ri} = 200 kPa, interface lisse, échantillons denses*

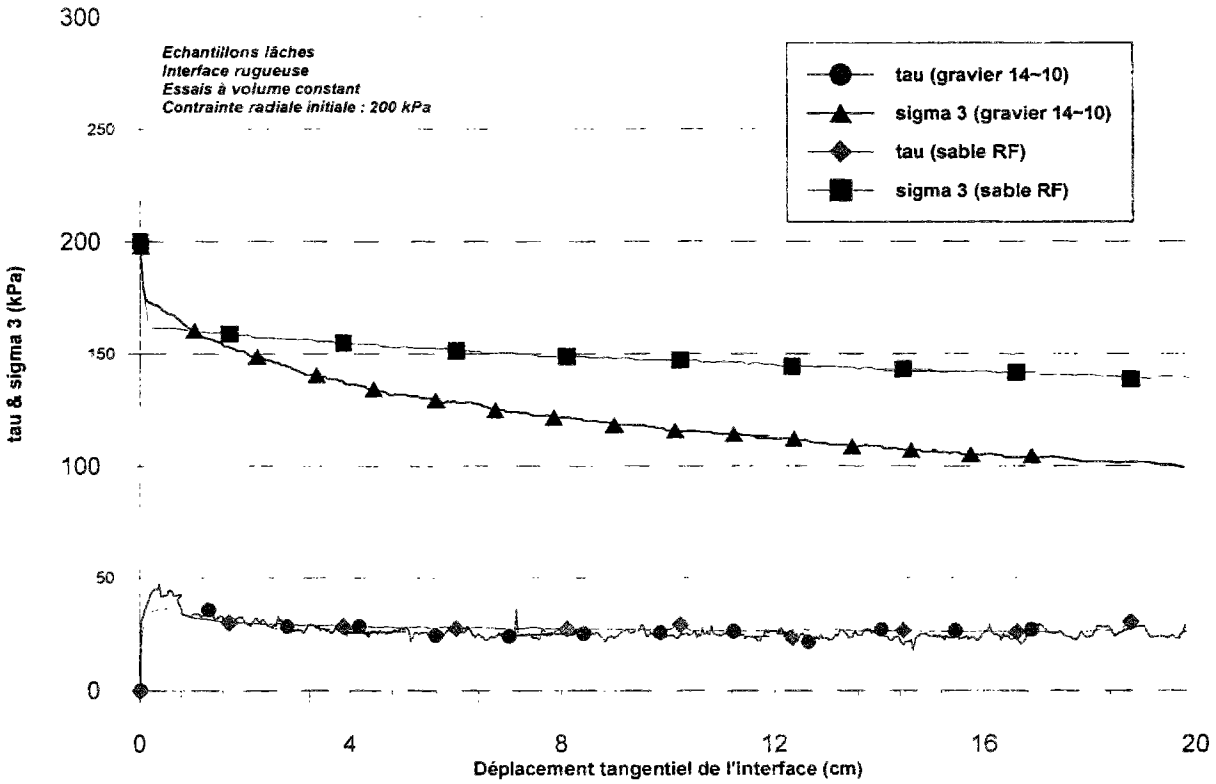


Figure III-58. *Influence de la granulométrie : sable RF et gravier 14~10, essais à volume constant, σ_{ri} = 200 kPa, interface rugueuse, échantillons lâches*

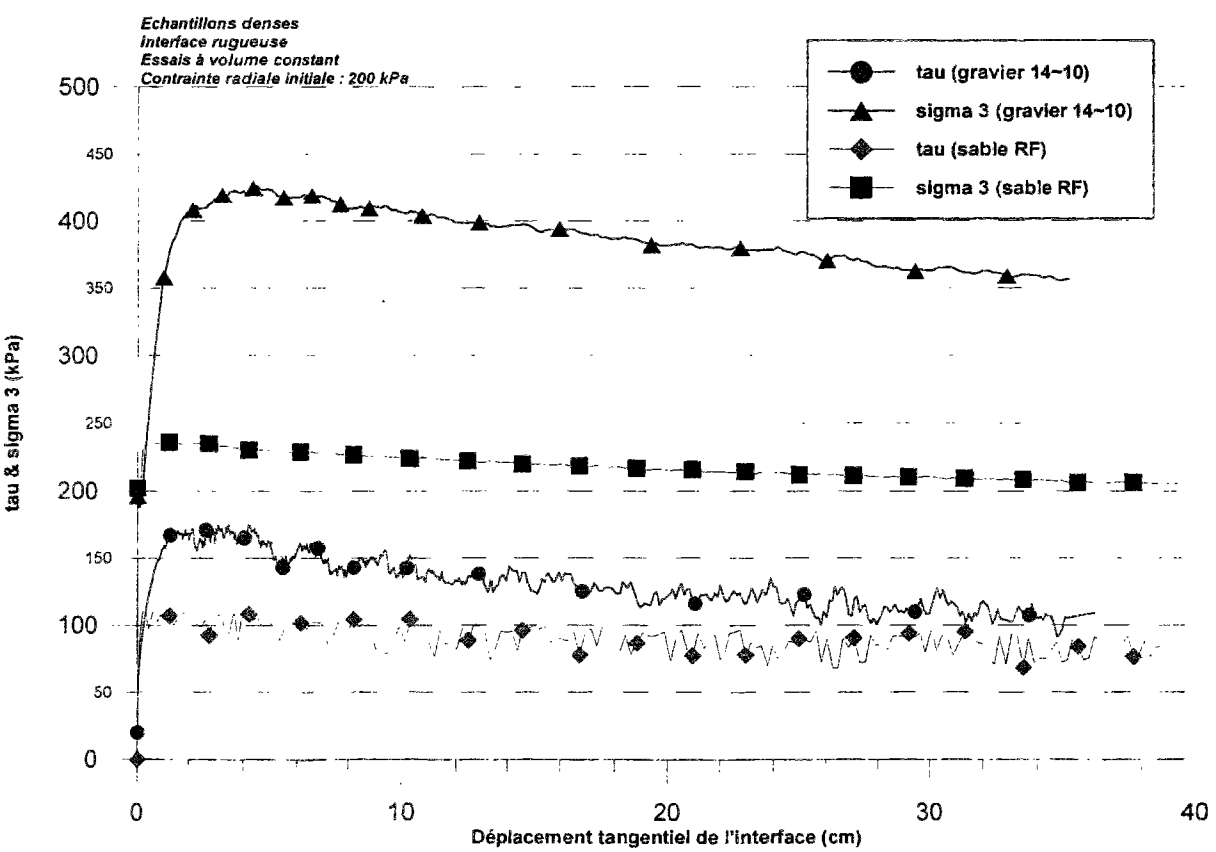


Figure III-59. *Influence de la granulométrie : sable RF et gravier 14~10, essais à volume constant, σ_{ri} = 200 kPa, interface rugueuse, échantillons denses*

III.5. Conclusion

Tous les essais sous sollicitation monotone, présentés dans cette partie expérimentale, ont été effectués sur des échantillons de sable d'Hostun RF ou de gravier d'Hostun 14~10 denses ou lâches, à partir d'une consolidation initiale de type "K_0", à pression radiale constante ou à volume constant.

Si on la compare à celle de la boîte de cisaillement direct plan modifiée, la procédure expérimentale de l'appareil de cisaillement simple annulaire est assez complexe et longue, puisqu'un essai dure au moins 24 heures. Cependant, très peu d'incidents se sont produits et 90% des essais ont été menés à terme. La reproductibilité n'est pas parfaite, du fait de l'hétérogénéité au sein de l'échantillon créée lors de sa fabrication.

Les essais de cisaillement simple annulaire ont confirmé les conclusions que nous avions rencontrées dans l'étude bibliographique : pour le sable RF et pour le gravier 14~10, le comportement d'un échantillon, soit lâche, soit cisaillé par une interface lisse, est contractant ; aucune phase de dilatance n'apparaît. Cela confirme les résultats obtenus par Boutrif (1993). Cependant, l'utilisation de capteurs de mesure de la contrainte normale, au sein de l'interface, lorsqu'elle est lisse et avec du sable RF dense, a permis d'identifier un comportement dilatant au sein de l'interface, confirmant en cela les observations de Hoteit (1990). Cette phase est masquée dans la mesure de la pression radiale externe, pour les essais à volume constant, ou dans la mesure de la variation de volume globale de l'échantillon, dans le cas des essais à pression radiale externe constante. Ceci explique peut-être le fait que Boutrif (1993) ne l'ait pas identifiée.

Dans le cas d'une interface rugueuse cisaillant un échantillon dense, nous avons mis en évidence la succession d'une phase initiale de contractance, puis d'une phase de dilatance (observation classique) suivie d'une seconde phase de contractance pour de grands déplacements tangentiels de l'interface.

De manière générale, les coefficients de frottement obtenus sont plus faibles que ceux obtenus classiquement à l'aide de la boîte de cisaillement direct plan modifiée. Cependant, Boutrif (1993), avec un appareillage performant - la boîte de cisaillement direct annulaire - obtenait aussi des valeurs inférieures à celle de Hoteit (1990). Nous n'avons pas pu montrer, pour de faibles valeurs de la pression radiale initiale, des coefficients de frottement apparent aussi élevés que ceux obtenus par Schlosser et Guilloux (1981).

Cette étude expérimentale, sous sollicitation monotone, doit être complétée par des essais à densité intermédiaire, rendus possibles par l'utilisation du pluviateur que nous avons conçu (chapitre II). Des mesures de la contrainte normale au sein de l'interface, étendues à tous les essais, apporteraient des informations complémentaires intéressantes sur le comportement volumique, notamment lors de l'utilisation d'une interface rugueuse.

IV. VISUALISATION DU MOUVEMENT DES GRAINS AU SEIN DE LA COUCHE D'INTERFACE

IV. VISUALISATION DU MOUVEMENT DES GRAINS AU SEIN DE LA COUCHE D'INTERFACE203

IV.1. INTRODUCTION 204

IV.2. RAPPELS BIBLIOGRAPHIQUES 205

IV.2.1. Techniques de visualisation *205*

IV.2.1.1 La photoélasticité 206

IV.2.1.2 La radiographie par rayons X 206

IV.2.1.3 La stéréophotogrammétrie 206

IV.2.2. Bandes de cisaillement et couches d'interface : épaisseur caractéristique *207*

IV.2.2.1 Bandes de cisaillement 207

IV.2.2.2 Couches d'interface 208

IV.2.3. Conclusion *211*

IV.3. RESULTATS OBTENUS A PARTIR DES ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 211

IV.3.1. Introduction *211*

IV.3.2. Procédure expérimentale et dépouillement des essais *213*

IV.3.3. Programme d'essais *215*

IV.3.4. Interprétation des résultats *216*

IV.3.4.1 Analyse de la rotation des grains au sein de l'interface 216

IV.3.4.2 Mouvement des grains : déplacements tangentiels et déplacements normaux 217

IV.3.5. Conclusion *222*

IV.4. UTILISATION DU MATERIAU ANALOGIQUE DE SCHNEEBELI 224

IV.4.1. Etude bibliographique *224*

IV.4.2. Essais à l'appareil de cisaillement simple annulaire *226*

IV.4.2.1 Utilisation d'un appareil de Couette 226

IV.4.2.2 Modification de l'appareil de cisaillement simple annulaire 227

IV.4.2.3 Matériaux utilisés 228

IV.4.2.4 Résultats des essais 230

a. Résultats macroscopiques 230

b. Mouvement des grains de l'échantillon 230

IV.4.2.5 Modélisation des essais de cisaillement simple annulaire par le logiciel L.M.G.C. 234

IV.5. CONCLUSION 239

IV.1. Introduction

Comme nous l'avons précédemment analysé, les couches d'interface, comme les bandes de cisaillement, sont caractérisées par le développement de forts gradients de déplacements, du fait de la transmission d'efforts de la structure vers le sol. Ce phénomène d'interface entre une structure et un milieu granulaire, étudié classiquement à une échelle macroscopique, doit également être observé à l'échelle du grain, à un niveau microscopique, pour bien comprendre ce qui se passe physiquement dans cette couche d'une épaisseur de quelques grains.

Les milieux continus classiques ne peuvent expliquer la formation des couches d'interface, car aucun paramètre ne peut contrôler leur épaisseur. Seuls les milieux continus généralisés, et, en particulier, les milieux continus avec microstructure, peuvent modéliser ce comportement particulier des milieux granulaires. Ces milieux sont caractérisés par l'existence d'une longueur interne qui peut être déterminée en fonction de la granulométrie du matériau considéré.

Unterreiner (1994) a simulé le cisaillement simple annulaire d'un milieu de Cosserat, milieu continu avec microstructure rigide d'ordre 1 (Cosserat et Cosserat, 1907, 1909) par une surface légèrement rugueuse. Si seulement 1% du déplacement d'interface est transféré au sol sous la forme d'une rotation de Cosserat et le reste, 99%, transmis sous la forme d'un déplacement tangentiel du sol, alors de grandes différences, par rapport au milieu classique, apparaissent au sein de l'échantillon. Une couche d'interface, avec des rotations significatives et une forte dilatance, se forme sur quelques longueurs internes. De fortes rotations apparaissent sur une distance de 4 D_{50}, soit sur une épaisseur de l'ordre de deux grains et la déformation est importante sur 14 D_{50}.

Comme nous le verrons dans la partie bibliographique, très peu d'observations quantitatives de la couche d'interface ont été faites. Les travaux les plus complets ont été réalisés au laboratoire 3S/IMG. A l'aide de l'appareillage développé par ce laboratoire, nous avons analysé quelques essais réalisé à l'appareil de cisaillement simple annulaire pour avoir

une première approche quantitative du déplacement des grains au sein de l'interface lors d'un cisaillement simple annulaire (Schlosser et *al.*, 1995).

Une seconde approche pour mettre en évidence le comportement particulier de la couche d'interface a été réalisée à partir du cisaillement simple annulaire d'un échantillon de rouleaux de Schneebeli. Une configuration spéciale de l'appareil de cisaillement simple annulaire a été développée à cet effet, et des dépouillements ont été réalisés de manière analogue à ceux effectués sur des essais avec des échantillons de gravier.

A la suite de notre analyse, nous présenterons le travail de simulation numérique d'un essai de cisaillement simple annulaire, développé dans le cadre d'une collaboration avec l'Université Technique Nationale d'Athènes (I. Vardoulakis, A. Zervos) et le laboratoire L.M.A. de Marseille (M. Jean). Le logiciel LMGC permet de discrétiser le milieu granulaire et d'étudier son comportement au niveau microscopique (Lerat et *al.*, 1995; Vardoulakis et *al.*, 1996).

IV.2. Rappels bibliographiques

Dans cette revue bibliographique, nous décrivons tout d'abord les techniques de visualisation qui ont été développées soit pour l'observation des bandes de cisaillement, correspondant à des "zones d'interface sol-sol" et qui furent les premières à être analysées (Roscoe, 1970), soit pour la visualisation de la couche d'interface. Nous présentons ensuite une synthèse des résultats obtenus, dont certains ont été étudiés au chapitre I. Nous les rappelons brièvement.

IV.2.1. Techniques de visualisation

L'évolution des techniques de visualisation du comportement des grains au sein d'un échantillon de sol granulaire est étroitement liée à l'évolution de l'électronique et de l'informatique, la première des techniques étant l'observation visuelle.

Même si nous ne l'avons pas explorée en détail, les progrès significatifs du traitement automatisé d'images digitalisées nous laissent penser que cette technique sera rapidement, si elle ne l'est déjà, à la fois précise, conviviale et peu onéreuse. Des résultats prometteurs, à partir de photographies prises lors d'un essai de cisaillement simple annulaire sur du sable d'Hostun RF, ont été obtenus par Yang (1992).

La nouvelle technique développée au laboratoire 3S (Hassan, 1995), qui nous a permis d'analyser nos essais, sera exposée dans le paragraphe 3-2.

IV.2.1.1 La photoélasticité

La photoélasticité permet de déterminer l'évolution des champs de contraintes se développant lors du cisaillement d'un milieu granulaire. Cette technique suppose cependant la présence de mesureurs photoélastiques de contrainte cylindriques, qui peuvent perturber l'homogénéité du milieu. Ils doivent ensuite être observés à travers un faisceau de lumière monochromatique polarisée. Ceci nécessite de pouvoir émettre le faisceau lumineux d'un côté du cylindre et de faire une observation de l'autre côté.

IV.2.1.2 La radiographie par rayons X

Cette technique consiste à soumettre à un rayonnement X l'échantillon en cours de cisaillement et d'observer, d'une part, la position de marqueurs métalliques noyés dans l'échantillon et, d'autre part, de discerner les différences de densités au sein de l'échantillon, le sable dense étant plus absorbant que le sable lâche. Cette technique nécessite un équipement assez lourd à mettre en oeuvre.

IV.2.1.3 La stéréophotogrammétrie

La méthode stéréophotogrammétrique de faux relief permet la mesure du champ de déformation d'un objet plan (Desrues et Duthilleul, 1984). Les déplacements incrémentaux

d'un certain nombre de grains sont mesurés, à partir de points fixes définissant le référentiel. L'histoire de la transformation est enregistrée sous forme de clichés.

La perception de relief est un phénomène physiologique, obtenu par décodage d'une vision binoculaire. Sur le même principe, l'utilisation de stéréoscopes permet une vision de points matériels à partir d'un couple d'images et d'en déduire leurs déplacements.

IV.2.2. Bandes de cisaillement et couches d'interface : épaisseur caractéristique

IV.2.2.1 Bandes de cisaillement

Les études de radiographies d'essais de cisaillement simple sur du sable réalisées par Roscoe (1970) ont fourni des épaisseurs de bandes de cisaillement de l'ordre de 5 grains.

Suite aux travaux de Hawkes et Fellers (1969), Mandl et *al.* (1977) ont cherché à établir l'orientation des efforts principaux de compression, au voisinage de la bande de cisaillement, par insertion de cylindres photoélastiques au sein d'un échantillon granulaire. A cette fin, ils ont développé un appareil de cisaillement direct annulaire à paroi transparente. Les bandes de cisaillement, limitées par des plans de contrainte de cisaillement maximum, ont une épaisseur variant entre 8 et 20 grains.

Scarpelli et Wood (1982), à partir d'essais de cisaillement direct réalisés avec une boîte de Casagrande, ont obtenu des valeurs de la couche d'interface qui ne sont pas constantes sur toute une section de l'échantillon (figure IV-1). Ils ont trouvé une épaisseur moyenne de l'ordre de 5 à 8 grains. D'une part, cette étude montre la forte hétérogénéité de cet essai, liée à la prédominance des effets de bords ; d'autre part, elle peut expliquer le fait que l'essai de cisaillement direct surestime l'angle de frottement interne d'un matériau, la surface de cisaillement étant supérieure à la simple section de la boîte.

A partir d'essais biaxiaux, Vardoulakis et Graf (1985) ont trouvé des épaisseurs de bandes de cisaillement de 10 à 20 grains et Desrues (1984) des épaisseurs de 10 à 30 grains.

Une étude approfondie de Hammad (1991) confirme des valeurs de 13 à 32 grains selon la densité du matériau et la contrainte de confinement.

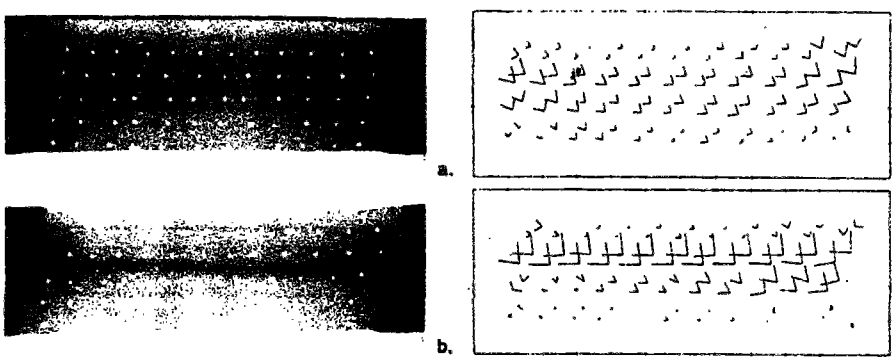


Figure IV-1. *Radiographies et directions d'extension nulle à partir d'un essai de cisaillement direct pour un déplacement relatif de (a) : 2 mm et (b) : 5 mm (d'après Scarpelli et Wood, 1982)*

IV.2.2.2 Couches d'interface

Les résultats acquis à partir des essais de laboratoire sont, pour la plupart, déjà présentés dans la première partie bibliographique. Nous rappelons juste les valeurs d'épaisseur de couches d'interface obtenues.

Yoshimi et Kishida (1981 a), à partir d'essais avec une boîte de cisaillement direct annulaire, ont obtenu des épaisseurs de 0 ou 1 grain, pour une interface lisse, et de 9 grains en moyenne, pour une interface rugueuse, à partir de radiographies.

Uesugi et *al.* (1988) ont observé, lors d'essais de cisaillement simple, des épaisseurs de 5 grains.

Hoteit (1990) a visualisé, par stéréophotogrammétrie et par analyse de film vidéo, des couches d'interface d'épaisseur variant de 0 à 1 grain, pour une interface lisse, à 10 grains, pour une interface rugueuse.

Hassan (1995) présente l'étude la plus détaillée réalisée sur le comportement individuel de grain dans la zone d'interface (étude microscopique). En plus de la détermination de l'épaisseur de cette couche, le champ de déformation de l'échantillon et la rotation de quelques grains marqués ont été soigneusement examinés. Il note que la rotation des grains joue un rôle déterminant dans leur réarrangement, donc sur l'épaisseur de la couche d'interface. Les valeurs des épaisseurs obtenues sont de 0 à 1 grain pour une interface lisse, indépendamment de la densité, de 6 à 7 grains pour une interface entre un échantillon lâche et une interface rugueuse et de 4 à 5 grains pour un échantillon dense avec une interface rugueuse (figure IV-2 et figure IV-3). Notons que la couche d'interface est plus importante pour un échantillon lâche que pour un échantillon dense.

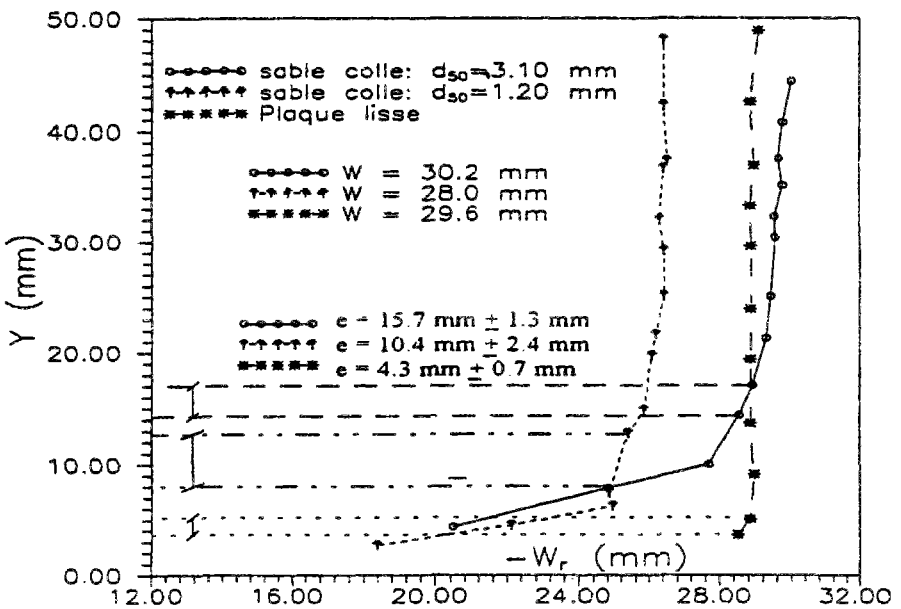


Figure IV-2. *Influence de la rugosité sur l'épaisseur de la couche d'interface, essai à contrainte normale constante de 125 kPa ; gravier 14~10 dense (d'après Hassan, 1995)*

Les résultats sur la rotation des grains confirment les observations faites antérieurement. Ces rotations sont négligeables pour une interface lisse alors qu'elles peuvent atteindre des valeurs importantes pour une interface rugueuse (de l'ordre de 100° pour un déplacement tangentiel de 30 mm, figure IV-4). L'auteur indique bien qu'il ne s'agit que du mouvement et de la rotation de quelques grains, et non de résultats globaux valables pour tous les grains de l'échantillon.

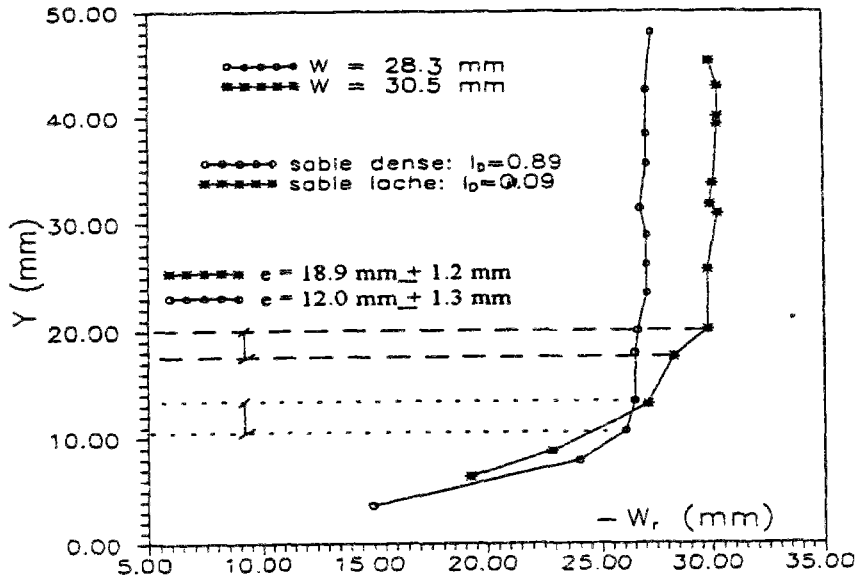


Figure IV-3. *Influence de la densité initiale sur l'épaisseur de la couche d'interface, essai à contrainte normale constante (50 kPa) ; gravier 14~10 dense (d'après Hassan, 1995)*

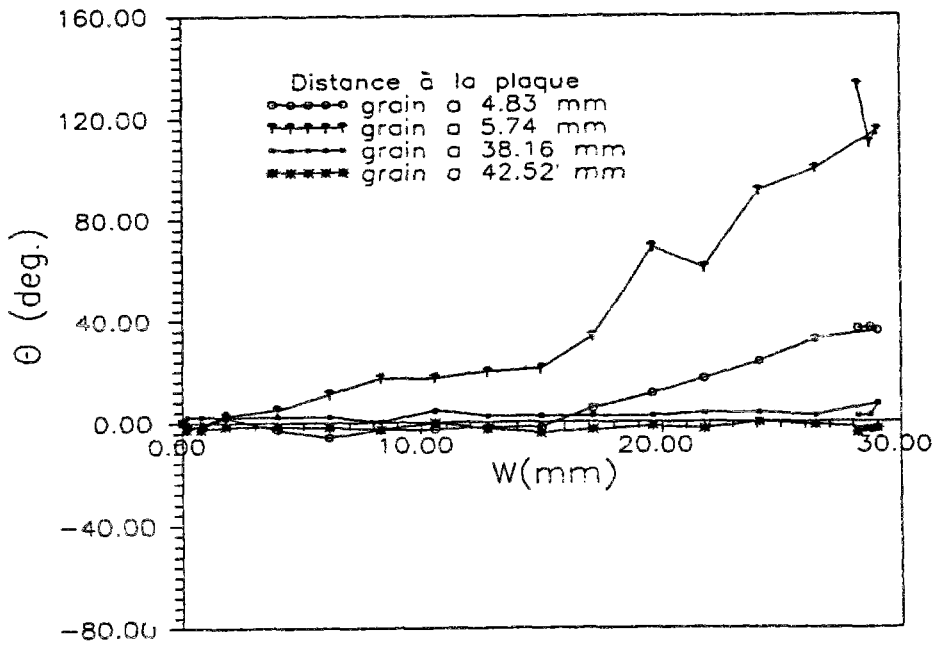


Figure IV-4. *Rotation des grains en fonction de leur distance à l'interface, essai à rigidité normale imposée (k=50 kPa/mm, σ_{n0} =125kPa) ; int. rugueuse, gravier 14~10 lâche (d'après Hassan, 1995)*

Tejchman et Wu (1995), par analyse aux rayons X, observent des zones d'interface de 6 grains pour une interface rugueuse à partir d'essais de cisaillement direct à l'aide d'une boîte modifiée et d'un appareil biaxial modifié, et des valeurs variant entre 6 et 40 grains pour des écoulements en silo modèle.

IV.2.3. Conclusion

L'épaisseur de la couche d'interface est très comparable à la moitié de l'épaisseur d'une bande de cisaillement. Cette affirmation, souvent énoncée, est uniquement valable dans le cas d'une interface rugueuse. Dans cette zone, de fortes rotations de grains sont mesurées, ainsi que d'importants champs de déplacement. Hassan (1995) confirme les résultats de Hammad (1991) qui constate que l'épaisseur de la couche d'interface diminue avec la densité.

Les résultats obtenus par Tejchman et Wu (1995) montrent la forte influence des conditions aux limites. Les conclusions tirées à partir d'essais avec un appareillage ne sont pas forcément extrapôlables à un autre type ou une autre configuration de cisaillement.

IV.3. Résultats obtenus à partir des essais de cisaillement simple annulaire sur le gravier d'Hostun 14~10

IV.3.1. Introduction

Lors de la conception de l'appareil de cisaillement simple annulaire, une des exigences de notre projet était d'avoir la possibilité de visualiser le comportement de l'échantillon granulaire au cours du cisaillement, et en particulier, le comportement au sein de la couche d'interface. L'observation de la face supérieure de l'échantillon n'a pas été techniquement réalisable, essentiellement à cause de la fragilité du verre. Même si diverses solutions furent

examinées, l'étanchéité entre le cylindre métallique et le pavé supérieur, supportant une plaque de verre, n'était pas possible. La solution retenue fut l'observation de la base inférieure de l'échantillon. Un inconvénient de cette configuration est lié à ce qu'une grande partie des particules fines de l'échantillon tombent, du fait de la gravité, pendant le cisaillement et viennent cacher les particules en contact avec la plaque de verre. Notons également que cette partie de l'échantillon, du fait du contact donc du frottement avec le verre, ne reflète que partiellement le comportement global des grains de l'échantillon, mais une observation visuelle au sein de l'échantillon n'est évidemment pas possible.

Le plateau inférieur de l'appareil de cisaillement simple annulaire comporte donc deux fenêtres d'observation (ayant la forme d'une partie de disque de rayon intérieur 85 mm et de rayon extérieur 185 mm, de largeur 120 mm, figure III-7). Il est recouvert d'un assemblage de deux plaques de verre de 20 mm d'épaisseur chacune.

Deux fenêtres ont été prévues pour pouvoir faire simultanément des prises photographiques et un enregistrement vidéo.

Les photographies ont été réalisées dans deux buts :

- permettre une observation directe du comportement de l'échantillon, en particulier déterminer l'épaisseur de la couche d'interface en fonction des conditions d'essais.
- servir de support à un dépouillement stéréophotogrammétrique de faux relief (Desrues, 1984), nécessitant des épreuves négatives de format 6*6. Ce dépouillement nécessitait des développements adaptés à la configuration de l'appareil de cisaillement simple annulaire qui n'ont pu être réalisés.

Le support vidéo permet également une observation directe de l'échantillon et est nécessaire, comme nous allons le voir, pour l'utilisation de l'appareillage de visualisation développé à Grenoble par Boulon et Hassan (1994) et Hassan (1995). Cet appareillage original permet d'enregistrer, image par image, les coordonnées de points identifiés et va nous permettre, dans notre application, de déterminer le déplacement et la rotation d'un certain nombre de grains de notre échantillon.

IV.3.2. Procédure expérimentale et dépouillement des essais

Les essais sont filmés à l'aide d'un camescope Sony-Hi8, fixé sur l'appareil. Ce camescope compact donne des images de très grande qualité. La durée d'enregistrement a varié entre 60 et 120 min, en continu. Une fois l'enregistrement effectué, le film est transféré sur une cassette U-MATIC qui est transmise, pour dépouillement, au laboratoire 3S/IMG. Ce processus explique le faible nombre d'essais analysés, l'accent ayant été mis sur l'étude de l'influence de la pression radiale initiale, étude complémentaire à celle réalisée par Hassan (1995), qui se limitait à de faibles pressions.

Le dépouillement des essais se fait à l'aide d'un appareil de mesure vidéo "Vidéo Measuring Gauge IV-560" qui permet de déterminer les coordonnées cartésiennes de différents points affichés sur un écran moniteur de grande taille (figure IV-5). Ces coordonnées sont ensuite enregistrées dans un fichier ASCII qui pourra être traité avec un tableur. La résolution du système PAL utilisé est de 800 pixels horizontalement et de 600 pixels verticalement, la précision de la mesure étant de 1 pixel.

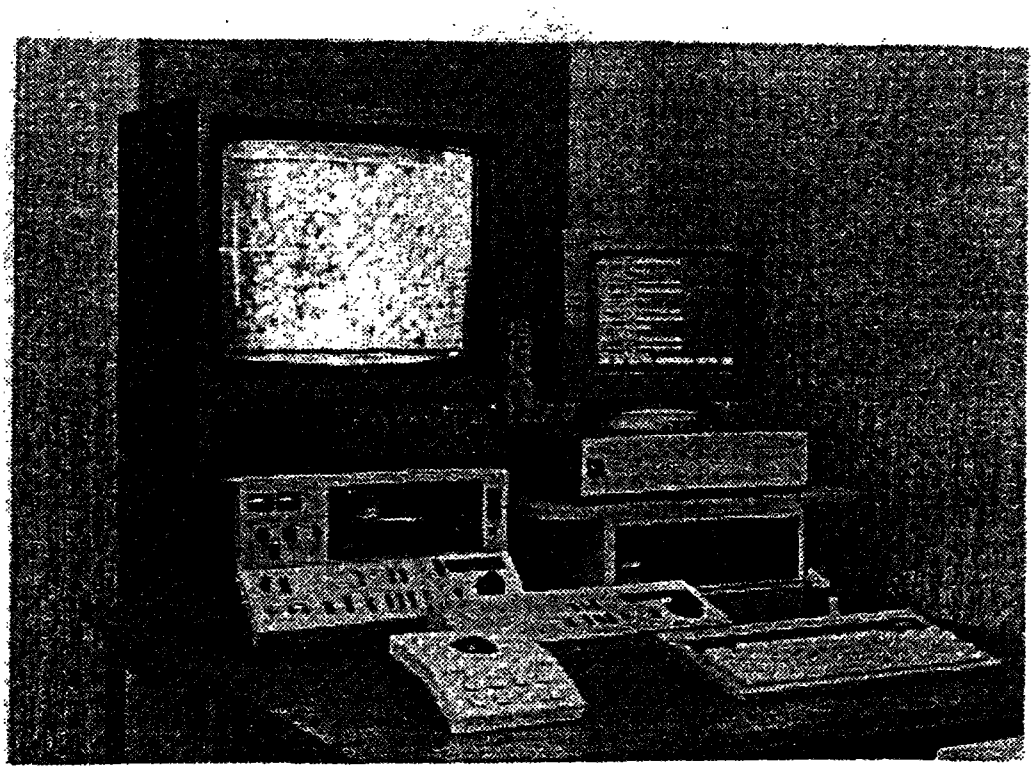


Figure IV-5. *Vue de l'appareillage d'extraction de coordonnées (d'après Hassan, 1995)*

Cette technique nécessite de pouvoir suivre, pour une particule donnée du matériau, le champ de coordonnées de deux de ses points. Il faut donc pouvoir tracer un segment de droite sur une face plane de la particule. L'utilisation d'un matériau ayant des grains de dimension suffisante est donc nécessaire, d'où l'utilisation du gravier d'Hostun 14~10 présentant un D_{50} de 3,3 mm.

Entre quinze et vingt grains sont repérés par essai. Ils sont tout d'abord peints, puis numérotés et ensuite, sur chaque grain, un segment partant de son centre de gravité est tracé (figure IV-6). Notons que les grains sélectionnés sont obligatoirement les plus gros et que leur comportement ne reflètera pas forcement le comportement des grains de diamètre inférieur.

Les grains sont positionnés sur la plaque de verre, à différentes distances du cylindre, pour balayer la totalité de l'échantillon. Lors de la fabrication de l'échantillon, une grande attention est apportée pour ne pas trop modifier la position initiale et surtout veiller à ce que le segment reste bien visible à travers la fenêtre. Ce dispositif nécessite également la détermination de deux points fixes, qui vont servir, d'une part, à la remise à l'échelle (transformation de la distance en pixels en distance en millimètres) et, d'autre part, de repère fixe pendant l'essai de cisaillement.

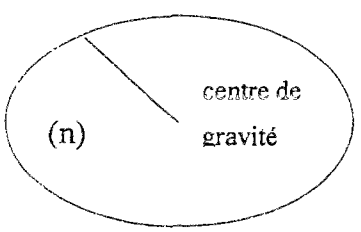


Figure IV-6. *Grain marqué pour l'analyse de son mouvement*

Pour chaque essai, nous sélectionnons 20 images qui permettent de suivre le mouvement des grains sélectionnés au cours du temps. Le temps de l'enregistrement vidéo, correspondant au déplacement tangentiel de cisaillement pour lequel nous voulons un dépouillement, est soigneusement noté. Un signal sonore est également transcrit sur la bande

vidéo (le déplacement tangentiel est directement lu sur l'écran de l'ordinateur pilotant l'appareil de cisaillement simple annulaire).

Pour chaque essai, l'extraction et le stockage des coordonnées dans un fichier est une opération laborieuse qui a été exécutée au laboratoire 3S de Grenoble. Le fichier de données contient, pour les deux points fixes et pour les deux extrémités du segment tracé sur chaque point, les deux valeurs de leurs coordonnées cartésiennes en pixel mesurées sur l'écran vidéo, le point de coordonnées (0,0) étant le coin supérieur gauche de l'écran. Les opérations réalisées pour obtenir, de ces coordonnées cartésiennes en pixel, le déplacement radial, le déplacement tangentiel et la rotation de chaque grain au cours du temps sont présentées par Yahia-Aïssa (1995). Le déplacement radial est défini comme étant la variation de rayon (à partir du centre du cylindre) et le déplacement tangentiel comme le produit de la variation d'angle par le rayon (en coordonnées polaires).

IV.3.3. Programme d'essais

Nous avons choisi d'analyser les essais réalisés sur des échantillons de gravier d'Hostun dense avec une interface rugueuse. Ce choix a été fait d'une part, en fonction du programme d'essais du 3ème chapitre et, d'autre part, en fonction de l'étude bibliographique. L'étude bibliographique montre qu'une couche d'interface d'une épaisseur significative (8 à 10 grains) se développe en présence d'une interface rugueuse. Les essais à pression radiale constante ont été privilégiés (pression radiale initiale de 100, 200, 400 et 600 kPa) et deux essais à volume constant ont été analysés (100 et 200 kPa). Deux essais ont été doublés pour avoir un aperçu de la reproductibilité et de l'influence du choix des grains suivis (tableau IV-1).

Tableau IV-1. *Caractéristiques des essais avec visualisation du mouvement des grains.*

interface	*compacité*	*condition*	*100 kPa*	*200 kPa*	*400 kPa*	*600 kPa*
rugueuse	dense	pres. rad. const.	**2604-15**	**1904-11**	**2404-13**	**2104-12** **0405-17**
		volume constant	**1504-10** **2504-14**	**3103-7**		

IV.3.4. Interprétation des résultats

Le dépouillement des films nous a permis d'analyser, dans un premier temps, la rotation des grains dans la couche d'interface puis, dans un second temps, les déplacements globaux des grains de l'échantillon (déplacement normal et déplacement tangentiel), résultats confirmés par l'observation directe à travers les fenêtres à la base de l'échantillon. Rappelons que le D_{50} du gravier d'Hostun est de 3,3 mm. Nous avons donc choisi des grains situés sur une épaisseur de l'ordre de 2 à 3 cm, correspondant à la couche d'interface que nous devons obtenir en considérant les résultats de l'étude bibliographique. Certaines valeurs ne sont plus mesurées en cours d'essai car nous perdons la trace de grains situés dans l'interface soit parce que de fines particules viennent masquer le grain, soit parce que ce grain se casse.

IV.3.4.1 Analyse de la rotation des grains au sein de l'interface

Pour chaque essai, la rotation de chaque grain est représentée en fonction du déplacement tangentiel de l'interface. Les résultats obtenus, lors de l'essai à 100 kPa, nous indiquent de grandes différences selon la position initiale du grain (figure IV-7). Pour les grains n°2, n°7 et n°12 touchant le cylindre d'interface, nous observons des rotations allant jusqu'à 35°. Cette valeur augmente régulièrement avec le déplacement tangentiel de l'interface sauf pour un grain pour lequel la rotation change de sens (grain n°12). Pour les grains situés à deux ou trois diamètres du cylindre (grains n° 3, n°8 et n°13), les rotations sont limitées à 15°. Pour les autres grains, elles restent inférieures à 5°. Les valeurs des rotations sont donc proportionnelles à la position radiale des grains.

Cette observation est confirmée par les essais réalisés à 200 kPa de pression radiale (figure IV-8), à 400 kPa de pression radiale (figure IV-9) et 600 kPa de pression radiale (figure IV-10).

L'amplitude des rotations des grains diminue avec la valeur de la pression radiale. Pour l'essai réalisé à 100 kPa, les rotations atteignent des valeurs de 35°, pour 200 kPa des valeurs de 25°, pour 400 kPa également des valeurs de 25° (mais uniquement pour un grain) et pour 600 kPa, aucune rotation n'atteint 10°.

Ces résultats sont confirmés par les valeurs obtenues, à volume constant, pour une pression radiale initiale de 100 et 200 kPa (figure IV-11 et figure IV-12) et par les observations faites par Hassan (1995) lorsqu'il compare des essais réalisés à 50 et 125 kPa de contrainte normale initiale.

IV.3.4.2 Mouvement des grains : déplacements tangentiels et déplacements normaux

Sur les figures IV-13 et IV-14, l'évolution des déplacements tangentiels est représentée en fonction du déplacement total de l'interface. La position initiale des grains est reportée sur l'axe des abscisses. Il faut noter que tous les points sont exploités et qu'ils ne se situent pas sur un seul rayon. Ceci explique les formes chaotiques obtenues. Pour ces quatre essais, pour un déplacement tangentiel final de 5 cm, nous observons le même type de déformation. De forts déplacements apparaissent dans une zone proche de l'interface, et ces déplacements sont très limités lorsque l'on s'éloigne du cylindre d'interface. Les résultats présentés ne montrent pas clairement l'influence de la pression radiale initiale sur les déformations observées.

En ce qui concerne les déplacements normaux, leurs valeurs sont très proches de la résolution du dispositif de dépouillement utilisé. Contrairement aux essais réalisés avec une boîte de cisaillement direct, où il se produit une circulation de grains entre la partie amont et la partie aval de la demi-boîte, liée aux effets de bord, les essais à l'appareil de cisaillement simple annulaire ne présentent pas ce type d'inconvénients. Ceci explique sans doute partiellement les très faibles déplacements normaux obtenus.

De très bonnes analyses peuvent être faites directement par observation à travers les deux fenêtres réservées à cet usage (figure IV-15). La déformation de l'échantillon est très similaire à celles obtenues par dépouillement de films. La couche d'interface s'identifie très clairement, avec une épaisseur de 6 à 8 grains, pour les essais sur échantillon de sable dense avec une interface rugueuse. La partie de la plaque de verre en contact avec la couche d'interface se dégrade rapidement et permet de retrouver cette épaisseur.

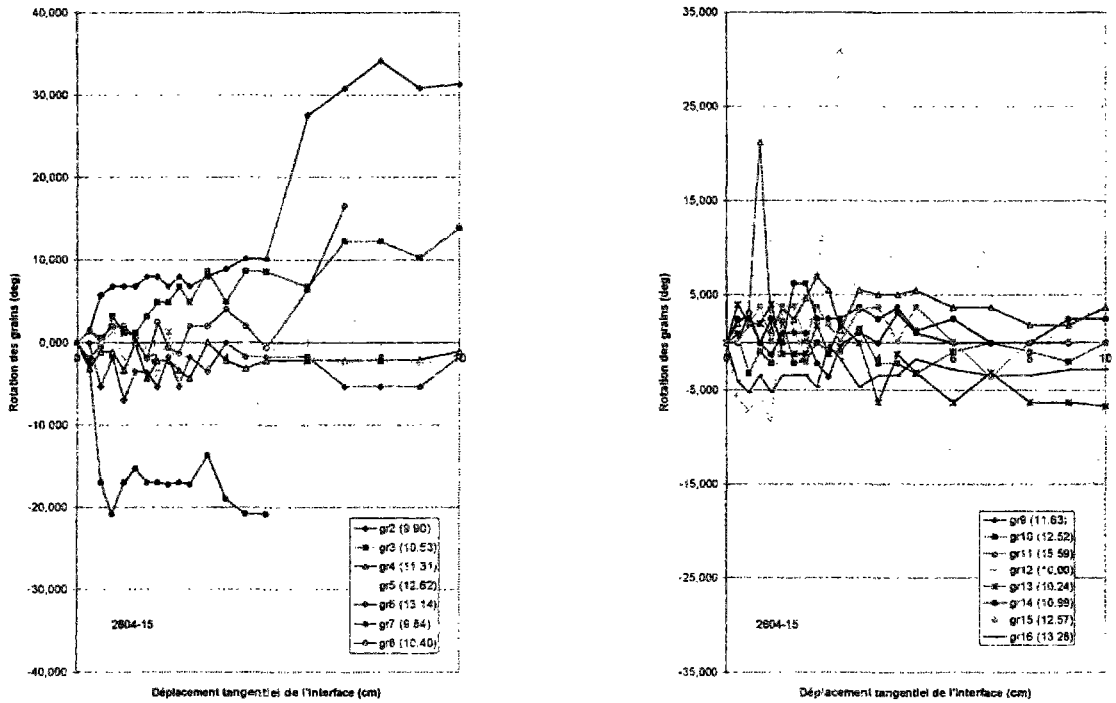


Figure V-7. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; essai à pression radiale constante (100 kPa), interface rugueuse, gravier d'Hostun dense*

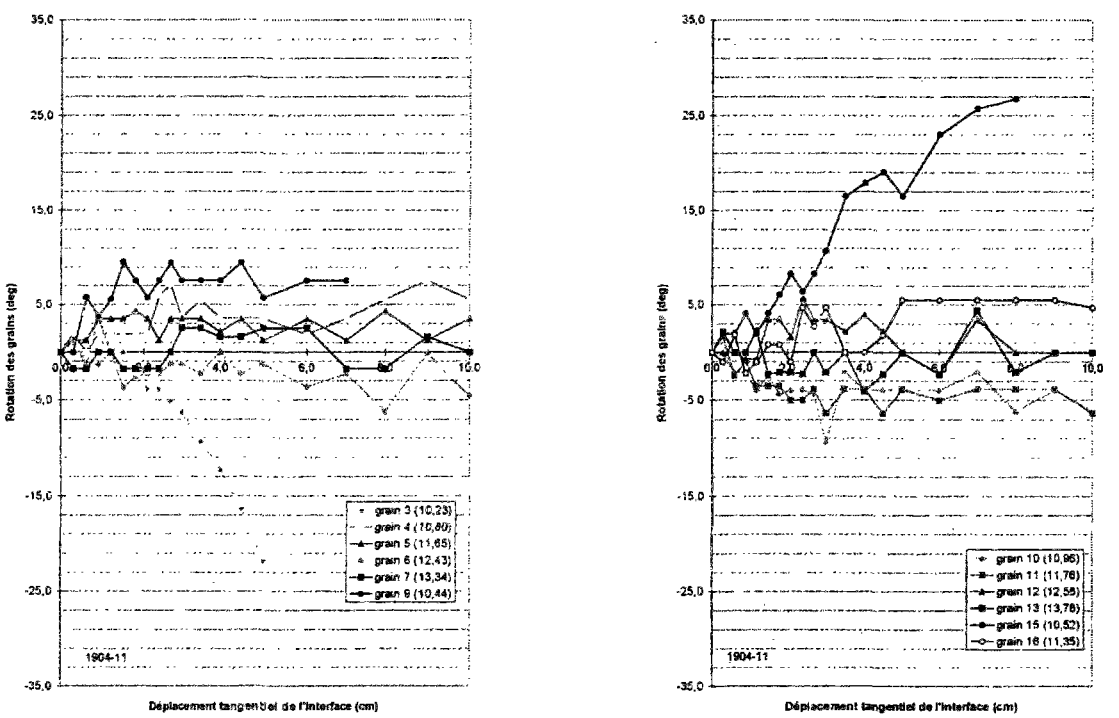


Figure V-8. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; essai à pression radiale constante (200 kPa), interface rugueuse, gravier d'Hostun dense*

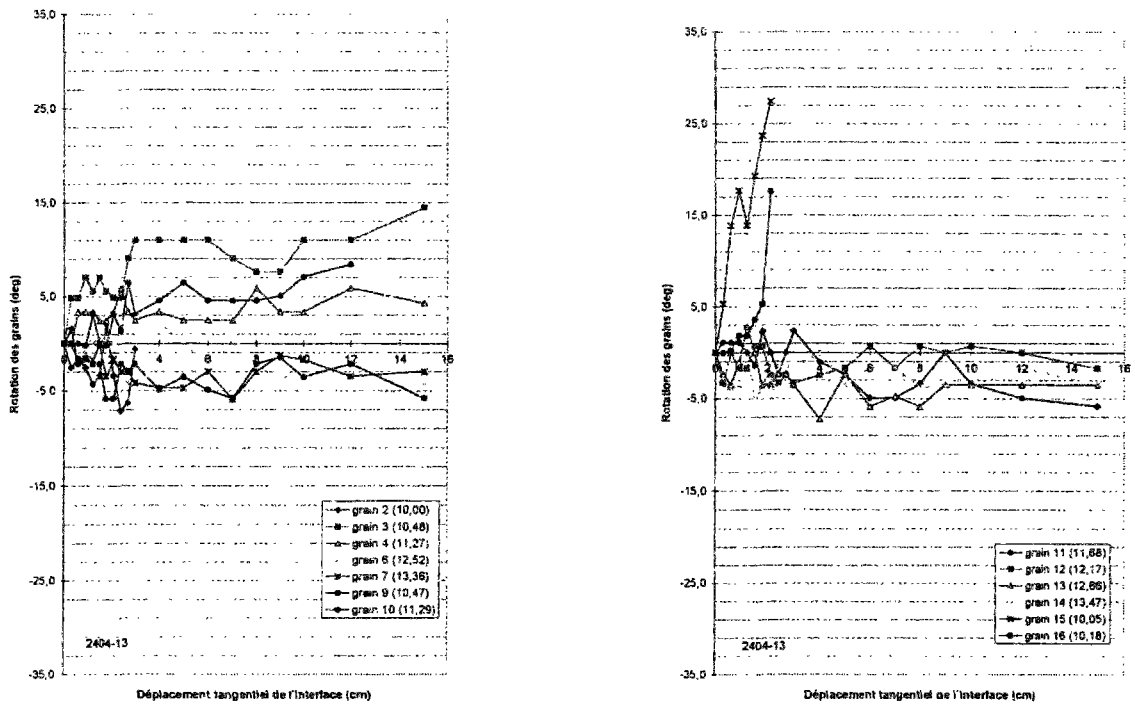


Figure V-9. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; essai à pression radiale constante (400 kPa), interface rugueuse, gravier d'Hostun dense*

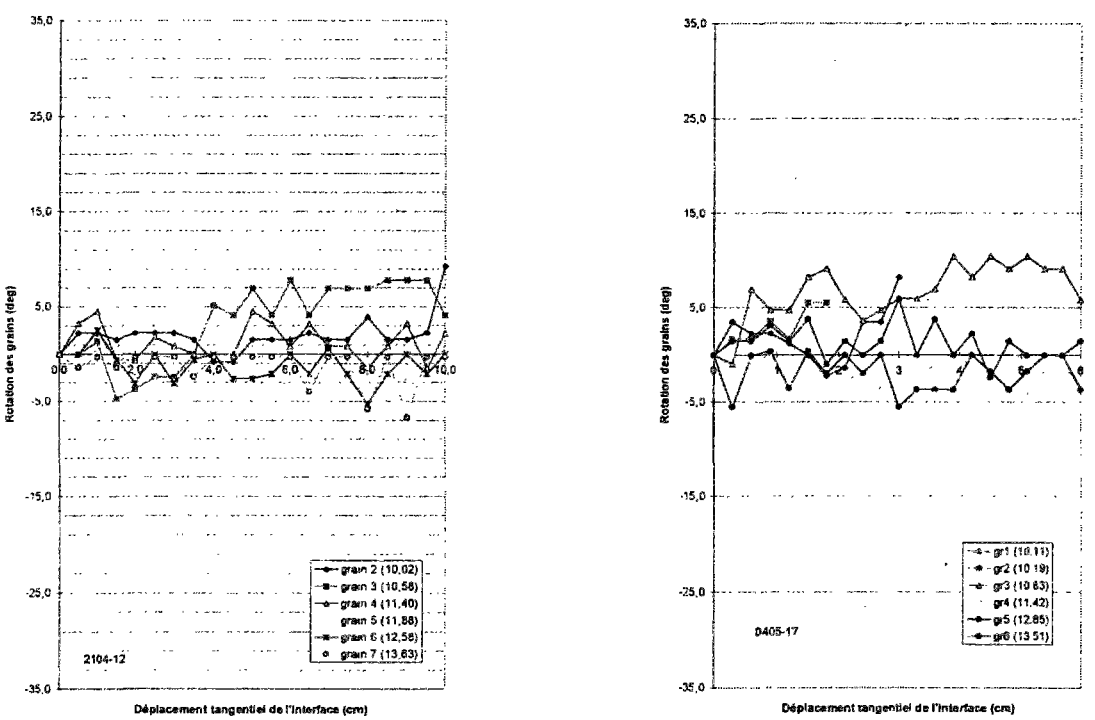


Figure V-10. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; essai à pression radiale constante (600 kPa), interface rugueuse, gravier d'Hostun dense*

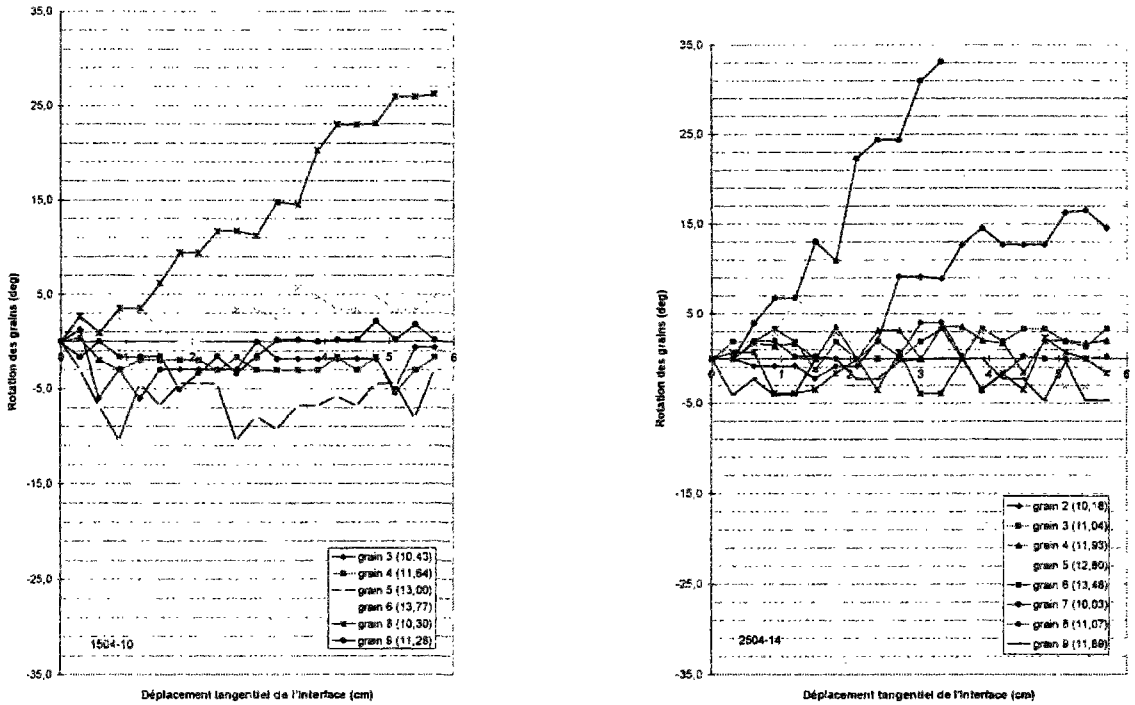


Figure V-11. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; essai à volume constante (σ_{3i} = 100 kPa), interface rugueuse, gravier d'Hostun dense*

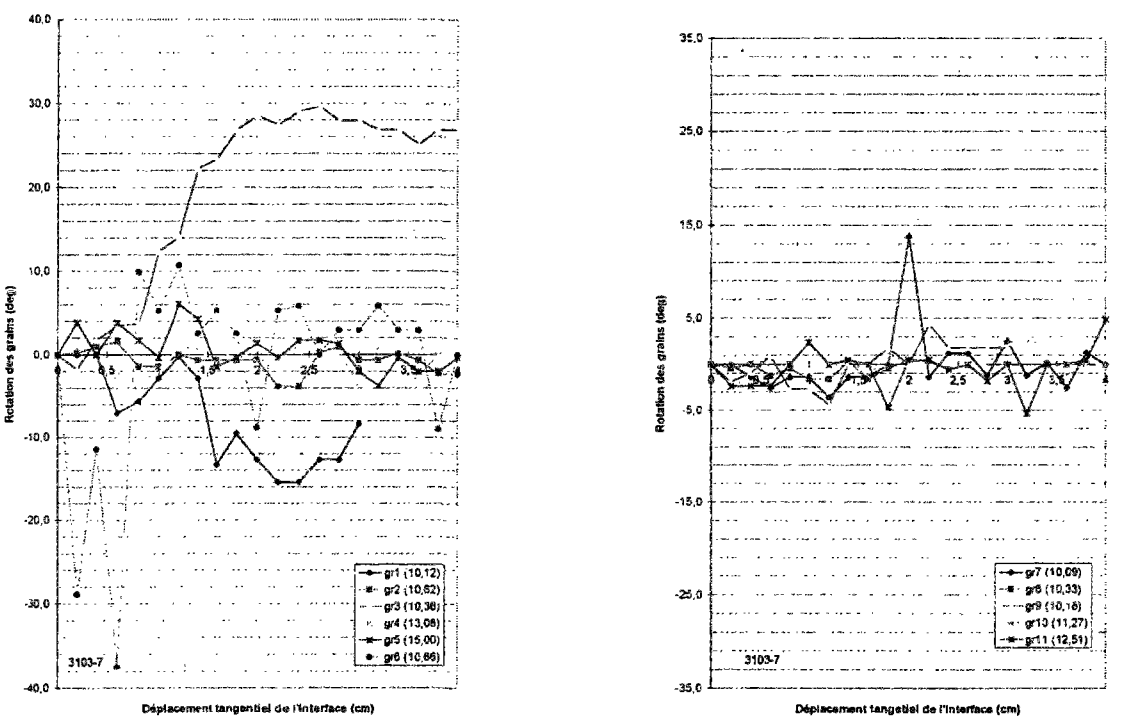


Figure V-12. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; essai à volume constante (σ_{3i} = 200 kPa), interface rugueuse, gravier d'Hostun dense*

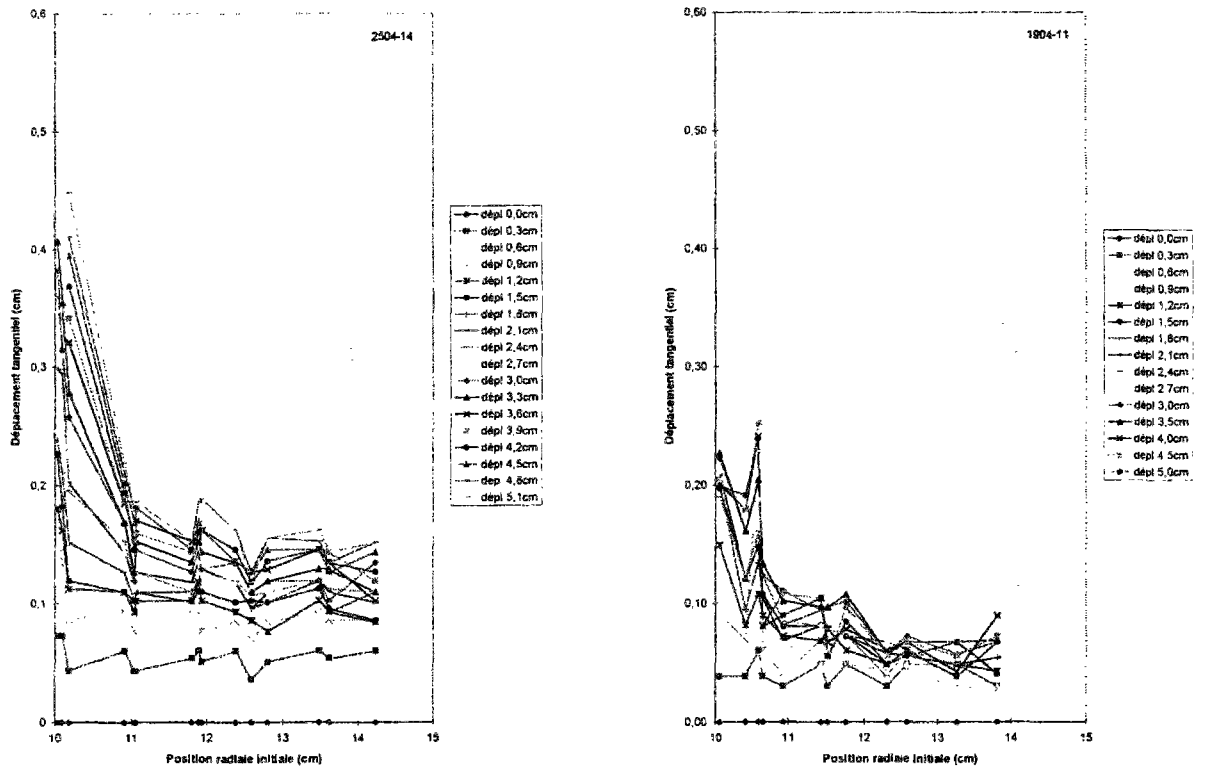


Figure V-13. *Déplacement tangentiel des grains en fonction de leur position radiale initiale pour différentes valeurs du déplacement tangentiel de l'interface (a) σ_i = 100 kPa (b) σ_i = 200 kPa*

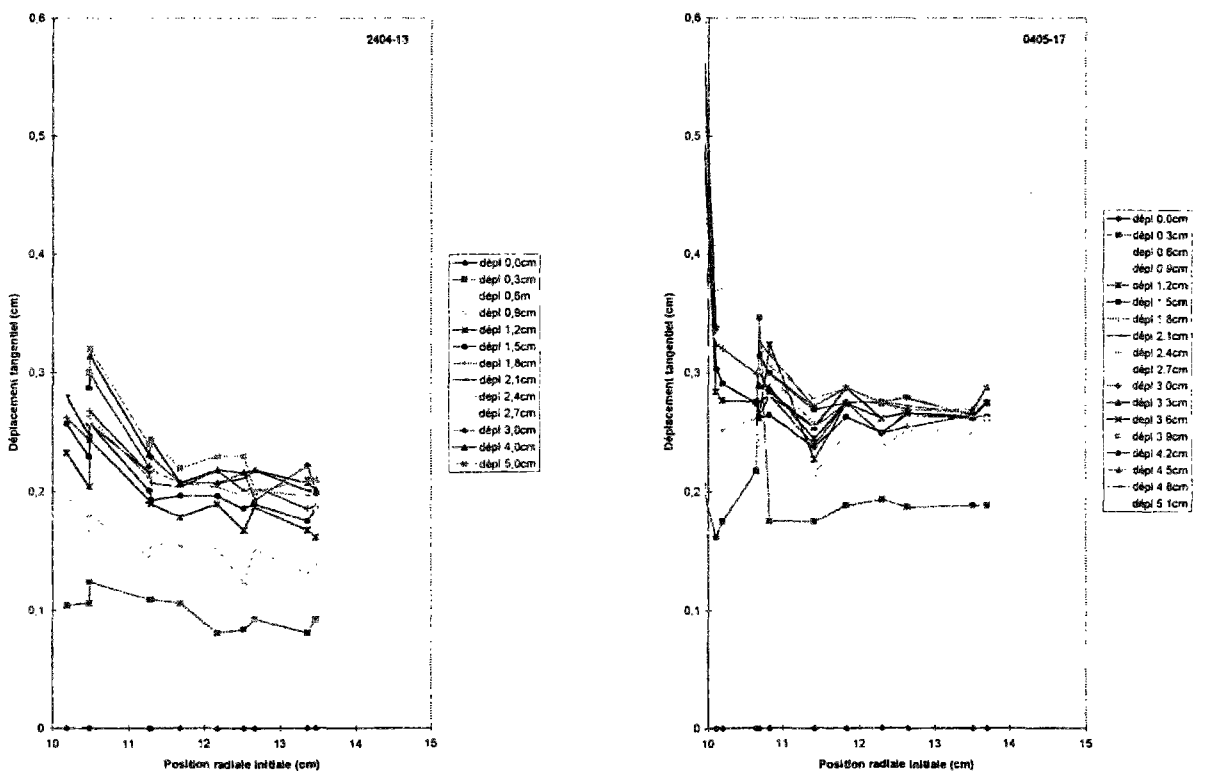


Figure V-14. *Déplacement tangentiel des grains en fonction de leur position radiale initiale pour différentes valeurs du déplacement tangentiel de l'interface (a) σ_i = 400 kPa (b) σ_i = 600 kPa*

IV.3.5. Conclusion

L'observation du mouvement des grains au sein de la couche d'interface faite à partir d'essais de cisaillement simple annulaire sur le gravier d'Hostun 14~10 confirme les résultats obtenus par d'autres auteurs. La couche d'interface se caractérise par de forts déplacements tangentiels (dans le sens du cisaillement) et l'apparition de rotation des grains. Cependant, pour le gravier que nous avons utilisé, la rotation des grains reste limitée. En effet, nous n'avons pas pu suivre l'évolution des grains en contact avec le cylindre pour de grands déplacements. Dans de nombreux cas, du fait qu'il s'agissait des grains de plus fortes tailles, ils subissaient plus de rupture que le reste des grains de l'échantillon. D'autre part, la production de fines particules rend l'observation particulièrement difficile.

Le nombre d'essais dépouillés étant relativement faible, des analyses complémentaires sont souhaitables, en particulier avec des procédures de dépouillement automatisées plus conviviales.

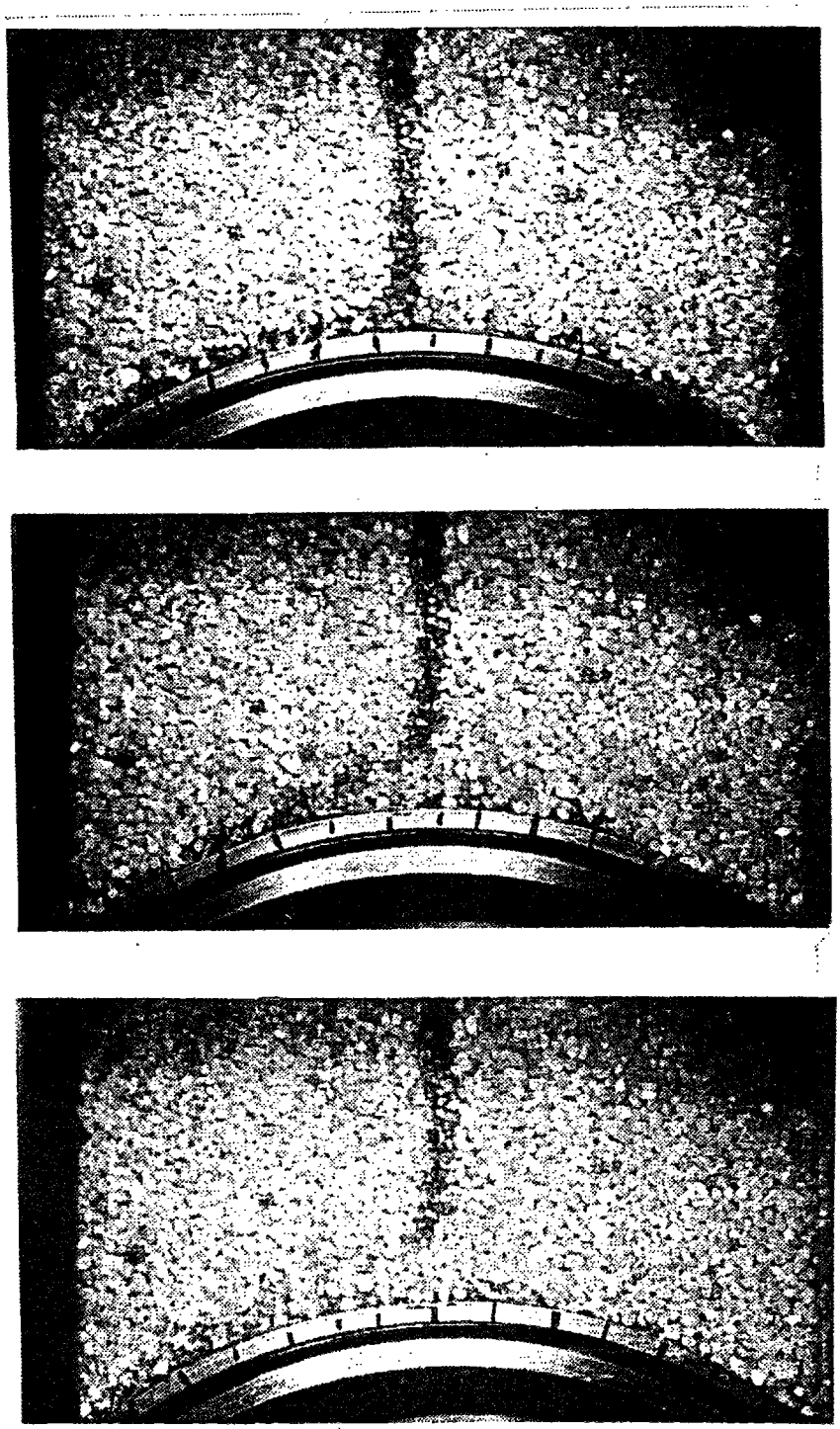


Figure IV-15. *Visualisation directe du mouvement des grains dans la couche d'interface*

IV.4. Utilisation du matériau analogique de Schneebeli

"Les modèles analogiques présentent, par rapport aux modèles réalisés avec un sable, l'avantage qu'ils éliminent entièrement l'effet des parois latérales que subissent ces derniers. Ils éliminent du fait même de leur structure, les contraintes intermédiaires".

A partir de cette analyse de Schneebeli (1957), il nous est apparu intéressant d'adapter l'appareil de cisaillement simple annulaire pour pouvoir cisailler un échantillon constitué de rouleaux de Schneebeli. La nécessité de mieux comprendre les relations qui existent entre le comportement global (macroscopique) et les phénomènes locaux (microscopique) nécessite cette approche micromécanique.

Cette étude est le volet expérimental d'un projet plus global, qui analyse la micromécanique du cisaillement d'interface d'un milieu granulaire par un corps rigide (Lerat et *al.*,1995). Nous présenterons la méthodologie et les résultats obtenus par l'analyse numérique à partir de la théorie des contacts.

IV.4.1. Etude bibliographique

Dans ses travaux, Terzaghi a appliqué à un matériau très complexe, le sol, des schémas théoriques très simples. Il a obtenu un matériau théorique beaucoup plus simple que le sol réel. Schneebeli (1957) a continué à développer cette analogie fondamentale entre matériaux réels et matériaux théoriques en mettant au point, pour la représentation expérimentale d'un sol sans cohésion, un empilement de rouleaux cylindriques. Cet empilement de rouleaux, dénommés rouleaux de Schneebeli ou matériau analogique bidimensionnel, doit vérifier trois choses : être homogène et isotrope et vérifier un critère de rupture de Coulomb.

Des essais de compression biaxiale ont montré que les empilements de rouleaux se comportent comme un matériau grenu à condition d'utiliser des rouleaux d'au moins deux diamètres. L'angle de frottement interne obtenu peut varier entre 24 et 35°, selon la rugosité

de la surface des rouleaux. A partir d'une synthèse bibliographique essentiellement basée sur les travaux d'équipes françaises (tableau IV-2), nous avons analysé la granulométrie des différents types de rouleaux utilisés pour mieux comprendre son influence.

Tableau IV-2. *Synthèse des études effectuées à l'aide du matériau analogique (à partir de Gourvès et Abriak, 1991)*

Auteurs	**Etudes réalisées**	**Nature des rouleaux**	**Φ (mm) et proportion en poids**
1956 : Schneebeli	Analogie mécanique	Duralumin	2 et 3 / 50%
1962 : Biarez	Anisotropie du milieu Equilibre limite des fondations	Duralumin	3 et 5 / 50%
1965, 1971 : Nhiem	Fondations superficielles	Duralumin	3 et 5 / 50%
1966 : Weber	Contraintes intergranulaires	Pyrex	2, 4,5 / 56, 22, 22
1969 : Ladanyi, Hoyaux	Ecoulement en silo	Aluminium	3; 4,7/50%
1971 : Fagnoul, Loix	Fondations superficielles	Duralumin	3 et 5 / 50%
1977 : Tratapel	Essais biaxiaux	P.V.C rugueux	1,5 et 3
1978 : Chambon, Darve	Mesures et calculs pour un modèle	P.V.C rugueux	1,5; 3 / 33, 66
1978 : Ferri	Fondation profonde	P.V.C. lisse	2,3,4/33%
1979 : Cambou	Géométrie et comportement mécanique du milieu	Duralumin	3, 5 / 50% 2,3,5/ 10,10, 80
1979 : Ortholary	Fondation superficielle	P.V.C. lisse	2,3,4/ 33%
1979 : Faugeras	Fondation profonde	P.V.C. lisse	2,3,4/ 33%
1980 : Monnet, Kastner	Loi de comportement	Acier inox	3,4,5/ 33%
1980 : Faugeras, Gourves	Efforts sur les particules	P.V.C. lisse	2,3,4/ 33%
1981 : Monnet, Menier	Rhéologie du matériau	Duralumin	3,4,5/50,30,20
1986 : Adamiec	Ecoulement en silo	Laiton	4,6,8 / 33%
1987 : Mezghani	Contrainte macroscopique	P.V.C. lisse	2,3,4/ 33%
1988 : Gourves Mezghani	Micromécanique des m. granulaires	P.V.C. lisse	2,3,4/ 33%
1991 : Abriak	Ecoulement à travers un orifice	P.V.C. lisse	2,3,4/ 33%
1991 : Subhash et *al.*	Essais de cisaillement simple	P.V.C.	6, 10, 15 / 33%
1992 : Jo er, Lanier	1γ2ε	P.V.C.	1,5;3;6/ 33%

Hormis pour les premières études, le matériau utilisé est généralement constitué de trois diamètres différents, afin de ne pas favoriser le développement d'arrangements géométriques particuliers et avoir une meilleure homogénéité. Nous choisirons donc un matériau constitué de grains de trois diamètres différents.

IV.4.2. Essais à l'appareil de cisaillement simple annulaire

IV.4.2.1 Utilisation d'un appareil de Couette

Bogdanova-Bontcheva et Lippmann (1975) ont réalisé des essais de cisaillement simple annulaire sur un échantillon de rouleaux de Schneebeli avec un appareil de cisaillement de Couette. Pour une rugosité importante, ils obtiennent une épaisseur d'interface de 4 à 6 rouleaux (figure IV-16).

Löffelmann (1989), avec le même appareillage, a obtenu des résultats similaires (figure IV-17). Il a utilisé un échantillon composé de rouleaux de trois diamètres différents.

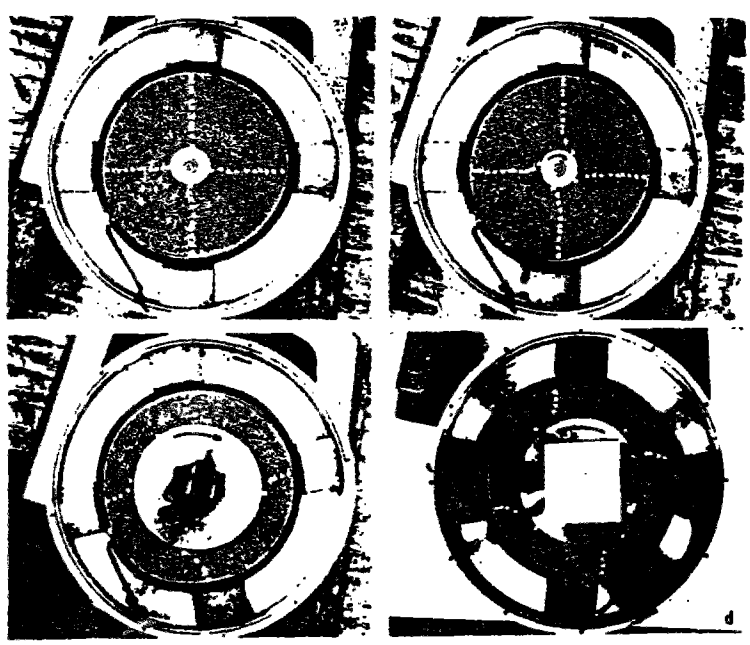


Figure IV-16. *Essai de cisaillement simple annulaire de rouleaux de Schneebeli (d'après Bogdanova-Bontcheva et Lippmann, 1975)*

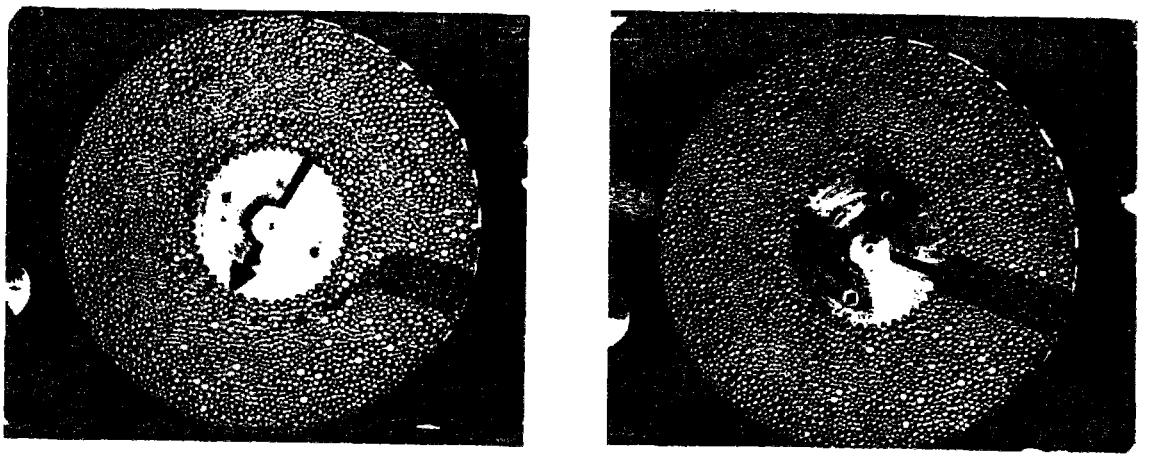


Figure IV-17. *Essai de cisaillement simple annulaire de rouleaux de Schneebeli (d'après Löffelmann, 1989)*

IV.4.2.2 Modification de l'appareil de cisaillement simple annulaire

La réalisation d'essais de cisaillement simple annulaire sur un échantillon de rouleaux de Schneebeli a nécessité de nouvelles pièces mécaniques (figure IV-18). La plaque de verre et la couronne la fixant sur le plateau inférieur de l'appareil ont été remplacées par une plaque métallique. Les dimensions de cette plaque ont été choisies pour que le cylindre d'interface puisse se positionner en son centre.

Le confinement de l'échantillon se fait par l'intermédiaire d'un cylindre métallique, qui se fixe sur la plaque inférieure, et d'un vérin torique, qui a été développé en collaboration avec la société Pronal. Ce vérin est rempli d'eau et est relié à un contrôleur de pression - volume GDS. Il supporte une pression interne de 800 kPa. En se déformant, il applique une pression à l'échantillon qui se trouve confiné. Sa hauteur (100 mm) a été déterminée de façon à appliquer sur les rouleaux qui sont en contact avec sa paroi, une pression uniforme et égale à sa pression interne. Une partie évidée de la plaque métallique inférieure est remplie de mousse déformable. Lors de l'application d'une pression à l'intérieur du vérin, la membrane, en haut et en bas, ne se déforme pas de façon homogène. Ces déformations se trouveront d'une part au niveau de la mousse et d'autre part au dessus des rouleaux de Schneebeli. L'échantillon annulaire a les dimensions suivantes : rayon intérieur : 100 mm , rayon extérieur : 200 mm et hauteur : 60 mm.

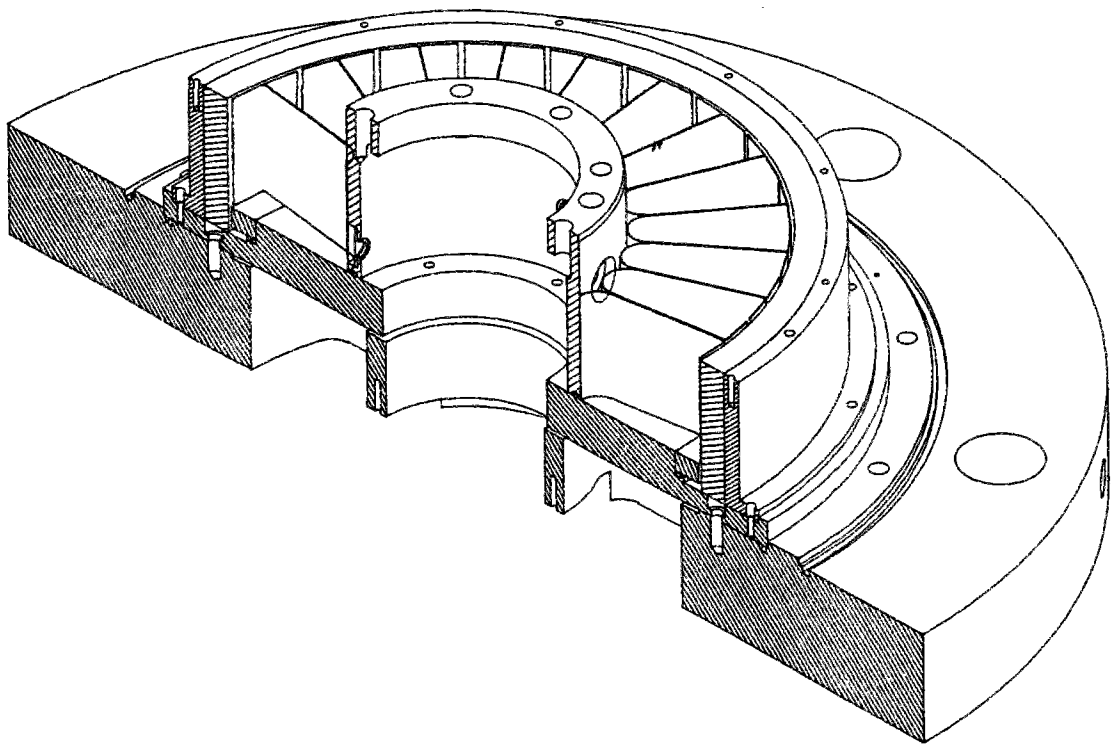


Figure IV-18. *Configuration de l'appareil de cisaillement simple annulaire pour réaliser des essais sur des échantillons de rouleaux de Schneebeli*

Les mêmes essais que sur des échantillons de sable ou de gravier peuvent être réalisés : essai à pression radiale constante ou à volume constant, interface lisse ou rugueuse. Les mêmes mesures sont effectuées. Un appareil photographique et un camescope peuvent être utilisés pour suivre le mouvement des grains au cours du cisaillement

IV.4.2.3 Matériaux utilisés

Les premiers essais que nous avons réalisés ont été faits avec des rouleaux de Schneebeli, de trois diamètres (1,2 ; 2 et 3 mm), d'une hauteur de 60 mm, fournis par le laboratoire 3S. Ces rouleaux ont un diamètre comparable aux dimensions des grains du gravier 14~10. Les résultats qualitatifs préliminaires obtenus sur la déformation de l'échantillon (figure IV-19) ont montré une parfaite analogie avec les déformées observées lors d'essais sur le gravier

14-10 (figure IV-15). Cependant, l'utilisation de ces rouleaux, étant donné leur nombre élevé pour constituer l'échantillon, ne permet pas une modélisation par la méthode des éléments discrets.

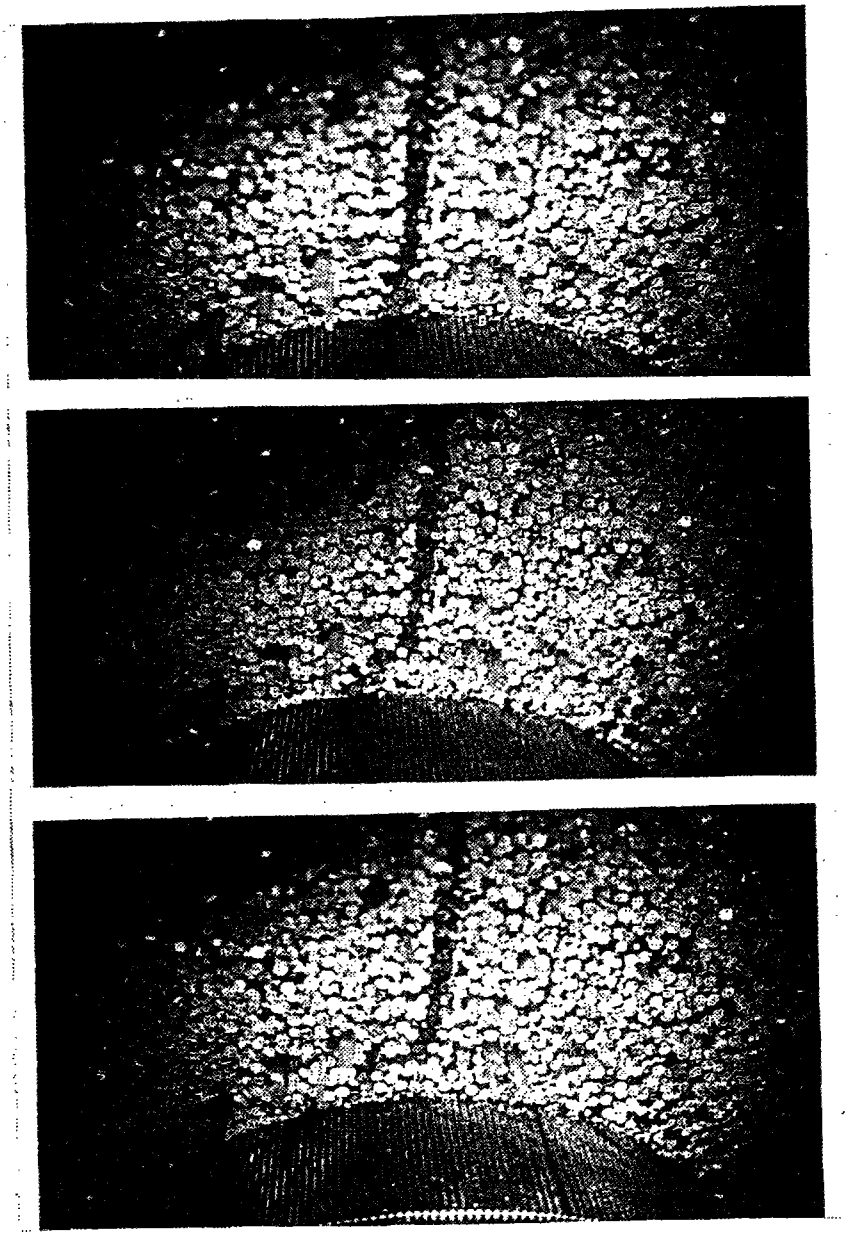


Figure IV-19. *Essai de cisaillement simple annulaire sur un échantillon de rouleaux de Schneebeli de petites dimensions*

Nous avons donc fabriqué des rouleaux de diamètres 6, 8 et 10 mm. Ces rouleaux, en P.V.C., ont été rendus rugueux en les frottant au papier de verre. L'angle de frottement rouleau-rouleau ainsi obtenu est de 25°. Cet angle a été déterminé en mesurant le couple nécessaire pour mettre en rotation un rouleau, sur lequel on applique une contrainte normale, en équilibre sur deux autres rouleaux. Leur hauteur est de 60 mm. La fabrication de

l'échantillon se fait par l'utilisation de compartiments (visibles sur la figure IV-18) à l'intérieur desquels sont empilés horizontalement des rouleaux. Ensuite, nous pouvons les "pincer" à l'intérieur des compartiments pour les disposer verticalement. Ainsi, au fur et à mesure, l'échantillon est construit. Cet échantillon n'est plus représentatif du comportement du gravier 14~10 mais il va servir de support à la modélisation numérique.

IV.4.2.4 Résultats des essais

Nous allons présenter les résultats obtenus lors d'un essai de cisaillement simple annulaire réalisé sur un échantillon constitué de 345 rouleaux de chaque diamètre (échantillon dense). Cet essai a été réalisé à pression radiale constante (71 kPa). Les autres essais n'apportent pas d'informations supplémentaires pour notre étude. Le cylindre d'interface utilisé ayant un R_{max} de 1mm, la rugosité de l'interface se situe au niveau de la limite entre interface lisse et interface rugueuse. 18 grains ont été marqués, et leur mouvement analysé (figure IV-20).

a. Résultats macroscopiques

La figure IV-21 présente l'évolution de la contrainte de cisaillement, de la pression de confinement, de la variation de volume et du rapport (τ/σ_3) en fonction du déplacement tangentiel de l'interface. Les courbes très saccadées que nous observons sont liées aux réarrangements successifs ("microséismes") qui se produisent lors du cisaillement. L'échantillon se comporte de façon contractante, correspondant aux résultats obtenus avec une interface lisse.

b. Mouvement des grains de l'échantillon

Comme pour les essais réalisés sur le gravier d'Hostun 14~10, un film vidéo de l'essai a été réalisé pour suivre le mouvement de certains grains. Etant donnée la taille des rouleaux, l'opération de marquage et de suivi des grains a été beaucoup plus facile que pour le gravier 14~10.

Les figures IV-22 et IV-23 présentent les déplacements tangentiels et normaux obtenus. Les déplacements tangentiels montent la formation de la couche d'interface. Cette couche a une épaisseur de l'ordre de 2 cm, équivalente au diamètre de 2 ou 3 grains. Cette épaisseur correspond à une rugosité d'interface faible. Les déplacements normaux observés sont plus importants que pour les essais réalisés sur du gravier. Ceci vient d'un réarrangement plus important au sein de l'échantillon.

De fortes rotations sont mesurées, notamment pour les grains très proches du cylindre d'interface (figure IV-24). Les points situés à plus de 2 cm du cylindre ne subissent que de très faibles rotations (inférieures à 10°) : la couche d'interface a donc bien une épaisseur de l'ordre de 2 cm.

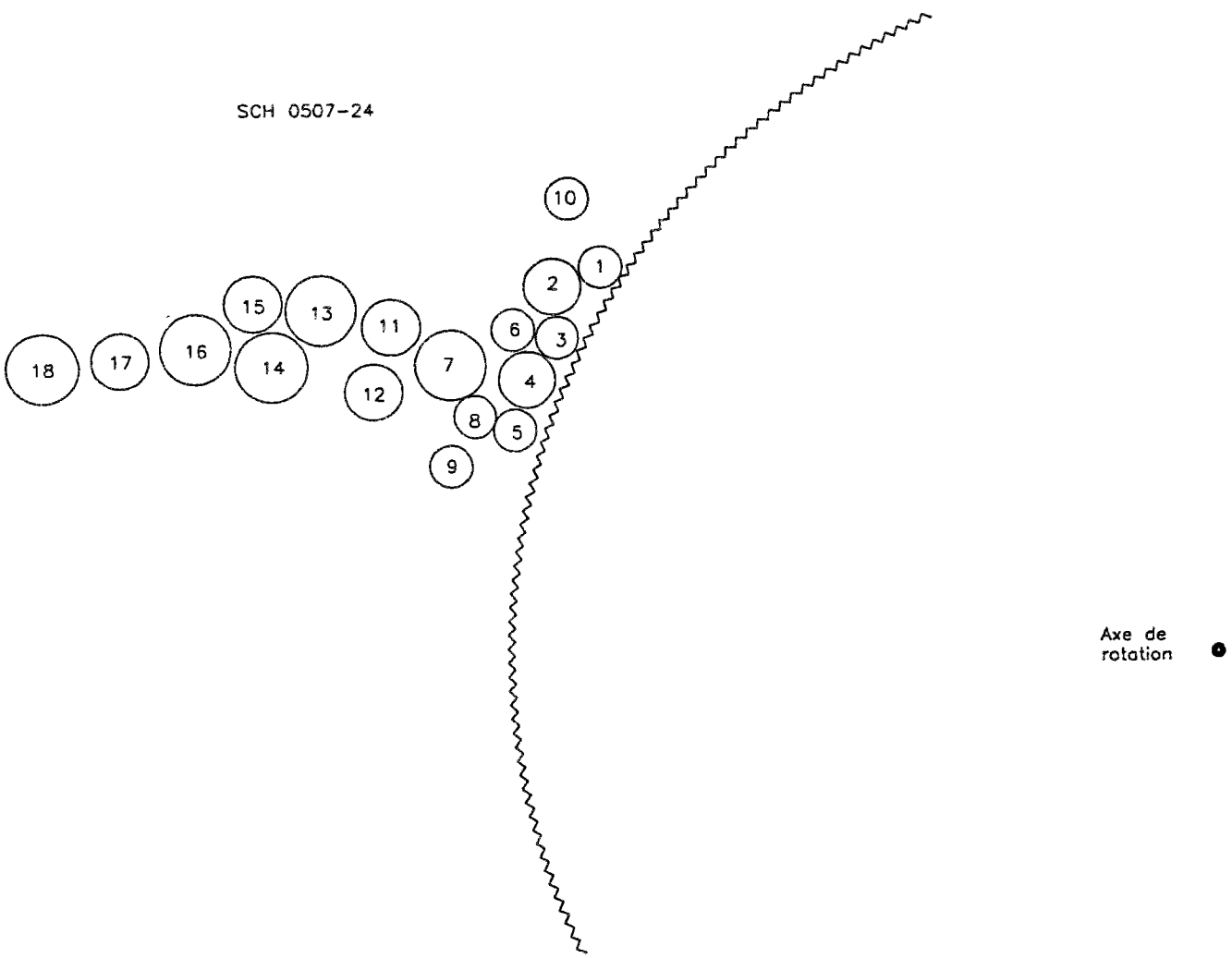


Figure IV-20. *Positions initiales des rouleaux de Schneebeli lors de l'essai analysé*

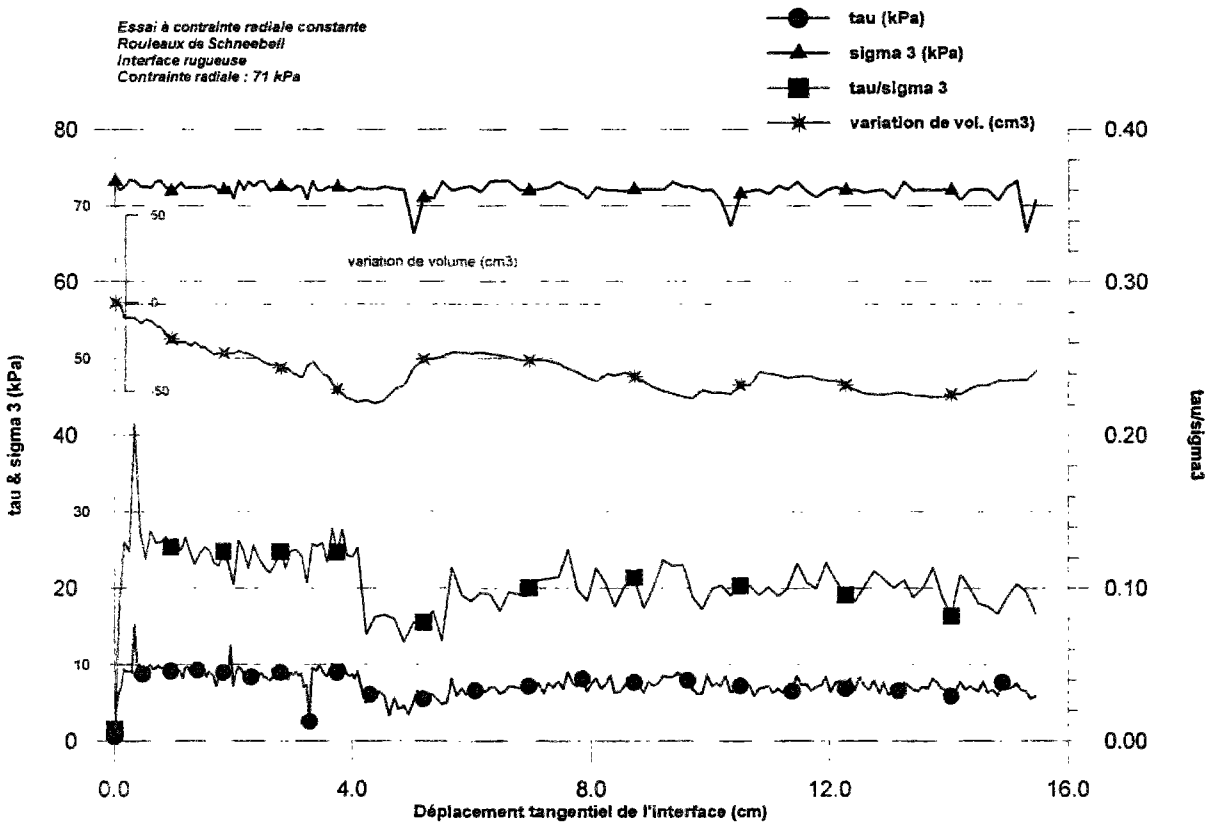


Figure V-21. *Essai de cisaillement simple annulaire sur un échantillon de rouleaux de Schneebeli pression radiale constante σ_3 = 71 kPa, interface rugueuse*

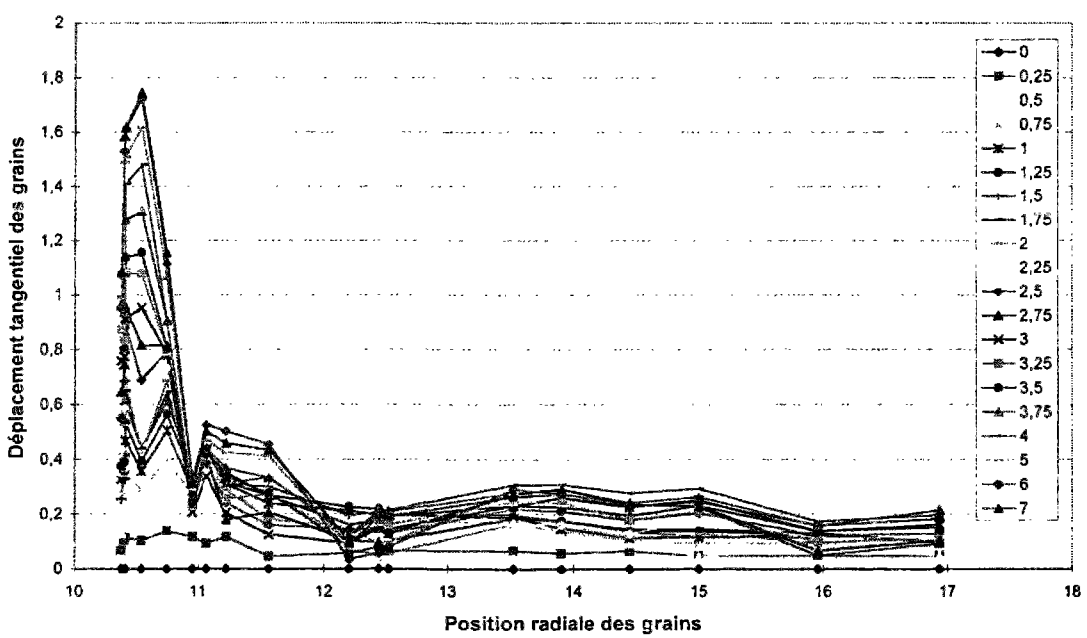


Figure V-22. *Déplacement tangentiel des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; pression radiale constante σ_3 = 71 kPa, interface rugueuse, rouleaux de Schneebeli*

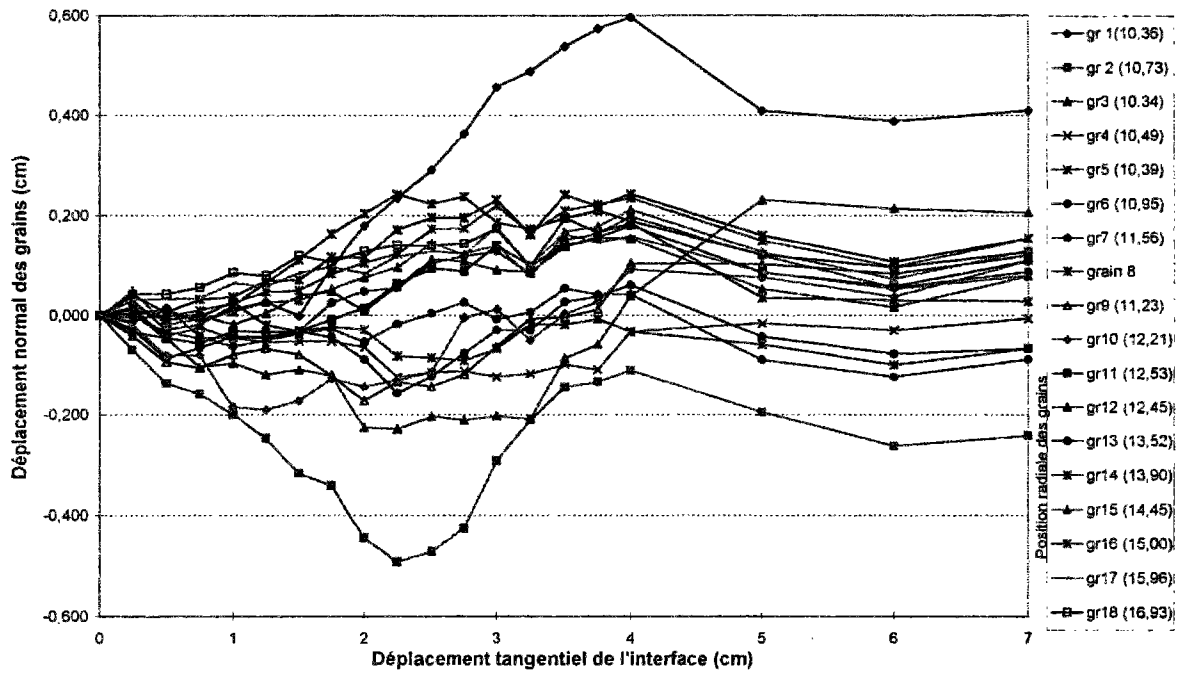


Figure V-23. *Déplacement normal des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface ; pression radiale constante σ_3 = 71 kPa, interface rugueuse, rouleaux de Schneebeli*

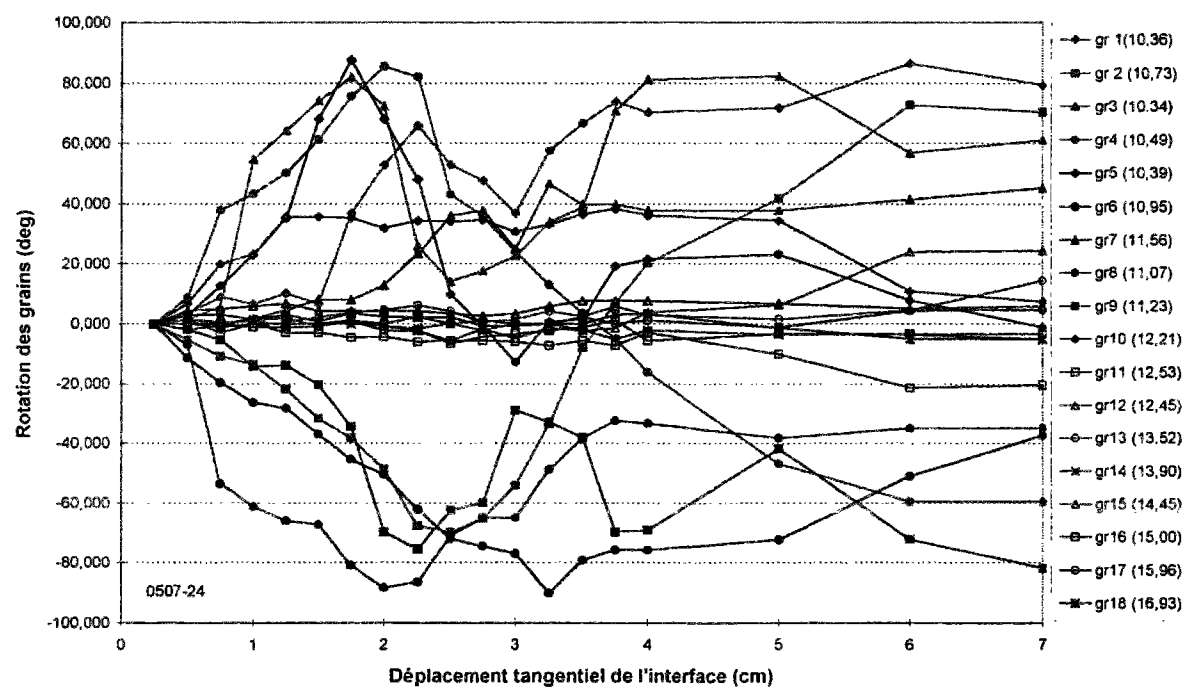


Figure V-24. *Rotation des grains en fonction du déplacement tangentiel de l'interface pression radiale constante σ_3 = 71 kPa, interface rugueuse, rouleaux de Schneebeli*

IV.4.2.5 Modélisation des essais de cisaillement simple annulaire par le logiciel L.M.G.C.

Le logiciel LMGC (Logiciel de Mécanique Gérant le Contact) a été développé pour traiter des problèmes dynamiques ou quasi-statiques où interviennent le contact et le frottement entre corps déformables ou rigides (Jean, 1990; Jean et Moreau, 1992). Ce logiciel de recherche, fondé sur les concepts mathématiques d'analyse convexe, permet de résoudre certains problèmes industriels où les effets dynamiques ne sont pas négligeables (problèmes d'impact, de vibrations de structures ou de mécanismes avec du jeu).

Un milieu granulaire est constitué d'un ensemble de particules discrètes entre lesquelles s'exercent des forces, à partir de points de contact. Des discontinuités dans les champs de contrainte ou de déformation peuvent apparaître sous une sollicitation quelconque. L'étude de l'évolution de paramètres microscopiques (forces de contact, déplacement et rotation de chaque grain) permet de mieux comprendre le comportement mécanique global de l'échantillon.

Dans notre cas, on considère que le plexiglass constituant les rouleaux est suffisamment raide pour considérer ces particules comme des corps parfaitement rigides. Le contact entre ces corps rigides se fait en présence de frottement. Les conditions unilatérales de contact sont des conditions de Signorini (pénétration entre objets nulle, pas d'attraction entre objets et réaction nulle s'il n'y a pas de contact). La loi de frottement est une loi de Coulomb (frottement entre grains et frottement grain - cylindre). La loi de choc adoptée est une loi de choc inélastique. Nous avons fixé le coefficient de restitution nul car les phénomènes dynamiques qui apparaissent pendant l'expérimentation sont très localisés et se produisent pendant des temps très réduits. Les collisions entre rouleaux, que nous pouvons observer visuellement, affectent localement le comportement de quelques grains mais n'ont pas d'effet sur le comportement microscopique de l'ensemble des particules. En fixant à zéro le coefficient de restitution, nous minimisons les effets de ce phénomène localisé et gagnons beaucoup de temps calcul. Notre problème est défini comme étant quasi-statique.

Les résultats que nous allons présenter ont été obtenus en collaboration avec l'université d'Athènes (Zervos, 1995; Zervos et *al.*, 1997). Les données de l'essai sont indiquées dans le tableau IV-3. Cette simulation reproduit l'essai réalisé avec l'appareil de cisaillement simple annulaire décrit dans le paragraphe précédent.

Tableau IV-3. *Données de la simulation numérique de l'essai de cisaillement simple annulaire*

Composition de l'échantillon	400ϕ6; 400ϕ8; 400ϕ10
Hauteur des rouleaux	60 mm
Rayon intérieur	100 mm
Rayon extérieur initial	250 mm
Coefficient de frottement :	
rouleau - rouleau	0,46631 (25°)
rouleau - cylindre	0,57735 (30°)
rouleau - membrane externe	0,83910 (40°)
Pression radiale externe	71 kPa
Vitesse de cisaillement	2π rad/sec
Durée du cisaillement	0,16071 s
Déplacement tangentiel final	101 mm

Une première difficulté de cette simulation a résidé dans la réalisation de la consolidation de l'échantillon. Il faut partir d'un échantillon lâche de rayon extérieur 25 cm que l'on ramène progressivement au rayon extérieur désiré. L'angle de frottement choisi pour cette simulation est de 25° pour le frottement rouleau - rouleau, ce qui correspond au coefficient déterminé expérimentalement. Le coefficient de frottement rouleau - cylindre a été assez fortement surestimé par rapport à celui déterminé a posteriori à l'aide de l'appareil de cisaillement simple annulaire. Pendant l'expérimentation avec l'appareil de cisaillement simple annulaire, les rouleaux contre la membrane ne subissent aucun déplacement. L'angle choisi de 40° pour le frottement rouleau - membrane sous-estime la réalité.

Une seconde difficulté est liée au temps de calcul nécessaire très long : 16 000 itérations ont été réalisées pour simuler ce cisaillement, soit plus d'un mois de calcul sur station Sun Spark 10.

La figure IV-25 représente l'échantillon avant le cisaillement, dans son état initial et après le cisaillement, dans son état final. A partir de ces deux états, le champ de déplacement des grains par rapport à leur position initiale peut être déterminé (figure IV-26 a). Nous remarquons que de nombreux rouleaux ont tendance à s'éloigner du cylindre d'interface. Les déplacements des rouleaux à la périphérie de l'échantillon sont liés au trop faible coefficient de frottement choisi.

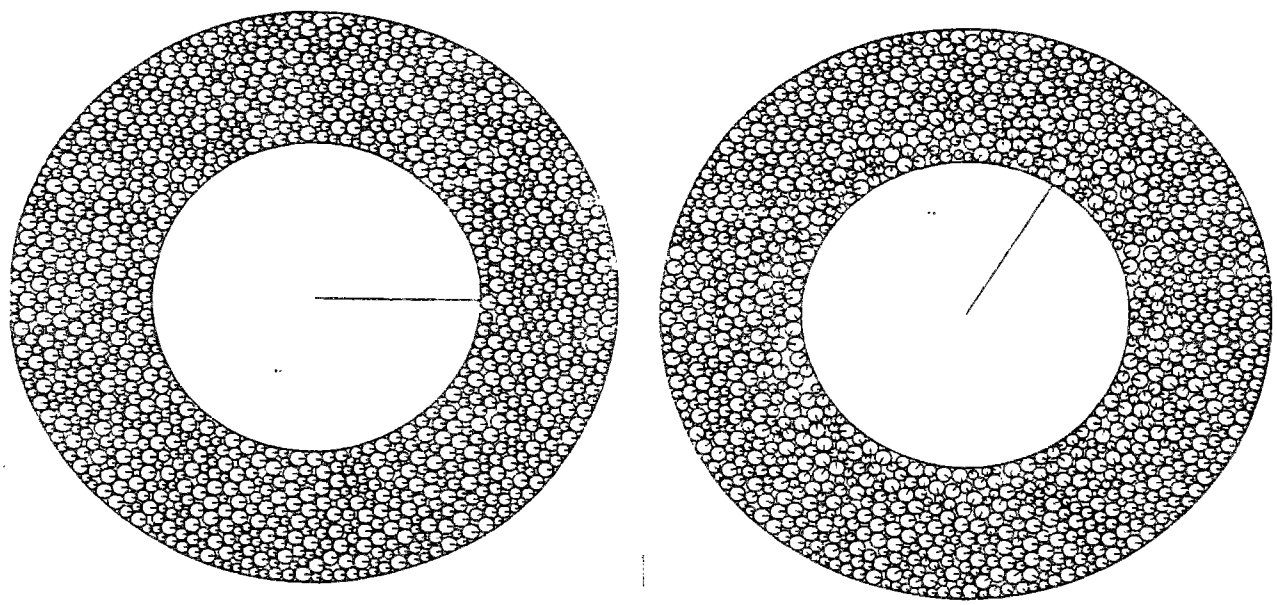


Figure IV-25. *Etat initial et état final de l'échantillon*

La figure IV-27 représente le déplacement tangentiel à la fin du cisaillement à partir de la moyenne sur 19 anneaux, ainsi que les écarts types standard et moyen (l'écart type standard s est défini par $s=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}$ et l'écart type moyen a par $a=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left\|x_i-\bar{x}\right\|$). Même si les résultats obtenus à partir de l'essai de cisaillement simple annulaire ne concernent que quelques grains alors que les résultats numériques représentent

une moyenne sur tout l'échantillon, nous observons une analogie intéressante entre la simulation et l'essai réel.

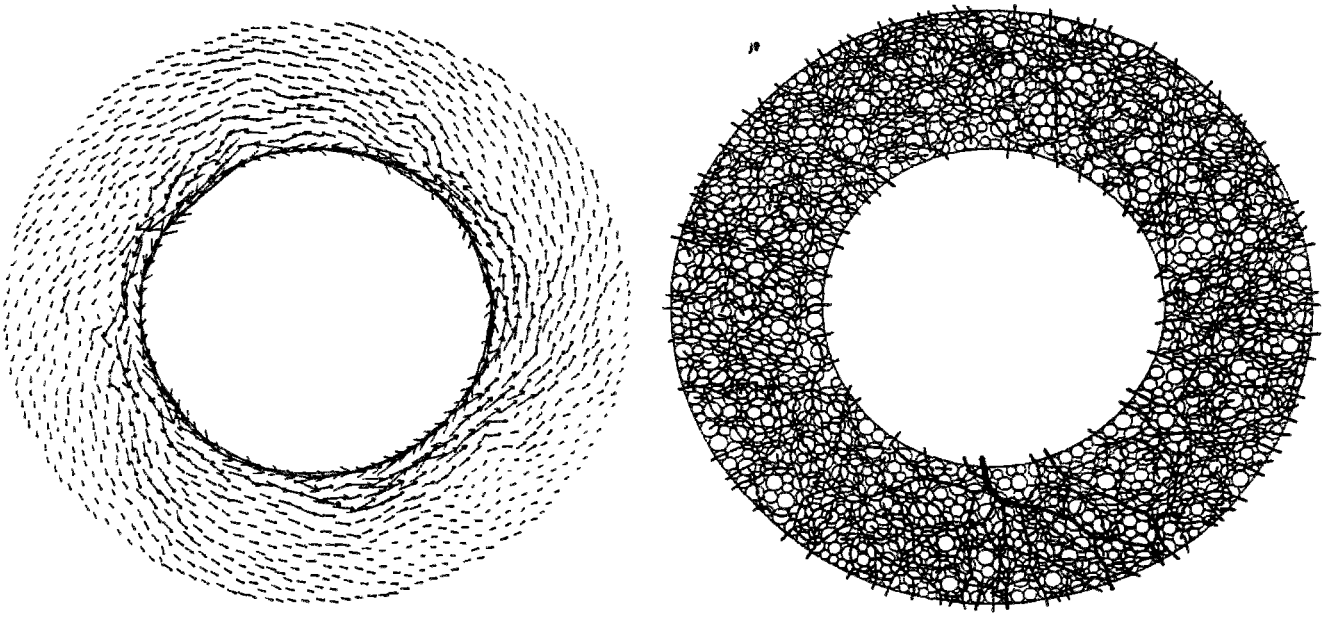


Figure IV-26. *(a) Déplacement total des rouleaux par rapport à leur position initiale et (b) forces de contact globale entre les rouleaux.*

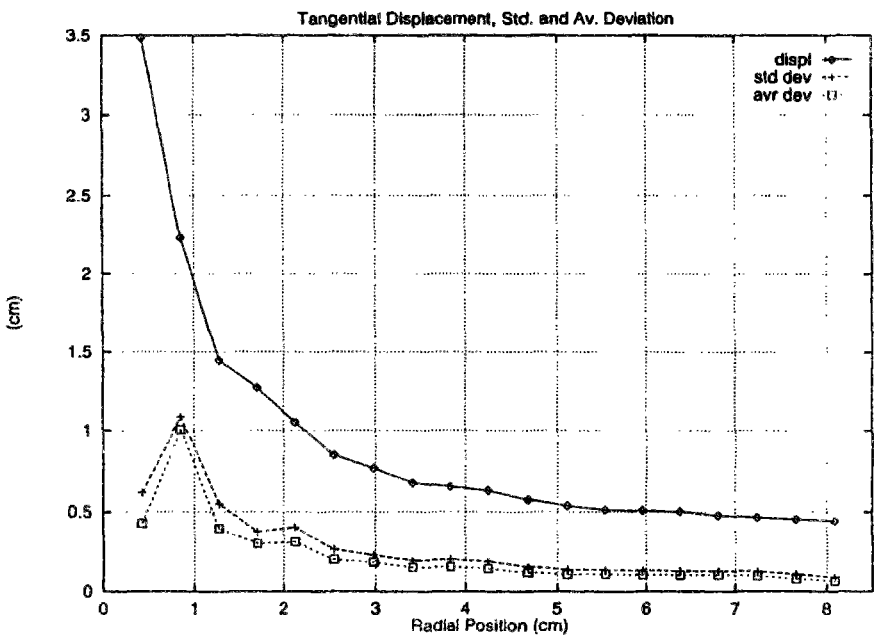


Figure IV-27. *Déplacement tangentiel des rouleaux en fonction de leur position initiale*

Les valeurs des rotations (figure IV-28) sont très élevées dans la couche d'interface (moyenne de -200°) avec des écarts types très importants (jusqu'à 300°). Ces très fort écarts sont dus au phénomène d'engrenage qui peut se produire, un rouleau de grand diamètre tournant dans un sens entraînant en sens inverse un rouleau de plus petite taille. La couche d'interface se limite bien à une épaisseur de 2 cm, ce qui correspond également au résultat obtenu lors de l'essai réalisé à l'appareil de cisaillement simple annulaire.

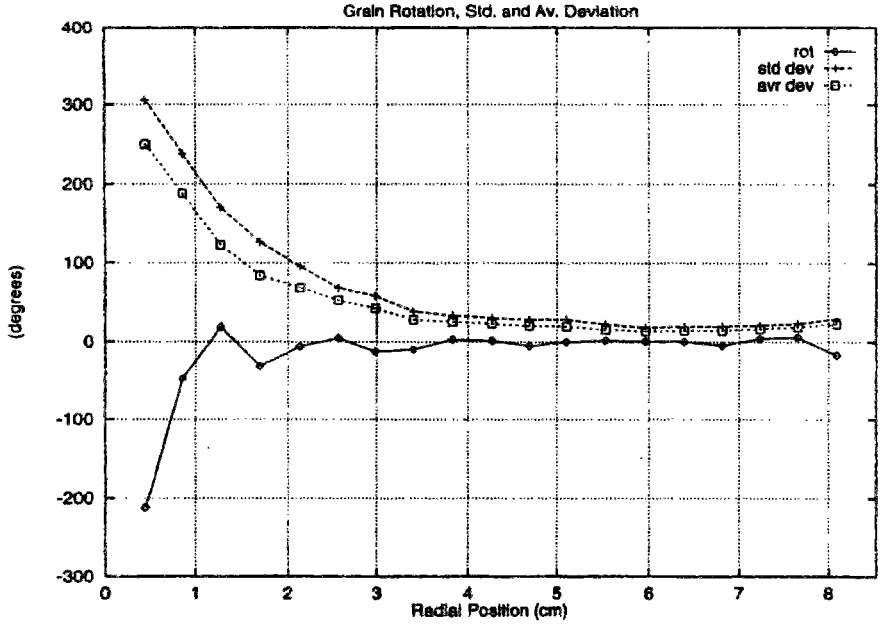


Figure IV-28. *Rotations des rouleaux en fonction de leur position initiale*

La figure IV-26 b représente les forces de contact globales entre les rouleaux. Certaines régions sont dépourvues de contrainte, les rouleaux n'étant plus soumis à aucune force. Cette répartition change en cours d'essai, en particulier au cours des réarrangements rapides (microséismes) qui se produisent. L'anisotropie observée doit provenir de la dimension des rouleaux, qui limite leur nombre à 1 200. Un traitement des essais réalisés avec l'appareil de cisaillement simple annulaire par photoélasticité permettrait une comparaison entre la simulation numérique et l'expérience.

Des développements du logiciel LMGC sont en cours dans deux directions. Tout d'abord, une analyse sur 1/8 ème de l'échantillon, avec des critères de périodicité (tout grain sortant correspond à un grain entrant dans la zone considérée) permettrait de réduire

considérablement les temps de calcul. D'autre part, la possibilité d'utiliser des particules de forme elliptique permettrait de se rapprocher du comportement d'un matériau réel. Ces deux développements sont également conditionnés par les évolutions informatiques qui permettront de prendre en compte, pour un temps de calcul identique, un plus grand nombre de grains.

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude du mouvement des grains lors d'un cisaillement simple annulaire s'est faite à partir de trois expérimentations :

- essais sur du gravier 14~10 avec l'appareil de cisaillement simple annulaire
- essai sur des rouleaux de Schneebeli à l'aide de l'appareil de cisaillement simple annulaire modifié
- simulation numérique du cisaillement simple annulaire d'un échantillon de rouleaux de Schneebeli

Pour les deux premières analyses, le système de dépouillement utilisé nous a permis de suivre le déplacement et la rotation de quelques grains (de l'ordre de 20 par échantillon) pour certaines valeurs du déplacement (environ 20 par essai). Qualitativement, une bonne analogie est observé dans le comportement du matériau lors de ces deux essais. Cependant, quantitativement, l'utilisation d'un matériau analogique 2D de forme cylindrique et avec des diamètres importants (entre 6 et 10 mm) pour modéliser un gravier de D_{50} 3,3 mm donne des résultats assez éloignés. Les résultats visuels obtenus avec les rouleaux fournis par le laboratoire 3S laissent présager une meilleure adéquation quantitative.

La simulation numérique réalisée présente l'avantage d'avoir des résultats moyens sur tous les grains de l'échantillon et à chaque itération du calcul. Confronter ces résultats aux résultats pour quelques grains permet d'obtenir de bonnes indications qualitatives. En particulier, les deux méthodes donnent des valeurs de l'épaisseur de la couche d'interface identiques (entre 2 et 2,5 cm) en analysant aussi bien les déplacements tangentiels que les rotations.

Comme pour d'autres essais permettant d'appréhender le comportement d'un échantillon granulaire au niveau microscopique (par exemple, l'appareil 1γ2ε, Joer et *al.*; 1992) et servant de base expérimentale à des simulations numériques par éléments distincts, les essais avec l'appareil de cisaillement simple annulaire doivent permettre d'obtenir les déplacements et les rotations de tous les grains, qui seront ensuite traités statistiquement en fonction de la distance avec le cylindre d'interface. Pour cela, le traitement informatisé d'images numérisées est particulièrement adapté. D'autres calculs, avec des paramètres d'essais affinés et des procédures de calcul allégées, donc plus rapides, doivent être réalisés avec le logiciel LMGC.

Ces deux développements, expérimental et numérique, permettront l'utilisation de rouleaux de Schneebeli de diamètres plus faibles, qui conduira à une meilleure analogie avec le gravier 14~10.

V. ESSAIS SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE : PREMIERS RESULTATS

V. ESSAIS SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE : PREMIERS RESULTATS 241

V.1. INTRODUCTION 242

V.2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE 243

V.3. ESSAIS SOUS SOLLICITATION CYCLIQUE REALISES A L'APPAREIL DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE 251

V.3.1. Asservissement de l'appareil de cisaillement simple annulaire 251

V.3.2. Programme d'essais 252

V.3.3. Résultats et interprétation 253

V.3.3.1 Essais sur le sable d'Hostun RF 253

a. Présentation des résultats obtenus pour un essai 253

b. Influence de la pression radiale initiale 259

c. Influence de la densité initiale de l'échantillon 260

d. Influence de la rugosité de l'interface 263

e. Influence de l'amplitude de cisaillement 266

V.3.3.2 Essais sur le gravier d'Hostun 14-10 268

a. Présentation des résultats obtenus pour un essai 268

b. Influence de la pression radiale initiale 271

c. Influence de la densité initiale de l'échantillon 274

d. Influence de la rugosité de l'interface 276

e. Influence de l'amplitude de cisaillement 278

V.4. CONCLUSION 280

V.1. Introduction

Pour certains types de sollicitation (action des vagues, vent, séisme, vibrations de machine, trafic, etc.), l'interface est soumise à des chargements non monotones qui peuvent endommager la structure. Ceci est particulièrement vrai pour des éléments de renforcement ou des fondations profondes pour lesquels, comme nous l'avons vu, la mobilisation du frottement entre le sol et la structure est déterminante pour la stabilité globale de l'ouvrage. Ces chargements peuvent fortement différer par leur amplitude, leur fréquence et leur caractère dynamique ou non.

Dans l'étude du comportement d'un sol soumis à un séisme, on considère que le mouvement sismique est dû à la propagation verticale d'une onde de cisaillement (Pecker, 1984). Un élément de sol est soumis à un cycle de chargement représenté à la figure V-1. Le passage de l'onde induit une contrainte de cisaillement qui s'applique sur les faces horizontales et verticales de l'élément de sol. Au laboratoire, l'essai triaxial cyclique permet de se rapprocher de ce type de sollicitation (Seed et Lee, 1966), en particulier en condition non-drainée.

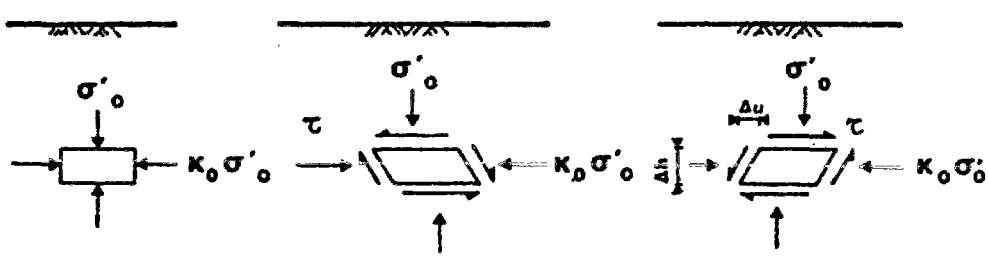


Figure V-1. *Représentation d'un chargement sismique idéalisé d'un élément de sol (d'après Pecker, 1984)*

Dans l'étude des interfaces sous sollicitation non monotone, seuls des chargements cycliques en condition drainée (matériau sec) ont pu être étudiés. Le cisaillement est généré par le déplacement tangentiel de l'élément de structure. Pour des ouvrages soumis à une sollicitation sismique, la contrainte de cisaillement n'est pas directement modifiée par la

génération de surpressions interstitielles, mais elle en dépend indirectement par la diminution de la contrainte normale effective. L'étude expérimentale des interfaces, sous sollicitations non monotones, est donc très en retard par rapport à l'étude du comportement du cisaillement sol-sol, essentiellement à cause de difficultés technologiques.

Dans ce chapitre, après une étude bibliographique du comportement des interfaces sous sollicitation cyclique, nous présentons les premiers résultats obtenus à l'aide de l'appareil de cisaillement simple annulaire (Lerat et *al.*, 1996; Lerat et *al.*, 1997).

V.2. Etude bibliographique

Tous les appareils utilisés pour l'étude sous sollicitation cyclique des interfaces ont été présentés dans le premier chapitre de bibliographie générale. Dans ce nouveau paragraphe, nous exposons les résultats obtenus dans les différentes études, en mettant en évidence les paramètres contrôlant le comportement d'interface sous sollicitation cyclique. Cette analyse a servi de point d'appui à la définition de notre programme d'essais.

Trois appareillages de cisaillement d'interface ont permis d'étudier le comportement des interfaces sable-structure sous sollicitation cyclique : la boîte de cisaillement direct plane (Desai et *al.*, 1985; Shahrour et *al.*, 1992), l'appareil de cisaillement simple (Uesugi et *al.*, 1989) et l'appareil de cisaillement tridimensionnel (Fakharian et Evgin, 1993). Contrairement à l'étude du comportement cyclique des sables en laboratoire, qui se fait généralement à contrainte contrôlée (Seed et Lee, 1966), les études réalisées sur les interfaces se font soit à déplacement contrôlé - le plus souvent -, soit à contrainte contrôlée.

Desai et *al.* (1985) ont réalisé une analyse expérimentale très complète (74 essais) à partir d'essais à déplacement contrôlé. Ils ont fait varier l'amplitude du déplacement entre 1,27 et 5,08 mm (respectivement 0,05 et 0,20 inch), la contrainte normale (maintenue constante pendant l'essai) entre 48 et 193 kPa (respectivement 7 et 28 psi), la fréquence entre 0,25 et 4 hertz, et ont utilisé des échantillons de sable d'Ottawa avec un indice de densité de

15% et 80%. La rugosité de l'interface est qualifiée de lisse à moyennement lisse. Les déplacements sont alternés (entre + et - la valeur de l'amplitude).

La figure V-2 montre l'influence du nombre de cycle et l'influence de l'indice de densité sur la valeur de la résistance au cisaillement. La contrainte de cisaillement mobilisée augmente avec le nombre de cycles pour les deux densités. Pour un échantillon de sable dense, cette augmentation est faible alors qu'elle est très importante pour un échantillon de sable lâche. Notons que la contrainte de cisaillement obtenue après 100 cycles est d'environ 190 kPa pour un sable initialement lâche alors qu'elle reste proche de 150 kPa pour un sable initialement dense. L'évolution de la déformation verticale donnerait des informations intéressantes sur ce comportement.

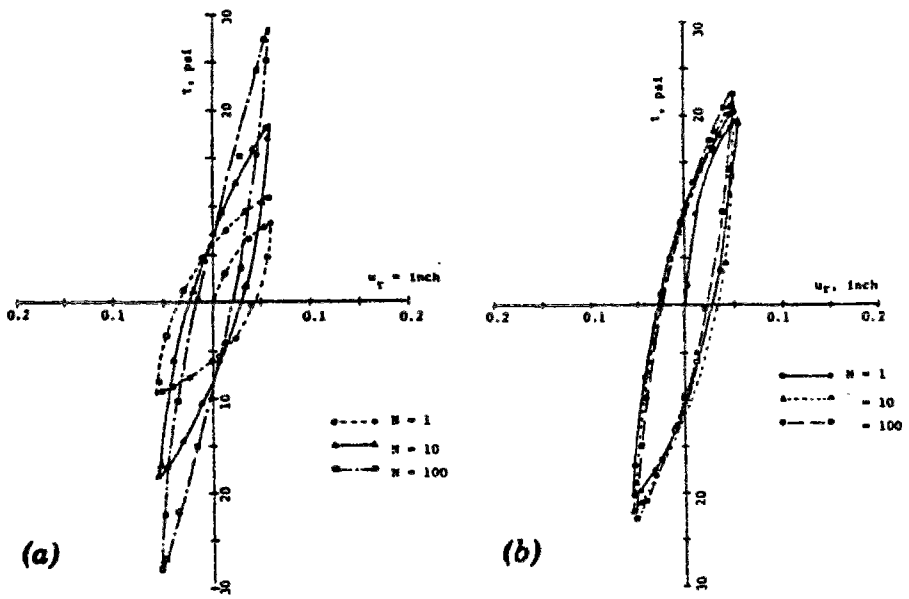


Figure V-2. *Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction du nombre de cycles. (a) D_r=15%; (b) D_r=80% ; σ_n=192,9 kPa (d'après Desai et al., 1985)*

La figure V-3 montre l'influence de la contrainte normale initiale, après 10 cycles de chargement, sur la valeur de la résistance au cisaillement. Comme pour des essais de cisaillement monotone, la contrainte de cisaillement mobilisée augmente avec la valeur de la contrainte normale initiale.

Pour des amplitudes de cisaillement alterné variant entre 1,27 et 5,08 mm (figure V-4), les résultats présentés prêtent à confusion. En effet, la première partie du chargement,

représentée pour le premier cycle, devrait correspondre au résultat obtenu pour un chargement statique monotone. Pour un sable initialement lâche, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement obtenue pour des amplitudes de 0,05 et 0,10 inch ne rejoint pas la boucle obtenue pour une amplitude de 0,20 inch, alors que pour un sable initialement dense, les boucles obtenues pour de faibles amplitudes s'inscrivent dans la boucle obtenue pour la plus importante amplitude.

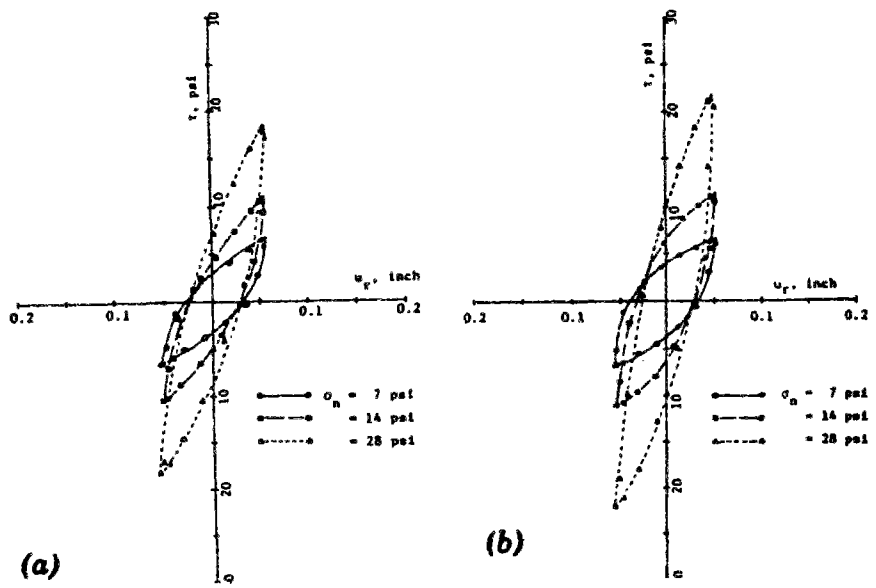


Figure V-3. *Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale initiale. (a) D_r=15%; (b) D_r=80% ; N_c=10 (d'après Desai et al., 1985)*

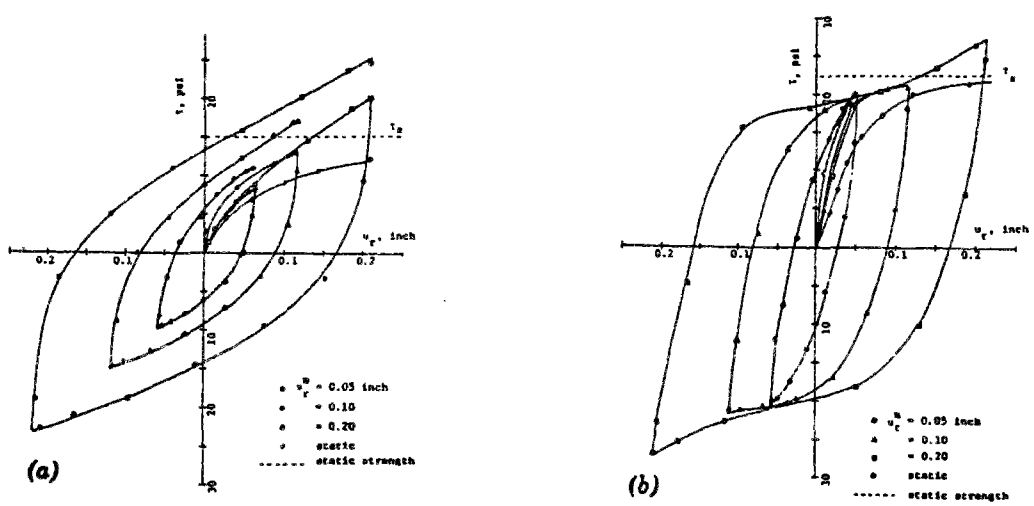


Figure V-4. *Evolution de la contrainte de cisaillement en fonction de l'amplitude du déplacement (a) D_r=15%; (b) D_r=80% ; σ_n=192,9 kPa (d'après Desai et al., 1985)*

De meilleures descriptions de la rugosité de l'interface et du sable utilisé faciliteraient l'analyse des résultats présentés.

Shahrour et *al.* (1992) et Rezaie (1994) ont également réalisé des essais de cisaillement, sous sollicitation cyclique, à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée. Ils ont utilisé du sable d'Hostun RF et du sable carbonaté de Quiou. Ils ont étudié l'influence de la densité initiale de l'échantillon, de la rugosité de l'interface et des conditions aux limites (contrainte normale constante ou déplacement normal nul) sur le comportement de l'interface. Des chargements à contrainte de cisaillement contrôlée et à déplacement tangentiel contrôlé ont été effectués.

Pour toutes les combinaisons de paramètres étudiées sauf une, sur le sable d'Hostun RF, en chargement alterné, la contrainte de cisaillement mesurée diminue avec le nombre de cycles (figure V-5).

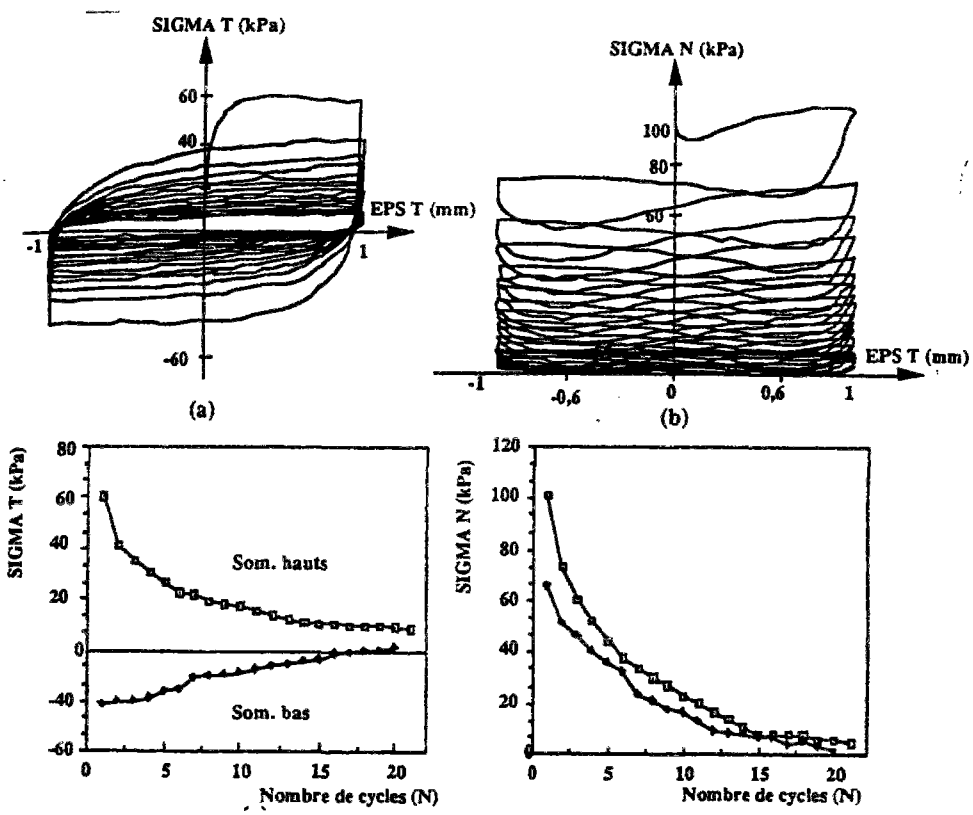


Figure V-5. *Essai cyclique sur du sable d'Hostun RF ; déplacement normal nul, amplitude : 1 mm, interface lisse, D_r=90% (d'après Rezaie, 1994)*

Dans le cas d'une interface rugueuse et d'un échantillon de sable lâche, la contrainte de cisaillement augmente avec le nombre de cycles pour un essai à contrainte normale constante (figure V-6).

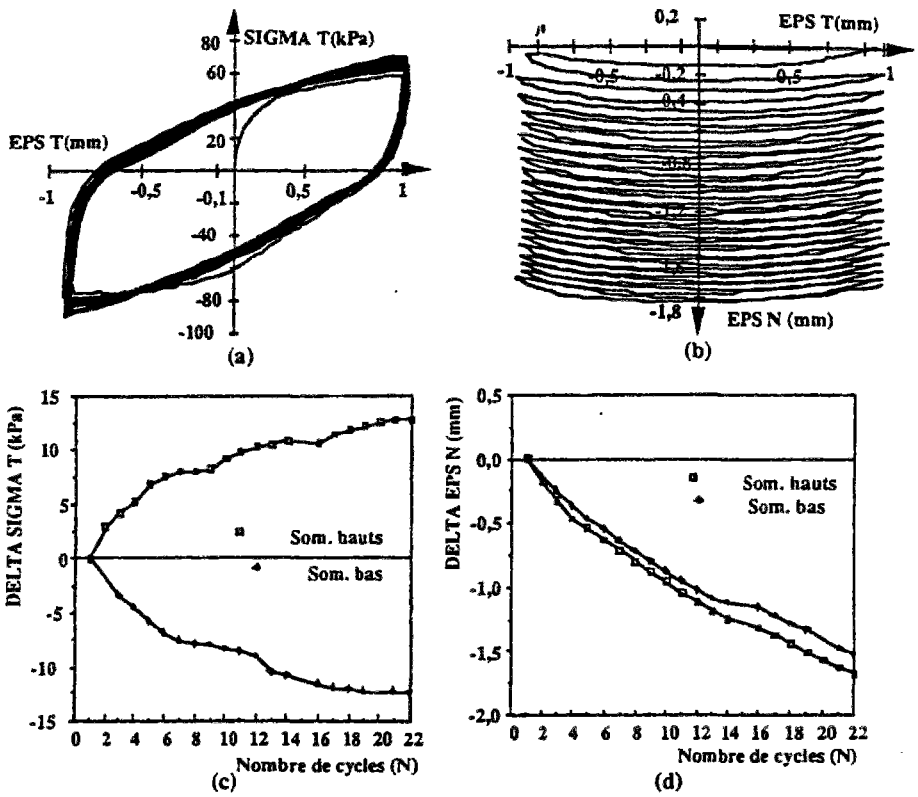


Figure V-6. *Essai cyclique sur du sable d'Hostun RF ; déplacement normal nul, amplitude : 1 mm, interface lisse, D_r=90% (d'après Rezaie, 1994)*

Les résultats obtenus dans cette étude, sur une boîte de petite dimension (60 mm * 60 mm), où les effets de bord sont très importants, ne confirment pas ceux de Desai et *al.* (1985).

Uesugi et *al.* (1989) ont réalisé des essais de cisaillement simple à chargement cyclique non alterné ("one way", entre 0 et + la valeur de l'amplitude) et alterné ("two ways") sur des échantillons de sable dense. Comme pour les essais monotones, les auteurs ont décomposé le déplacement total en déformation au sein de l'échantillon et déplacement d'interface.

La figure V-7 présente le résultat d'un essai obtenu sur du sable de Toyoura, avec un chargement alterné d'amplitude 1 mm. Les valeurs obtenues lors d'un cisaillement monotone correspondent à l'enveloppe des valeurs obtenues lors du cisaillement alterné.

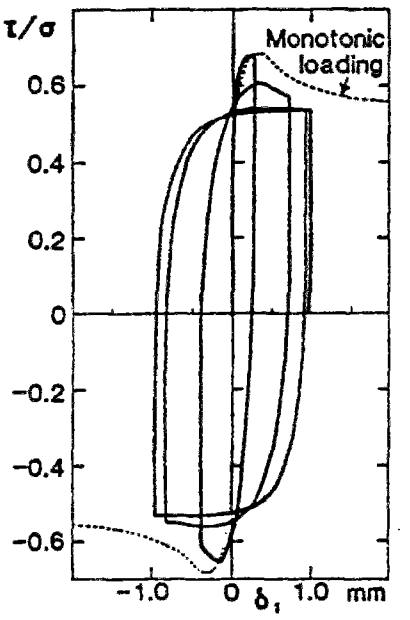


Figure V-7. *Résultat d'un essai de cisaillement simple sur du sable de Toyoura ; essai à σn const. 98 kPa ; Dr = 95% ; interface lisse (d'après Uesugi et al., 1989)*

La figure V-8 met en évidence l'influence de la rugosité et du nombre de cycle sur l'évolution de la contrainte de cisaillement. Pour une interface rugueuse, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement est obtenue pour le premier cycle, l'amplitude du déplacement étant supérieure au déplacement correspondant au pic de résistance lors d'un essai à chargement monotone. Ensuite, la contrainte de cisaillement diminue avec le nombre de cycles. Pour une interface lisse, après une première valeur maximale lors du premier cycle, la contrainte de cisaillement diminue au second cycle pour augmenter ensuite progressivement jusqu'à une valeur maximale obtenue après 10 cycles. Entre 10 et 15 cycles, la contrainte de cisaillement reste constante avec la même valeur, indépendamment de la rugosité. Une étude pour un nombre de cycles plus important aurait donné des informations complémentaires intéressantes.

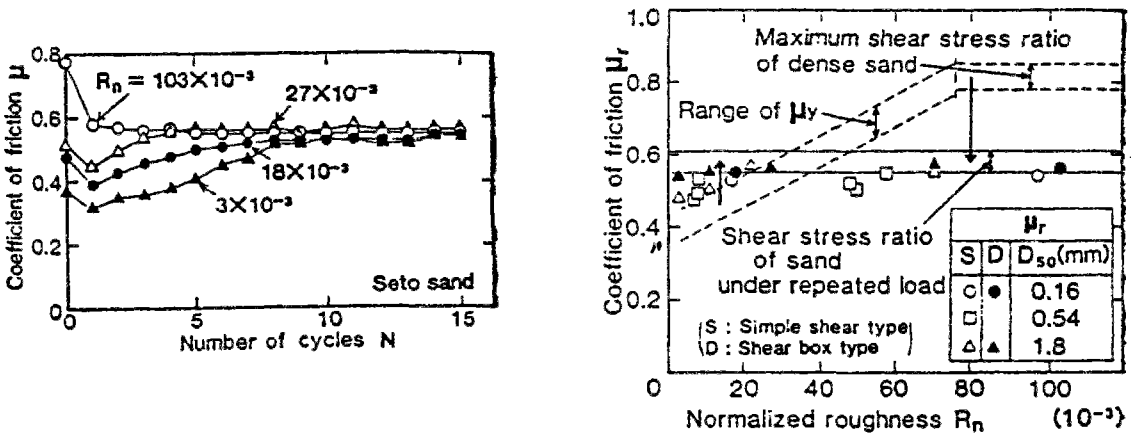


Figure V-8. *Influence du nombre de cycle et influence de la rugosité sur la valeur du coefficient de frottement (d'après Uesugi et al., 1989)*

Fakharian et Evgin (1993) ont présenté des résultats d'essais de cisaillement direct réalisés à contrainte normale constante, avec une interface rugueuse, sur des échantillons de sable dense et lâche (figure V-9). L'amplitude de déplacement choisie est inférieure à la valeur du déplacement correspondant à la rupture pour un changement monotone.

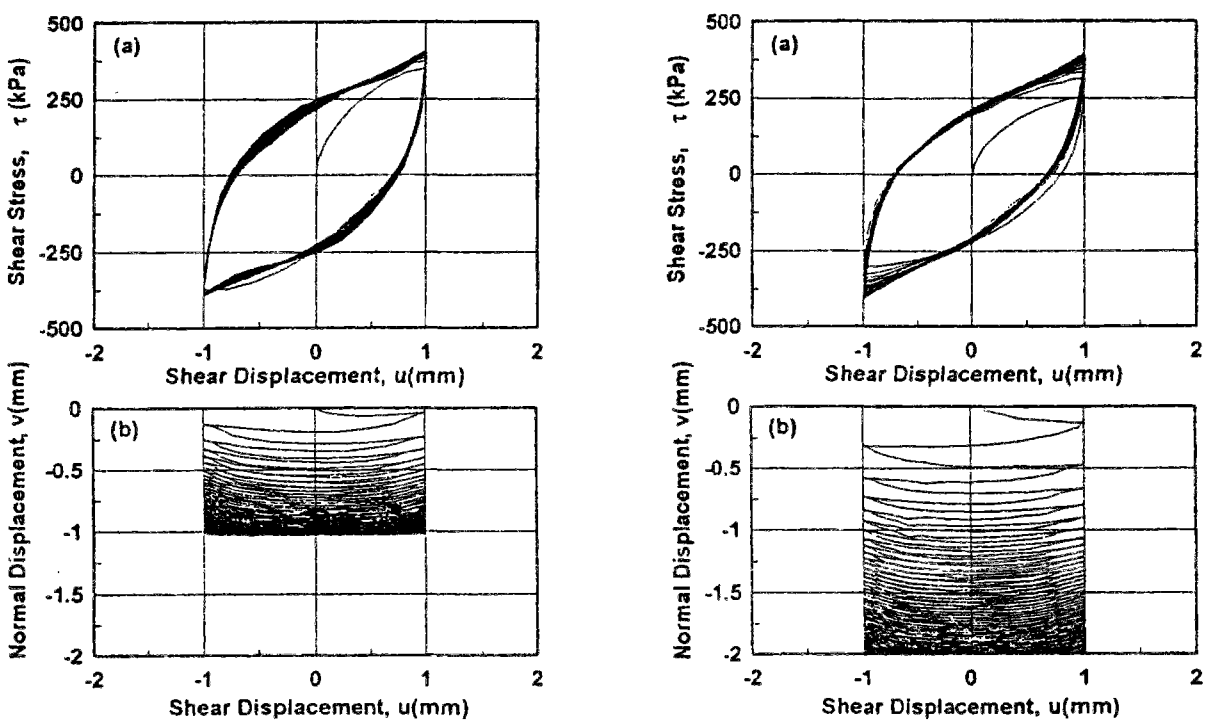


Figure V-9. *Influence de la densité initiale sur la contrainte de cisaillement et le déplacement normal; (a) sable dense ; (b) sable lâche ; interface rugueuse, σ_n = 500 kPa (d'après Fakharian et Evgin, 1993)*

Pour des échantillons de sable dense ou lâche, la contrainte de cisaillement augmente avec le nombre de cycles, mais l'augmentation est plus rapide pour le sable lâche, ce qui est dû à une densification plus importante. Les contraintes de cisaillement se stabilisent pour une même valeur dans les deux cas (400 kPa), supérieure au pic de contrainte (360 kPa) obtenue lors d'un cisaillement monotone.

Cette analyse bibliographique du comportement d'une interface sous sollicitation cyclique nous montre, d'une part que très peu d'études ont été réalisées dans ce domaine et, d'autre part, que les résultats obtenus divergent. Desai et *al.* (1985) ont toujours obtenu une augmentation de la contrainte de cisaillement avec le nombre de cycles, résultats confirmés par Fakharian et Evgin (1993) tandis que Uesugi et *al.* (1989) ont observé une diminution de la contrainte de cisaillement avec le nombre de cycles uniquement dans le cas d'une interface rugueuse avec un échantillon dense (ils n'ont pas utilisé d'échantillon de sable lâche) et Rezaie (1994) uniquement dans le cas d'une interface rugueuse avec un échantillon de sable lâche. L'étude sous sollicitation cyclique des interfaces est plus complexe que l'analyse sous sollicitation monotone car l'amplitude du cisaillement (pré ou post pic) est un paramètre très important. De plus, les effets de bord peuvent s'accroître lors des changements de sens de cisaillement, surtout dans le cas d'échantillons de petites dimensions.

Les paramètres importants dont il faut étudier l'influence sur le comportement de l'interface sont donc :

- le type et la densité du sol
- la rugosité de l'interface
- la valeur de la contrainte normale initiale
- le nombre de cycles
- l'amplitude du déplacement
- le type de condition aux limites (contrainte normale constant ou volume constant).

La fréquence, donc la vitesse de cisaillement, ne semble pas avoir d'influence sur le comportement de l'interface.

La réalisation d'essais sous sollicitation cyclique, à l'appareil de cisaillement simple annulaire, pourra apporter des informations intéressantes sur l'étude de ce comportement.

V.3. Essais sous sollicitation cyclique réalisés à l'appareil de cisaillement simple annulaire

V.3.1. Asservissement de l'appareil de cisaillement simple annulaire

La réalisation d'essais de cisaillement cyclique à l'aide de l'appareil de cisaillement simple annulaire a nécessité un asservissement du moteur, à partir de la mesure du déplacement tangentiel de l'interface, afin d'obtenir un déplacement alterné. Cet asservissement, en condamnant les commandes manuelles du moteur, a été fait à l'aide du logiciel générateur d'application Viewdac.

Toutes les conditions de l'essai, à savoir l'amplitude du déplacement et la vitesse de cisaillement, sont indiquées au début de chaque essai. L'acquisition aléatoire de valeurs erronées par le codeur incrémental optoélectronique, qui n'affecte pas le déroulement d'un essai monotone, a nécessité le développement d'un filtre numérique qui les a presque masquées, afin d'éviter l'inversion du sens de marche du moteur avant d'avoir atteint toute l'amplitude du cisaillement souhaitée.

Un inconvénient de l'appareil de cisaillement simple annulaire, lors d'un chargement cyclique, est lié au jeu mécanique important présent dans le moteur et le moto-réducteur lors de l'inversion de sens du cisaillement (un réducteur planétaire, avec un jeu mécanique réduit, entraîne des surcoûts considérables). La chute de la contrainte de cisaillement, à l'inversion de sens, se fait avec un déplacement quasi nul, ce qui explique la forme aplatie des boucles que nous avons obtenues.

En plus des avantages que nous avons déjà présentés pour les essais monotones, nous avons la possibilité, avec l'appareil de cisaillement simple annulaire, de pouvoir réaliser un grand nombre de cycles, car l'essai se déroule sans perte de matériau, et de ne pas être limités pour l'amplitude du cisaillement.

V.3.2. Programme d'essais

Pour les premiers essais sous sollicitation cyclique, nous avons choisi de calquer le programme d'essais sur celui réalisé sous sollicitation monotone. Les matériaux utilisés sont le sable d'Hostun RF et le gravier d'Hostun 14~10. Pour le sable, nous avons privilégié les essais avec une interface lisse (équipée de capteurs de contrainte totale) et pour le gravier, les essais avec une interface rugueuse (tableau V-1). Tous les essais ont été réalisés à volume constant et avec un cisaillement alterné.

Tableau V-1. *Programme d'essais sous sollicitation cyclique*

matériau	*interface*	*compacité*	*amplitude (mm)*	*pression radiale initiale (kPa)*	*nom de l'essai*
sable RF	lisse	lâche	1	100	2105-C-61
		dense	1	100	1005-C-55
			1	200	1405-C-56
			1	400	1505-C-57
			2	200	1605-C-58
			5	200	1705-C-59
	rugueuse	dense	1	100	0705-C-53
gravier 14~10	lisse	dense	1	100	2805-C-65
	rugueuse	lâche	1	100	3005-C-66
		dense	1	100	3004-C-49
			1	200	0305-C-51
			1	400	0605-C-52
			2	100	2205-C-62
			5	100	2405-C-64

Pour chacun des matériaux, nous allons pouvoir étudier l'influence de la rugosité, de la compacité, de l'amplitude du cisaillement et de la pression radiale initiale sur le comportement de l'interface.

V.3.3. Résultats et interprétation

Nous présentons successivement les résultats des essais obtenus sur le sable RF puis sur le gravier 14~10. Les mesures réalisées pendant les essais sont identiques à celles effectuées pour les essais monotones : les différents modes d'obtention et de présentation des résultats sont analogues. Le déplacement tangentiel de l'interface est soit relatif (entre + et - la valeur de l'amplitude de cisaillement), soit cumulé en valeur absolue, ce qui correspondant au déplacement total de cisaillement.

V.3.3.1 Essais sur le sable d'Hostun RF

Comme pour les essais monotones, la présence de capteurs de contrainte totale à l'interface permet de suivre les phénomènes se développant au sein de l'interface, ceux-ci étant masqués par le volume de l'échantillon et n'apparaissant pas sur la mesure de la pression radiale externe.

a. Présentation des résultats obtenus pour un essai

Nous présentons les résultats obtenus avec un échantillon de sable dense (I_d=0,88), avec une interface lisse, une pression radiale initiale de 100 kPa et une amplitude de cisaillement alterné de 1 mm. Les résultats des autres essais apparaissent dans l'étude de l'influence des différents paramètres.

Comme nous l'avons déjà indiqué, la forme des boucles représentant la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel relatif de l'interface traduit le jeu mécanique important du réducteur qui correspond à l'annulation de la contrainte de cisaillement pour un déplacement presque nul (figure V-10). Cette annulation à déplacement

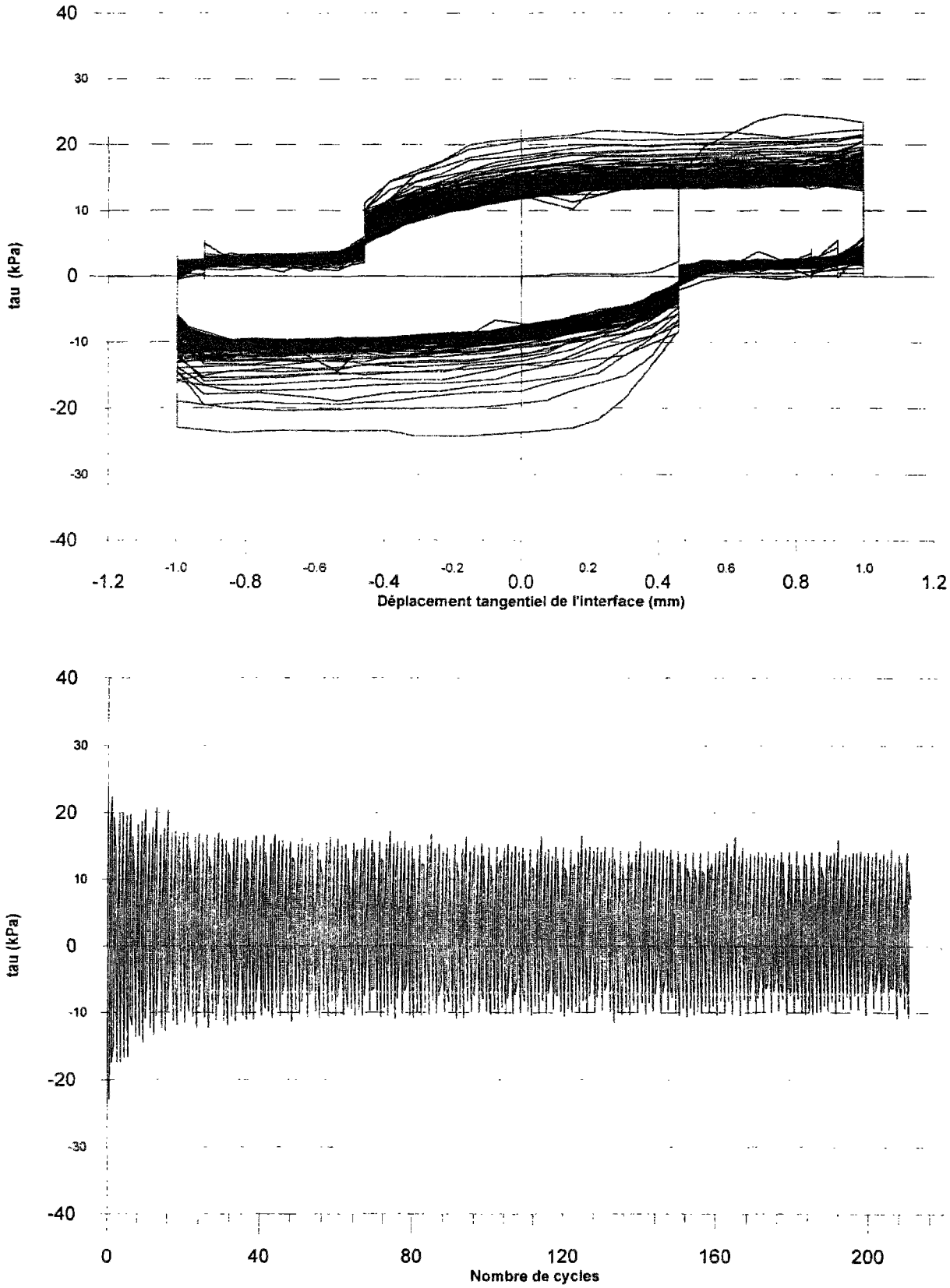


Figure V-10. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel et du nombre de cycles ; sable d'Hostun RF, I_d = 0,88, interface lisse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 1 mm*

nul est suivie d'un palier où la contrainte de cisaillement reste nulle avant de changer de signe. Les courbes classiquement présentées sont inscrites dans les courbes que nous obtenons (figure V-11). La valeur maximale de la contrainte de cisaillement est obtenue lors du premier cycle, puis la valeur décroît avec le nombre de cycles pour se stabiliser à partir de 50 cycles. Les courbes sont très symétriques, les contraintes obtenues lors de l'inversion du sens de cisaillement rejoignant, au signe près, les valeurs obtenues lors du demi-cycle précédent.

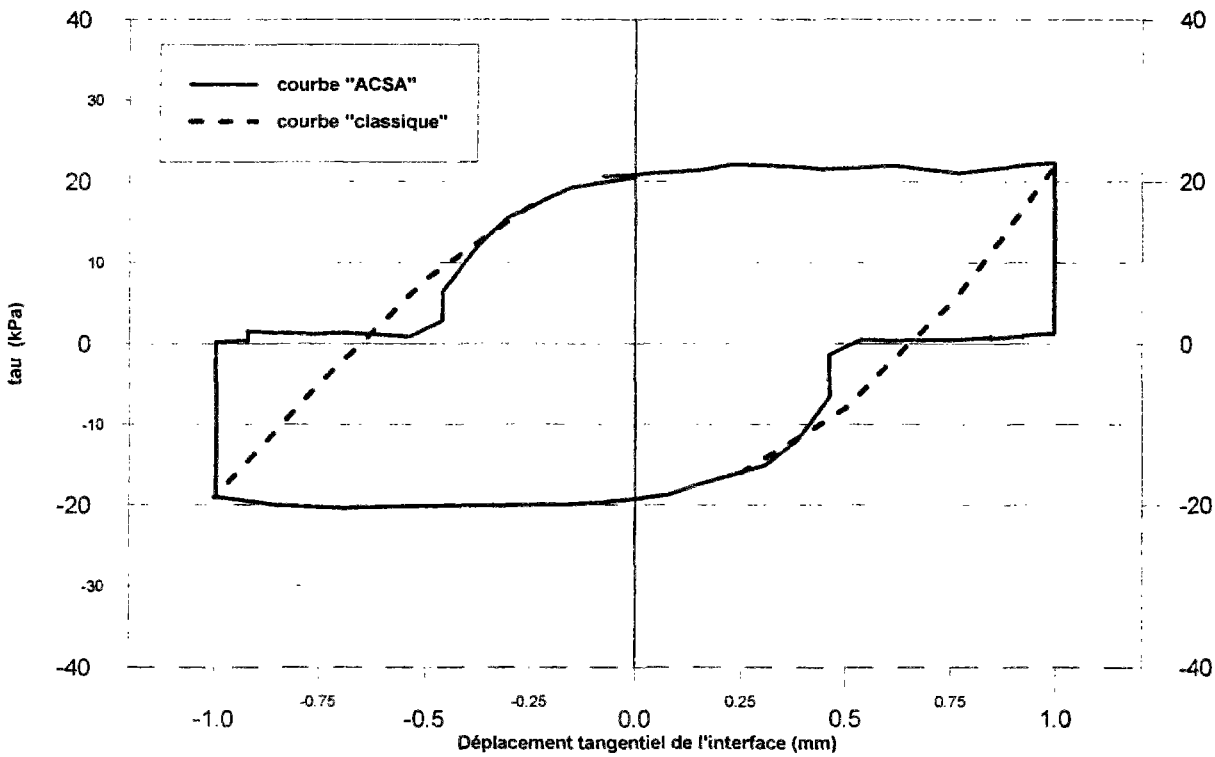


Figure V-11. *Courbe contrainte de cisaillement - dépl. relatif de l'interface obtenue à l'appareil de cisaillement simple annulaire par rapport aux courbes obtenues "classiquement"*

La figure V-12 présente l'évolution de la pression radiale externe au cours de l'essai. Celle-ci diminue progressivement, indiquant le caractère contractant de l'échantillon. La mesure de la contrainte normale, par le biais des cinq capteurs placés au sein de l'interface, nous donne des informations complémentaires (figure V-13). Le caractère contractant du sol au sein de l'interface est fortement marqué (forte diminution globale de la valeur moyenne enregistrée par les capteurs). En représentant la contrainte normale moyenne sur quelques cycles, on voit que cette contractance globale est accompagnée, à chaque demi-cycle, d'une phase de dilatance, qui est masquée sur la mesure de la pression radiale externe.

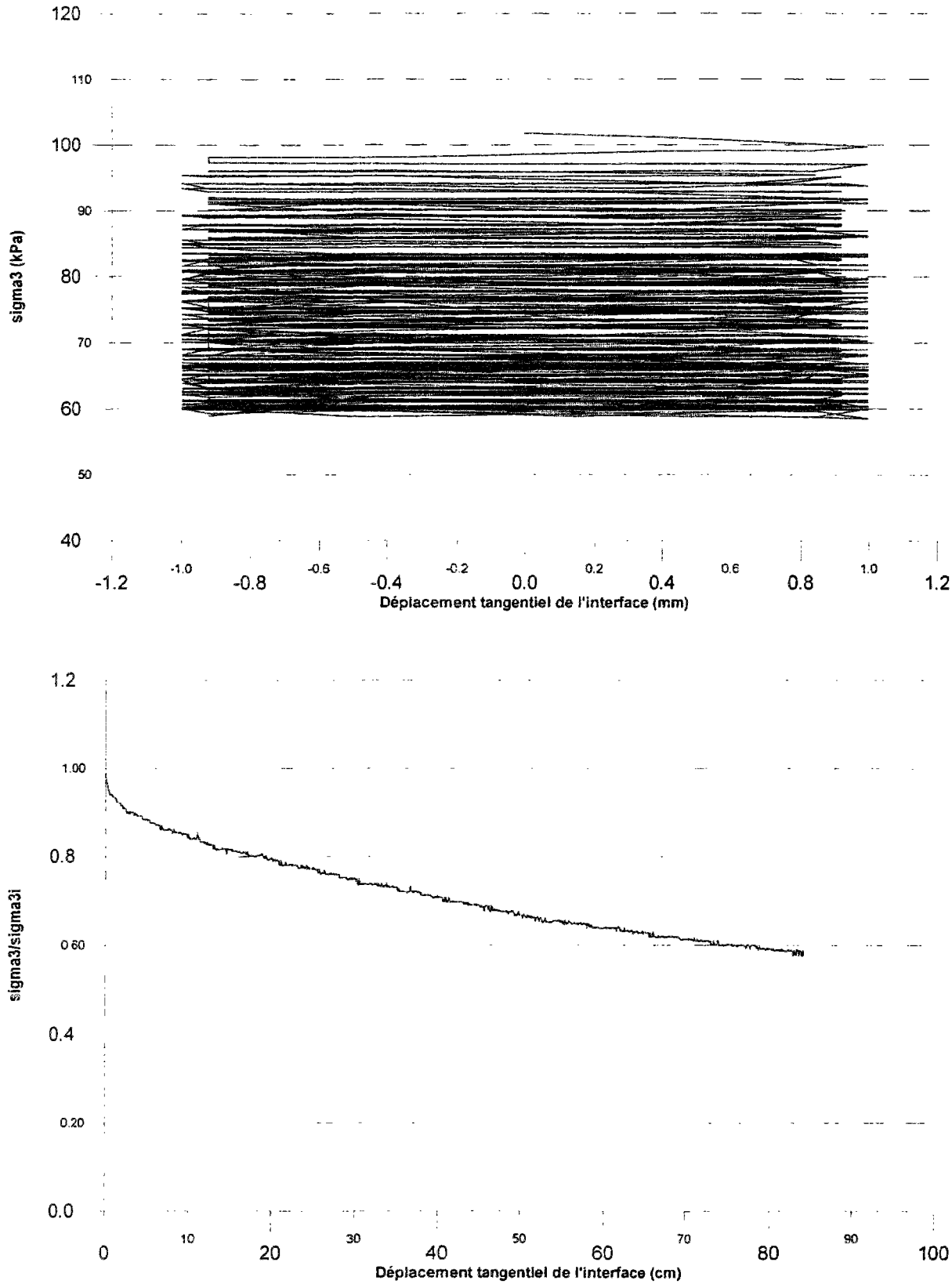


Figure V-12. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel et du nombre de cycles ; sable d'Hostun RF, I_d = 0,88, interface lisse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 1 mm*

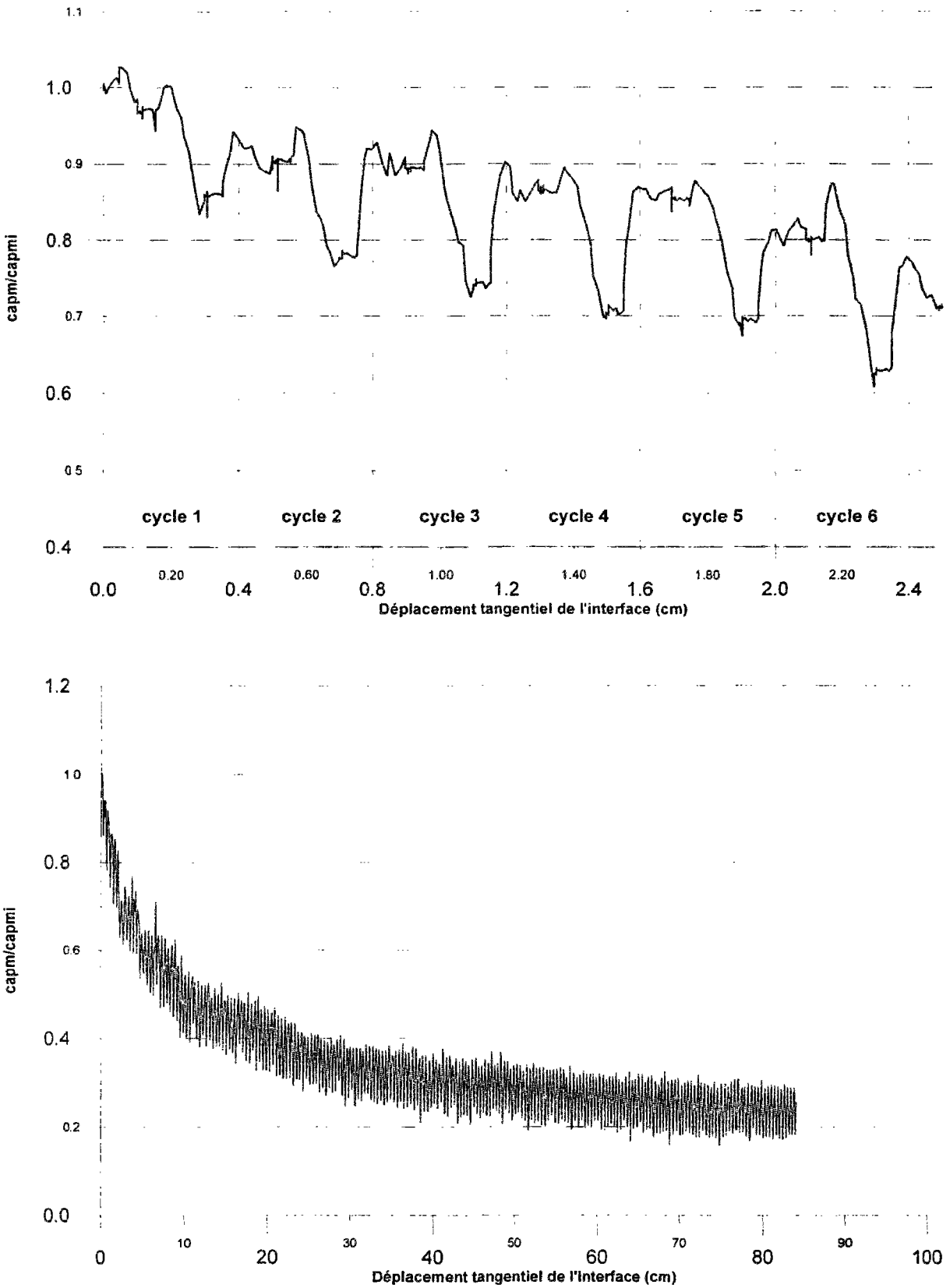


Figure V-13. *Contrainte normale à l'interface en fonction du dépl. tangentiel et du nombre de cycles ; sable d'Hostun RF, I_d = 0,88, interface lisse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 1 mm*

Les figures V-14 et V-15 représentent, pour quelques cycles, le chemin de cisaillement dans les plans (sigma3 - τ) et (capm - τ). Dans le plan (sigma3 - τ), le chemin suivi pendant chaque cycle se présente sous la forme de boucles très aplaties. Ces boucles illustrent le comportement global de l'échantillon. Dans le plan (capm - τ), le comportement au sein de l'interface est bien représenté. Les phases successives de contractance et de dilatance apparaissent clairement. La contractance globale initiale est traduite par des boucles qui ne se ferment pas. A partir du 50ème cycle, les faibles diminutions, au cours d'un cycle, de la contrainte de cisaillement et de la valeur moyenne de la contrainte normale au sein de l'interface, donnent un chemin de cisaillement se faisant sur des boucles fermées très similaires.

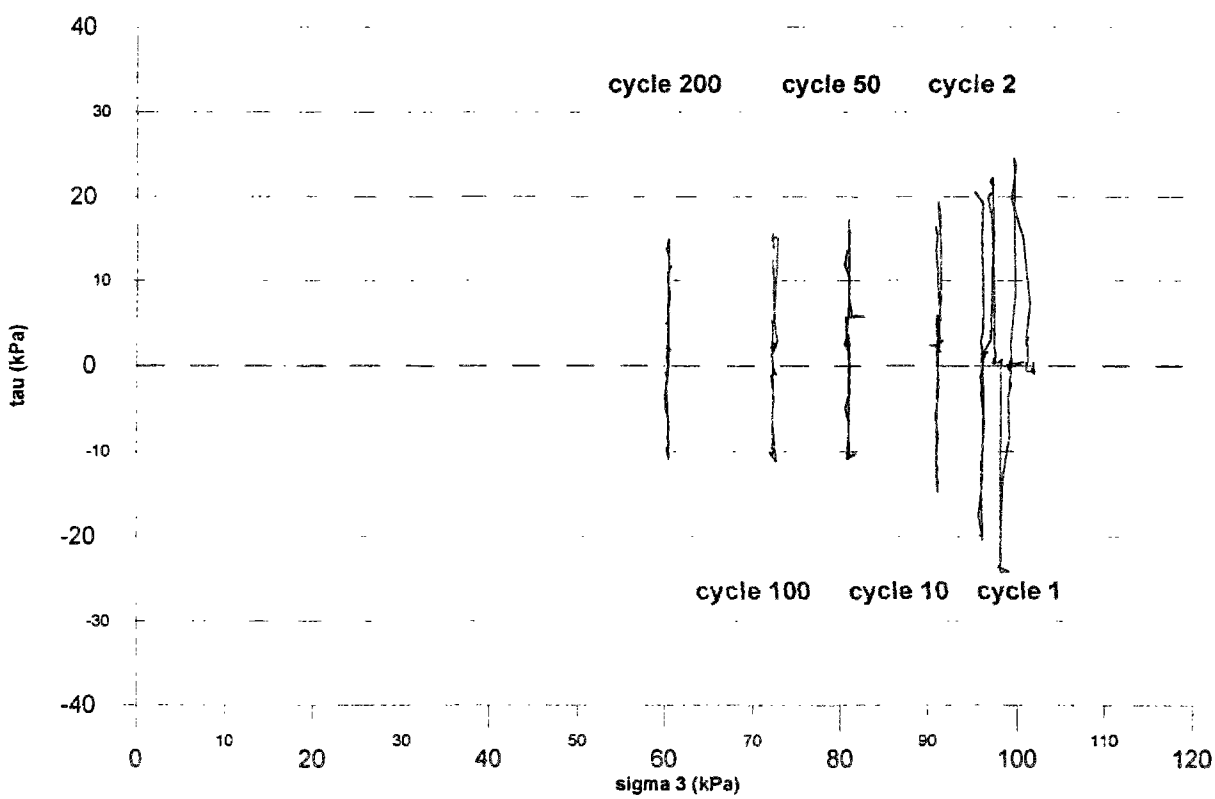


Figure V-14. *Chemin de cisaillement dans le plan (sigma3 - τ) ; sable d'Hostun RF, I_d = 0,88, interface lisse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 1 mm*

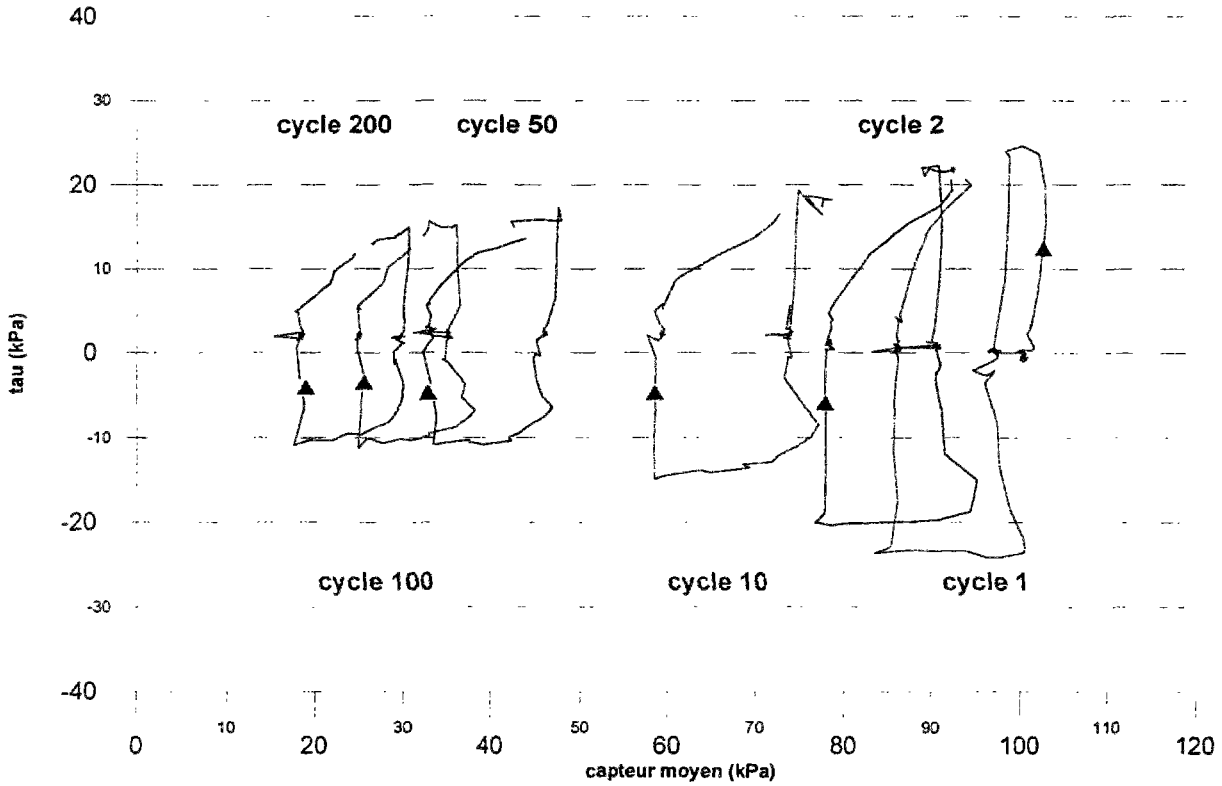


Figure V-15. *Chemin de cisaillement dans le plan (capm - τ).; sable d'Hostun RF, I_d = 0,88, interface lisse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 1 mm*

b. Influence de la pression radiale initiale

Des essais ont été réalisés, pour une interface lisse, sur un échantillon de sable RF dense et une amplitude de cisaillement de 1 mm, à des pressions radiales initiales de 100, 200 et 400 kPa. L'allure des courbes représentant la contrainte de cisaillement est identique pour les trois essais (figure V-16). La contrainte de cisaillement, qui atteint sa valeur maximale lors du premier cycle, diminue plus rapidement pour une valeur de la pression radiale initiale élevée. Entre le premier et le second cycle, la diminution de la contrainte de cisaillement importante pour une pression radiale initiale de 400 kPa est moins marquée pour 100 et 200 kPa de pression radiale initiale. Cette forte diminution peut s'expliquer par une chute de la pression radiale externe pour l'essai à 400 kPa (figure V-17).

La mesure de la contrainte radiale au sein de la zone d'interface nous montre les phases de contractance et de dilatance au sein de l'interface (figure V-18). La contrainte normale diminue d'environ 80 % au sein de la couche d'interface à partir d'une centaine de

cycles. L'amplitude des phases de contractance - dilatance augmente avec l'augmentation de la pression radiale initiale.

La figure V-19 présente les chemins de cisaillement suivis pendant les trois essais, dans le plan (sigma3 - τ). Une grande similitude de comportement est observée.

c. Influence de la densité initiale de l'échantillon

Des essais ont été réalisés, pour une interface lisse, une amplitude de cisaillement de 1 mm et une pression radiale initiale de 100 kPa, sur un échantillon dense (I_d = 0,88) et un échantillon initialement lâche (I_d = 0,20). Pour les deux densités, la contrainte de cisaillement diminue avec le nombre de cycles (figure V-20). La valeur de la pression radiale externe diminue pour les deux densités, beaucoup plus pour le sable initialement lâche que pour le sable dense (figure V-21).

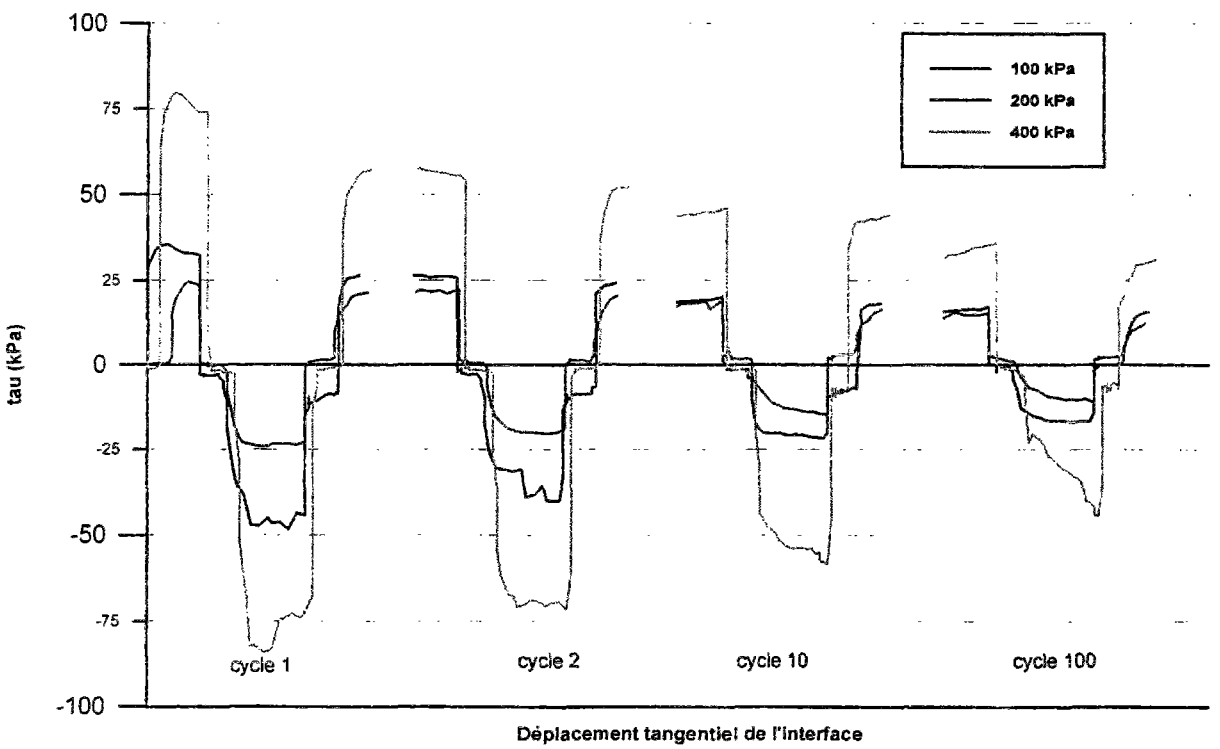


Figure V-16. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour différents cycles; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, amplitude : 1 mm*

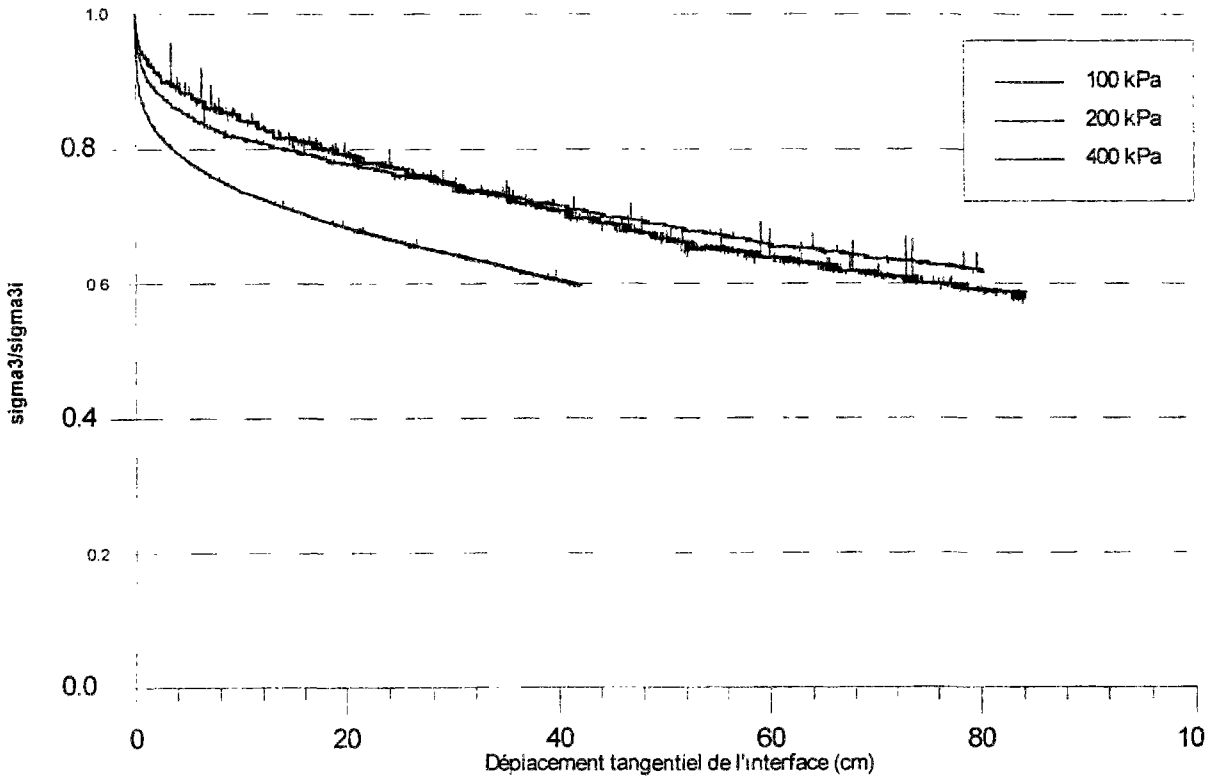


Figure V-17. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, amplitude : 1 mm*

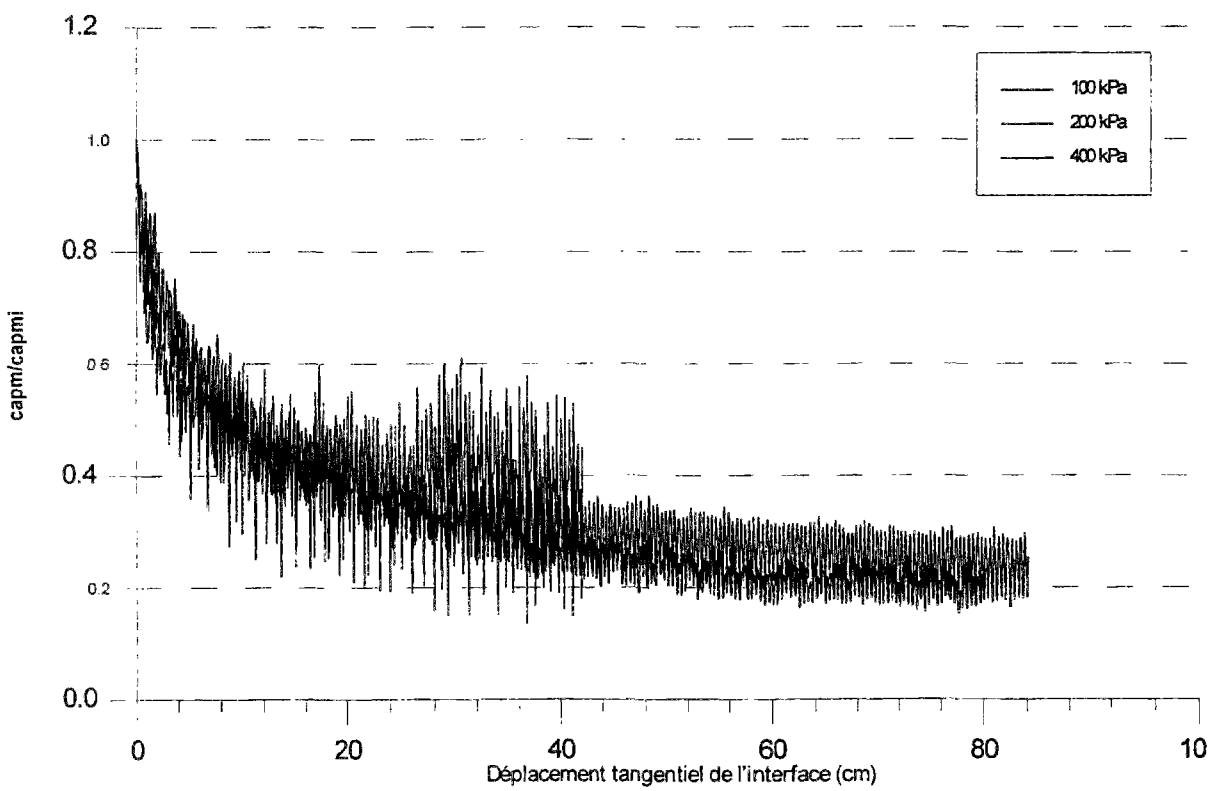


Figure V-18. *Contrainte normale au sein de l'interface en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, amplitude : 1 mm*

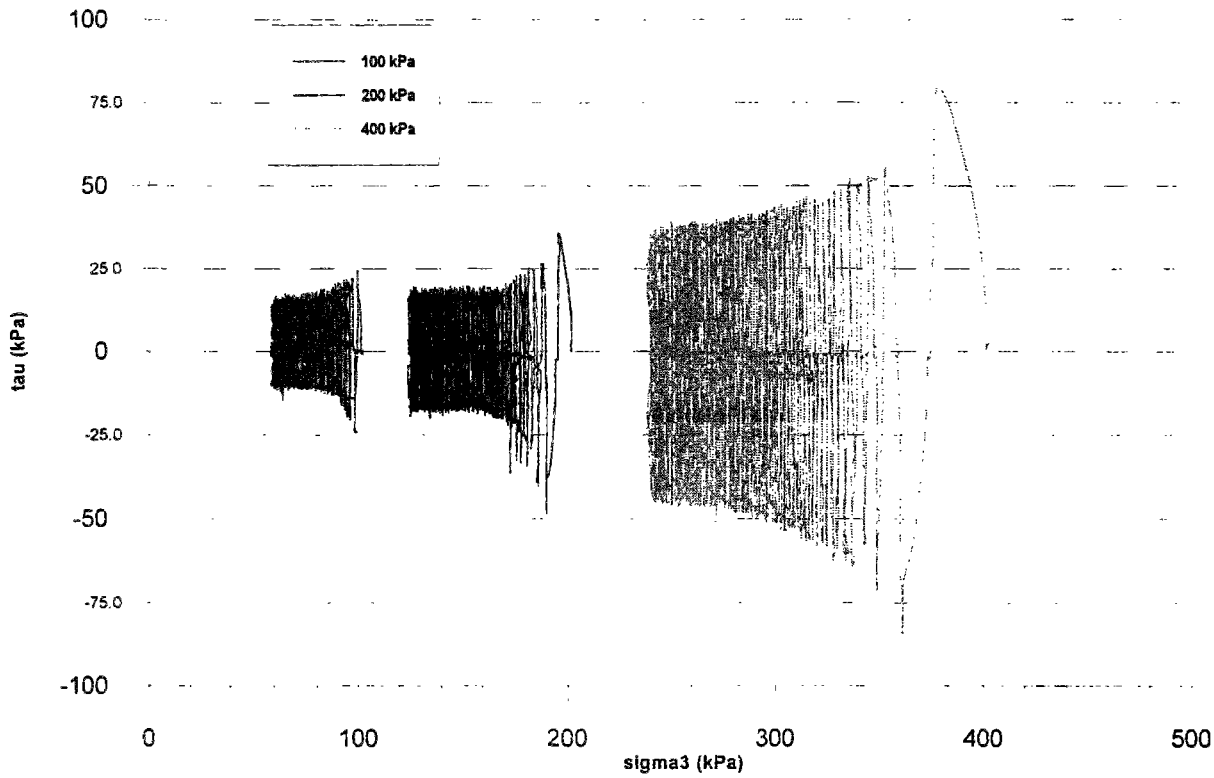


Figure V-19. *Chemins de cisaillement dans le plan (sigma3 -τ) ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, amplitude : 1 mm*

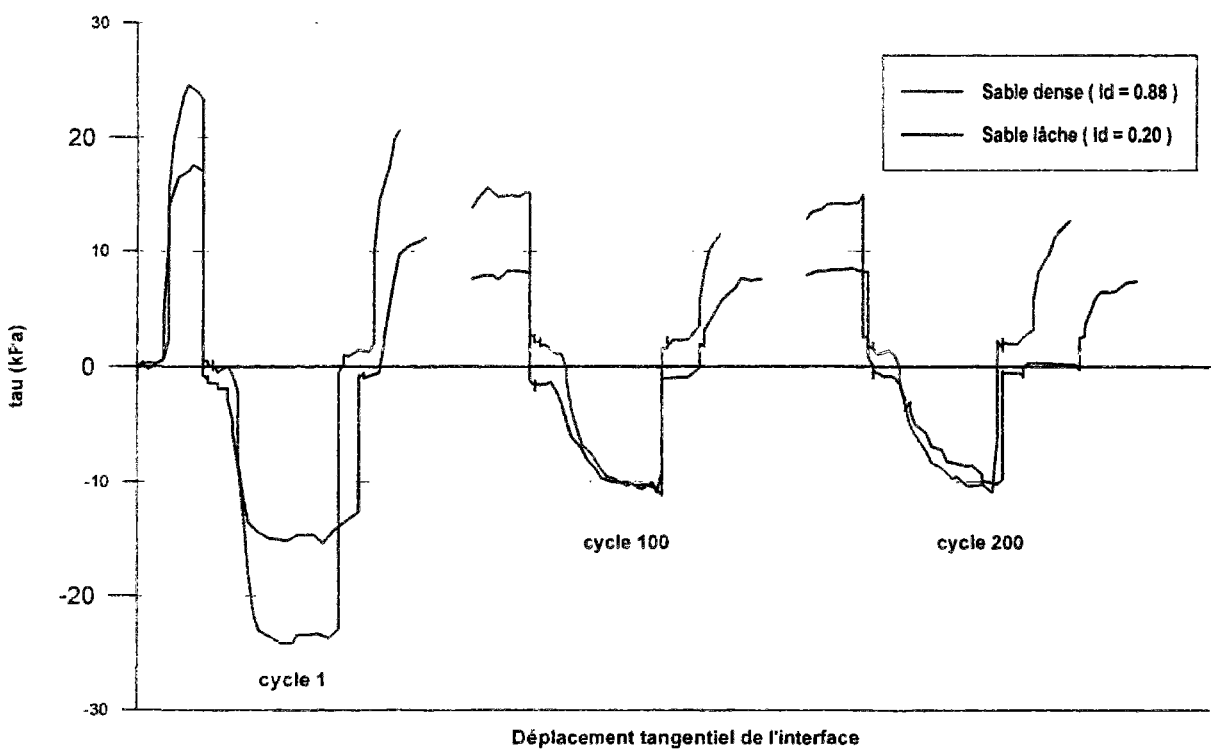


Figure V-20. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour différents cycles ; sable d'Hostun RF dense et lâche, interface lisse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

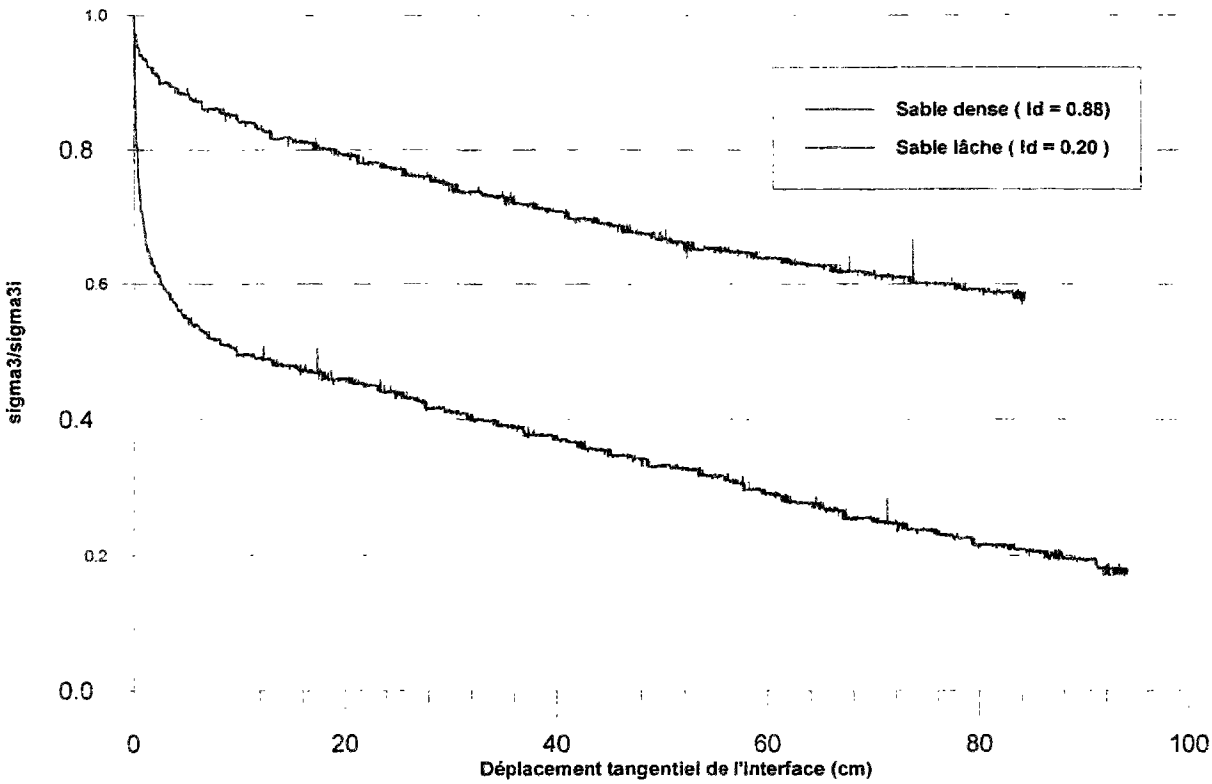


Figure V-21. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense et lâche, interface lisse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

La mesure de la contrainte radiale au sein de la zone d'interface nous montre des phases de contractance et de dilatance au sein de l'interface pour l'échantillon de sable dense plus marquées que pour l'échantillon de sable initialement lâche où la diminution de la contrainte normale se fait très rapidement pour atteindre une valeur très faible (figure V-22).

d. Influence de la rugosité de l'interface

Nous avons utilisé un clou lisse (R_{max} = 15 µm) et un clou rugueux (R_{max} = 1 mm) pour étudier l'influence de la rugosité sur le comportement de l'interface. Ces essais ont été réalisés avec une amplitude de cisaillement de 1 mm et une pression radiale initiale de 100 kPa, sur des échantillons de sable dense. Comme pour les essais monotones, la contrainte de

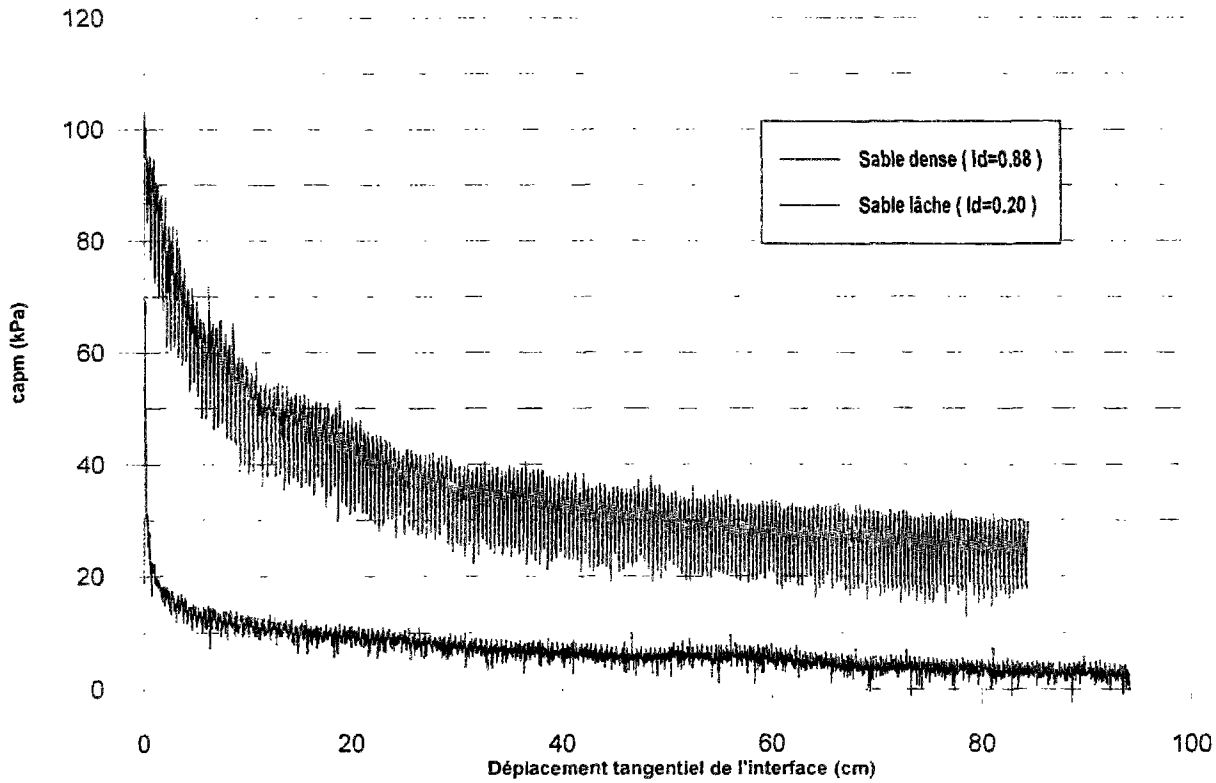


Figure V-22. *Contrainte normale au sein de l'interface en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense et lâche, interface lisse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

cisaillement lors du premier cycle est beaucoup plus importante pour une interface rugueuse que pour l'interface lisse (figure V-23). La courbe obtenue avec une interface rugueuse ne présente pas de contrainte de cisaillement nulle sur un déplacement tangentiel de 4 à 5 dixièmes de millimètre. Pour les deux rugosités, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement est atteinte lors du premier cycle puis diminue avec le nombre de cycles, de façon plus importante sur l'essai avec l'interface rugueuse. La valeur de la pression radiale externe diminue pour les deux densités mais beaucoup plus pour l'interface rugueuse que pour l'interface lisse (figure V-24). Pour l'interface rugueuse, le caractère fortement contractant et dilatant à chaque inversion de sens de cisaillement apparaît sur la mesure de la pression radiale externe alors que ce phénomène n'est visible que sur la lecture des capteurs de contrainte locale pour l'interface lisse.

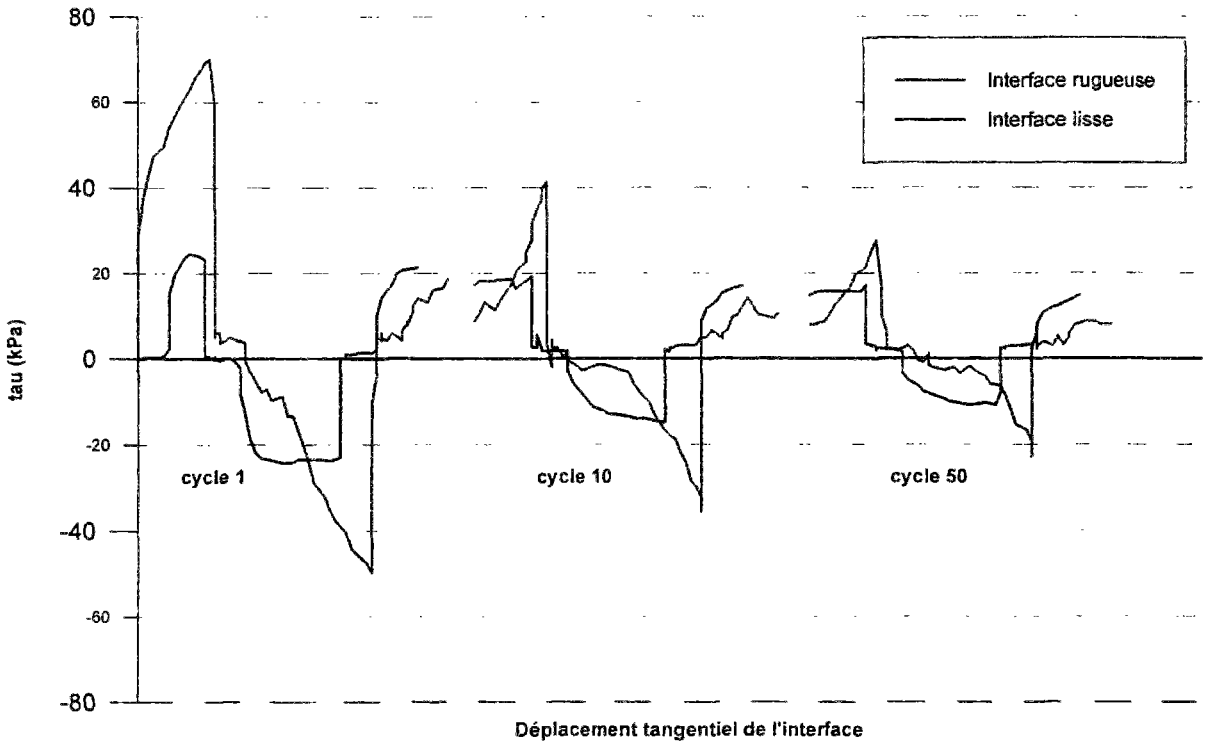


Figure V-23. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour différents cycles ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse et rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

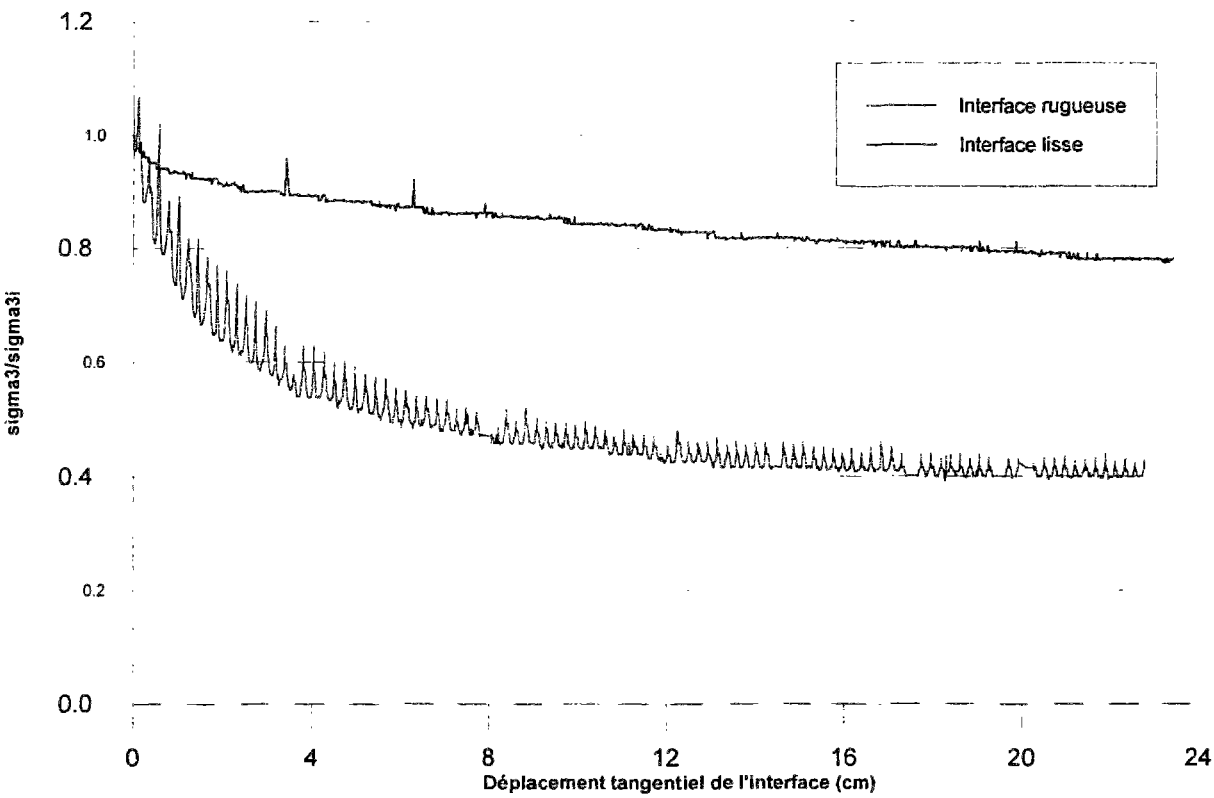


Figure V-24. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse et rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

e. Influence de l'amplitude de cisaillement

Pour étudier l'influence de l'amplitude du cisaillement, nous avons choisi des valeurs d'amplitude de 1, 2 et 5 mm. Ces essais ont été réalisés avec une pression radiale initiale de 200 kPa, sur un échantillon dense. La détermination de l'amplitude de cisaillement doit se faire par rapport à la valeur du déplacement tangentiel nécessaire, lors d'un cisaillement monotone, pour atteindre le pic de résistance au cisaillement. Les valeurs obtenues pour le pic de résistance au cisaillement (chapitre II) sont d'environ 1 mm pour du sable dense, avec une interface lisse. Les trois valeurs que nous avons étudiées doivent donc permettre une mobilisation complète de la résistance au cisaillement lors du premier cycle. Ceci est confirmé par la représentation de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel relatif (figure V-25). Dès le second cycle, la contrainte de cisaillement diminue fortement. Des paliers apparaissent, très marqués pour un cisaillement de 5 mm d'amplitude. Une étude avec une amplitude de déplacement plus faible serait intéressante.

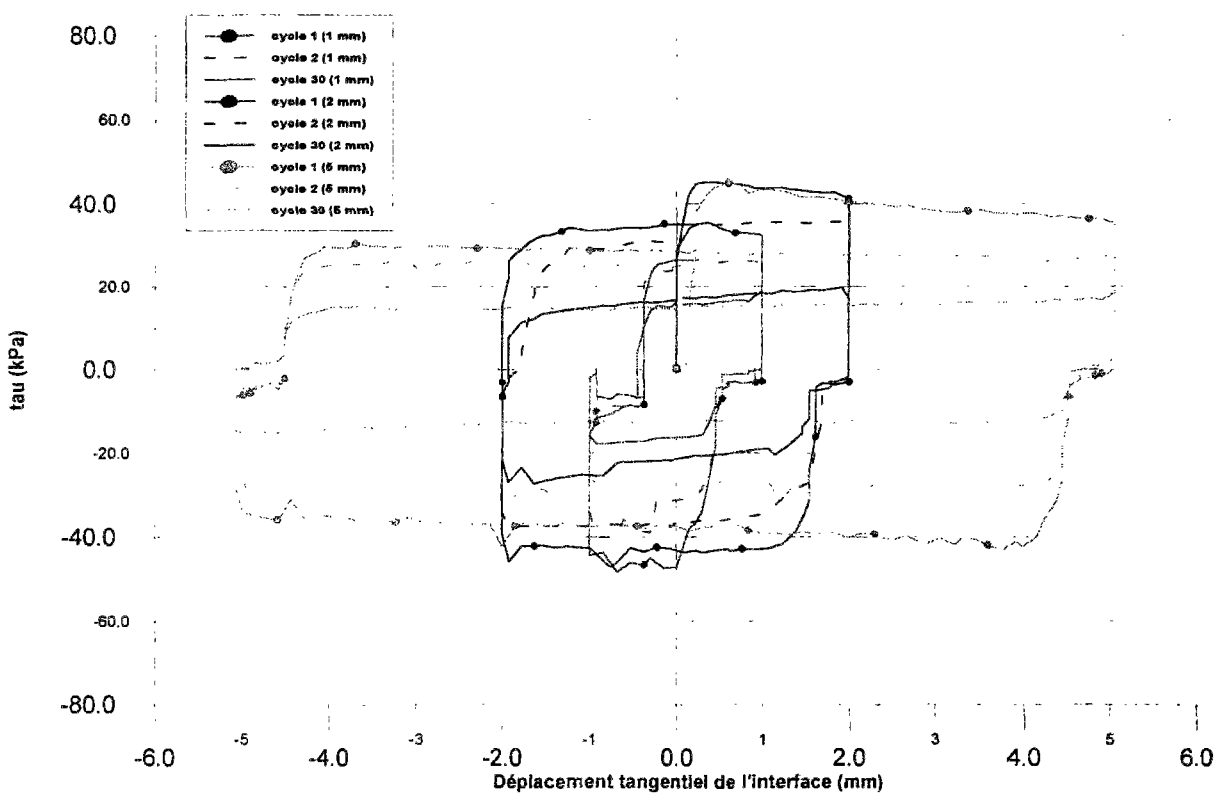


Figure V-25. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour 1mm, 2 mm et 5 mm d'amplitude ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, σ_{3i} = 200 kPa*

La pression radiale externe diminue plus faiblement pour une grande amplitude en fonction du déplacement tangentiel cumulé mais plus fortement en fonction du nombre de cycle (figure V-26). La mesure de la contrainte normale au sein de l'interface nous montre des phases de contractance et de dilatance d'autant plus marquées que l'amplitude est importante ainsi qu'une diminution globale en fonction du déplacement tangentiel cumulé indépendante de l'amplitude (figure V-27).

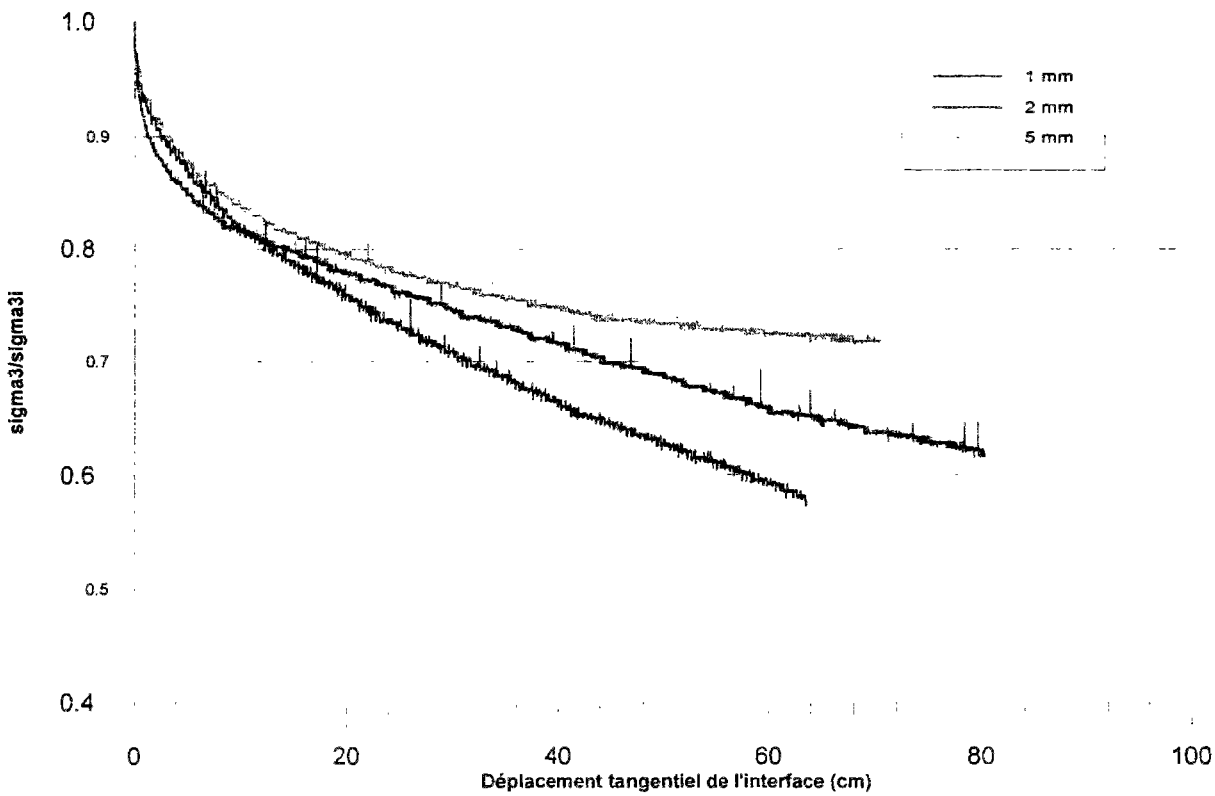


Figure V-26. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, amplitude : 1 mm, 2 mm et 5 mm, σ_{3i} = 200 kPa*

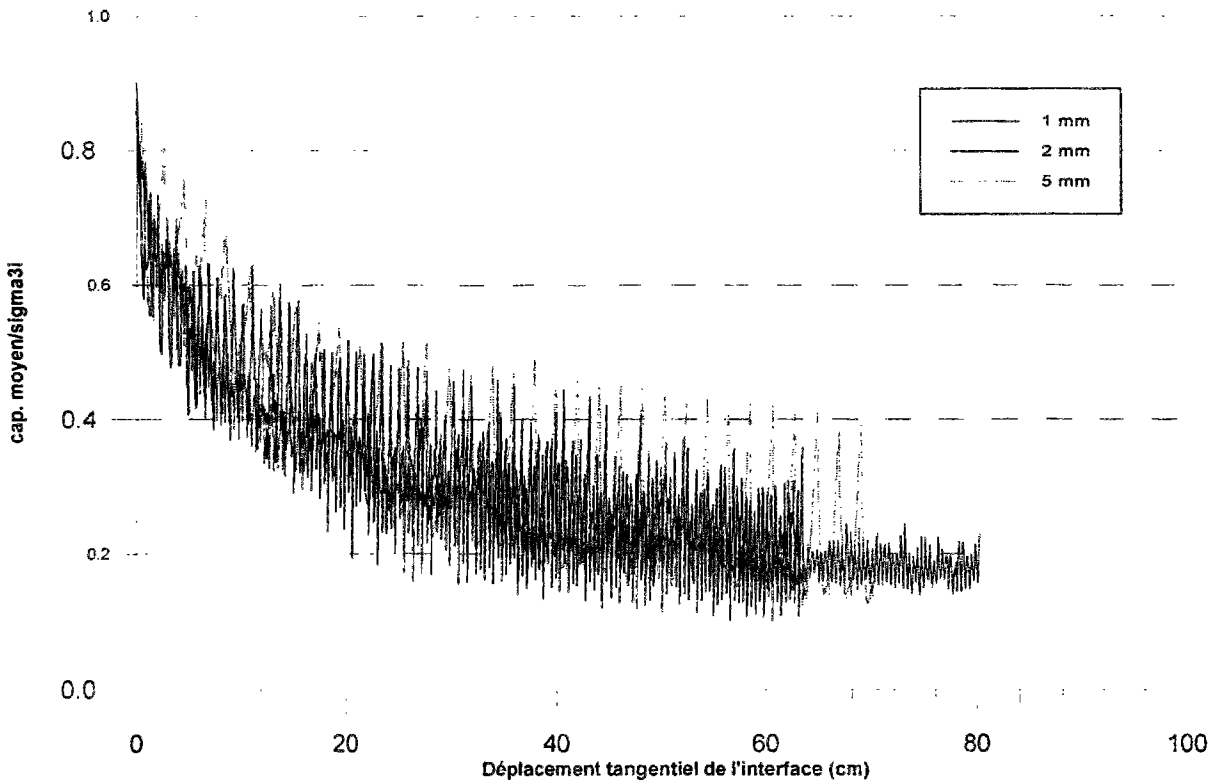


Figure V-27. *Contrainte normale au sein de l'interface en fonction du déplacement tangentiel ; sable d'Hostun RF dense, interface lisse, amplitude : 1 mm, 2 mm et 5 mm, σ_{3i} = 200 kPa*

V.3.3.2 Essais sur le gravier d'Hostun 14~10

a. Présentation des résultats obtenus pour un essai

Nous présentons les résultats obtenus avec un échantillon de gravier 14~10 dense (I_d=0,67), avec une interface rugueuse, une pression radiale initiale de 100 kPa et une amplitude de cisaillement alterné de 2 mm. Les résultats des autres essais réalisés sur le gravier 14~10 apparaissent dans l'étude de l'influence des différents paramètres.

Comme nous l'avons observé pour les essais réalisés sur le sable avec une interface rugueuse, la forme des boucles représentant la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel relatif de l'interface ne présente pas de période de déplacement à contrainte de cisaillement nulle, après l'inversion du sens de marche du moteur (figures V-28

et V-29). La contrainte de cisaillement atteint une valeur maximale lors du premier cycle, puis elle décroît avec le nombre de cycle pour se stabiliser à partir de 40 cycles. Comme pour les essais sur le sable, les courbes sont très régulières.

Les figures V-30 et V-31 présentent l'évolution de la pression radiale externe au cours de l'essai. Pour le premier cycle, nous observons une phase initiale de contractance suivie d'une phase de dilatance de l'échantillon (augmentation de la pression radiale externe jusqu'à 112 kPa). Ce phénomène est identique à celui observé pour un essai monotone. Une seconde phase de contractance, importante, apparaît à l'inversion du sens de cisaillement. Elle est fortement amplifiée par l'alternance du cisaillement, par rapport à la phase de contractance initiale d'un essai monotone. La contractance globale de l'échantillon au cours de l'essai est le résultat de phases successives de contractance - dilatance.

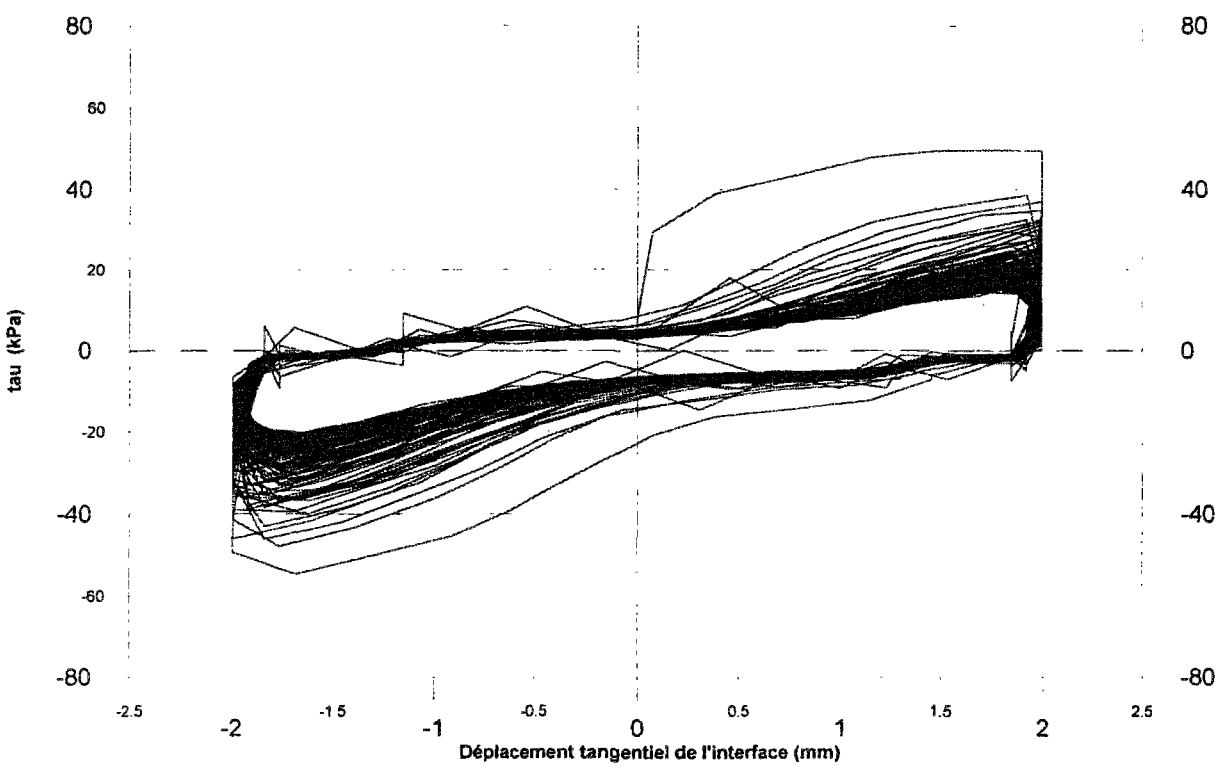


Figure V-28. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel ; gravier 14~10, I_d = 0,67, interface rugueuse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 2 mm*

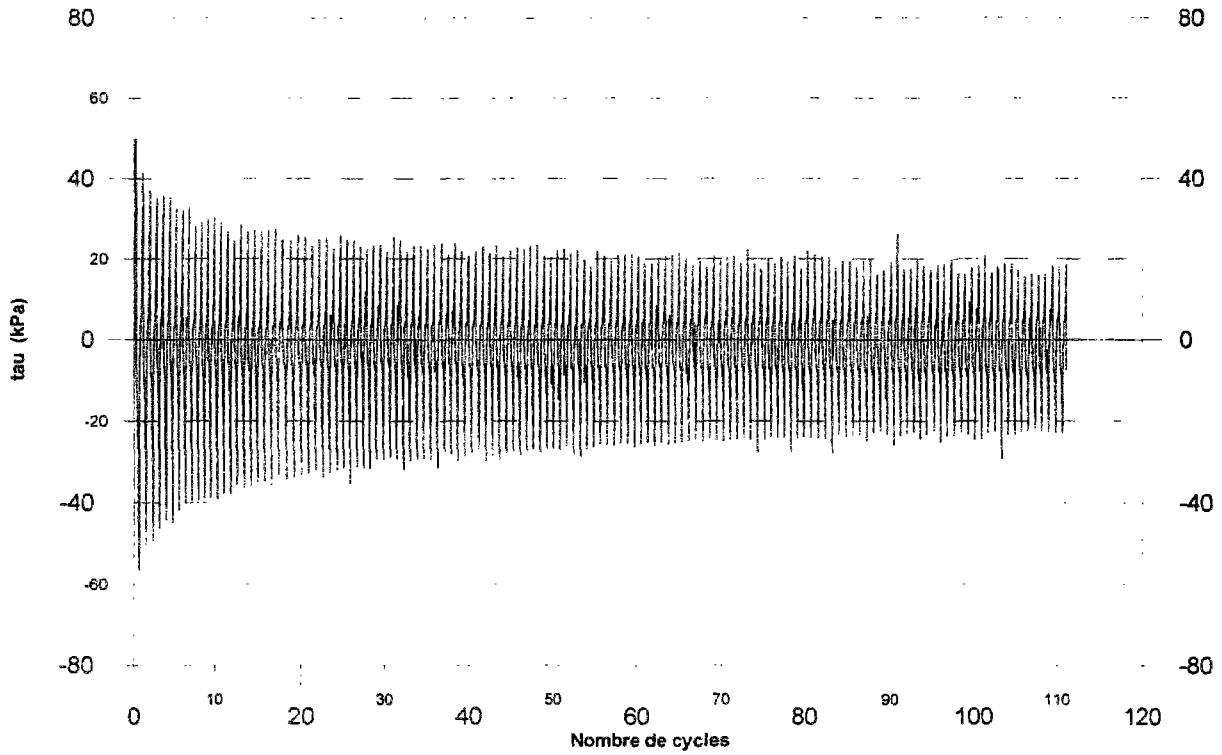


Figure V-29. *Contrainte de cisaillement en fonction du nombre de cycles ; gravier 14~10, I_d = 0,67, interface rugueuse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 2 mm*

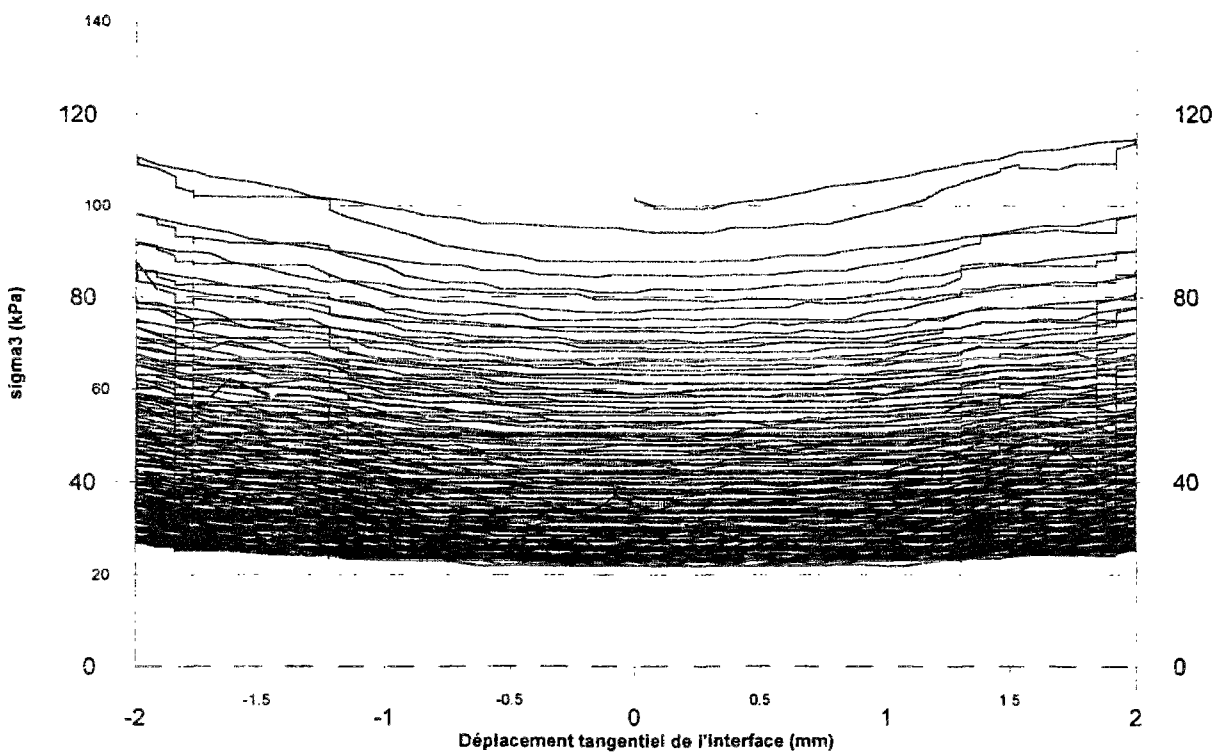


Figure V-30. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; gravier 14~10, I_d = 0,67, interface rugueuse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 2 mm*

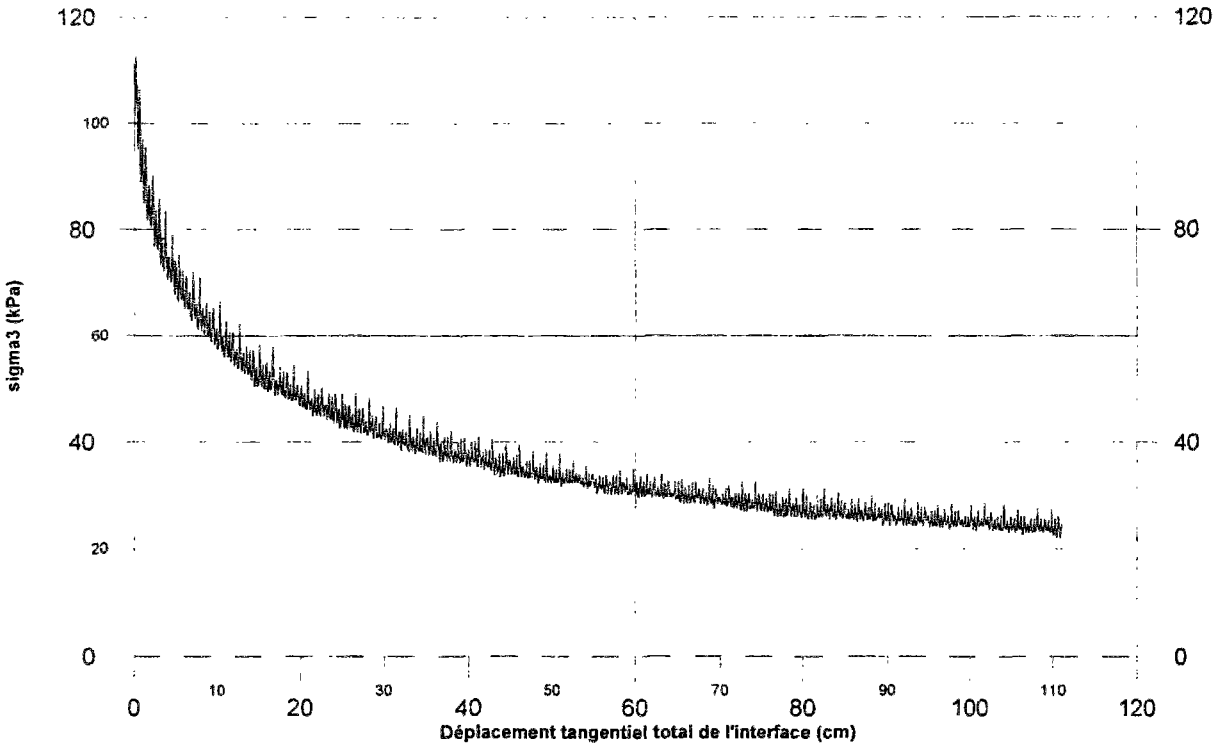


Figure V-31. *Pression radiale externe en fonction du nombre de cycles ; gravier 14~10, I_d = 0,67, interface rugueuse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 2 mm*

La figure V-32 représente le chemin de cisaillement dans le plan (sigma3 - τ). Ce chemin s'inscrit dans un fuseau délimité par deux droites symétriques par rapport à l'axe des abscisses, correspondant à un angle de frottement mobilisé de 20°, valeur de l'angle de frottement résiduel obtenue pour les essais de cisaillement monotone. La forme des boucles est due à la forte phase de contractance qui accompagne l'inversion du sens de cisaillement.

b. Influence de la pression radiale initiale

Trois essais ont été réalisés sur un échantillon de gravier 14~10 dense, avec une amplitude de cisaillement de 1 mm, à des pressions radiales initiales de 100, 200 et 400 kPa (figure V-33). Les pics de contrainte atteints sont de 44, 80 et 158 kPa, respectivement pour 100, 200 et 400 kPa de pression radiale initiale. Après 50 cycles, la contrainte de cisaillement mobilisée correspond à 50 % de la contrainte de cisaillement mobilisée lors du premier cycle.

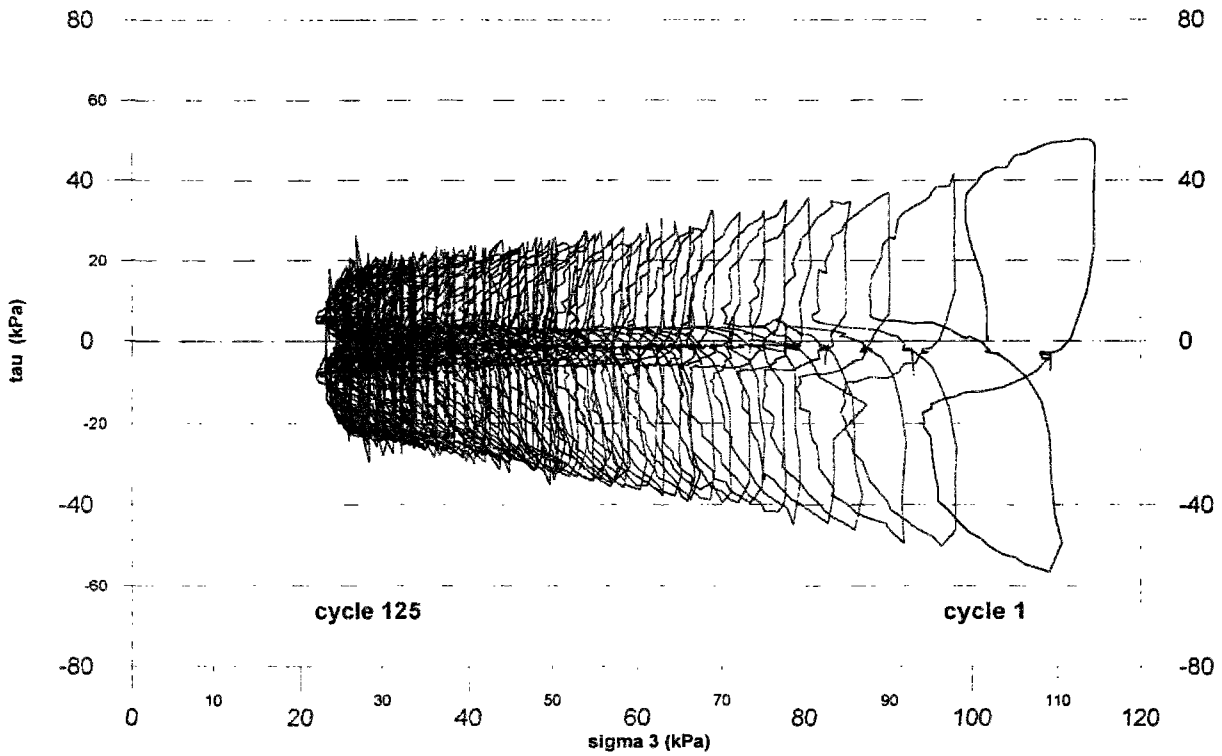


Figure V-32. *Chemin de cisaillement dans le plan (sigma3 - τ) ; gravier 14~10, I_d = 0,67, interface rugueuse, σ_{3i} = 100 kPa, ampl. : 2 mm*

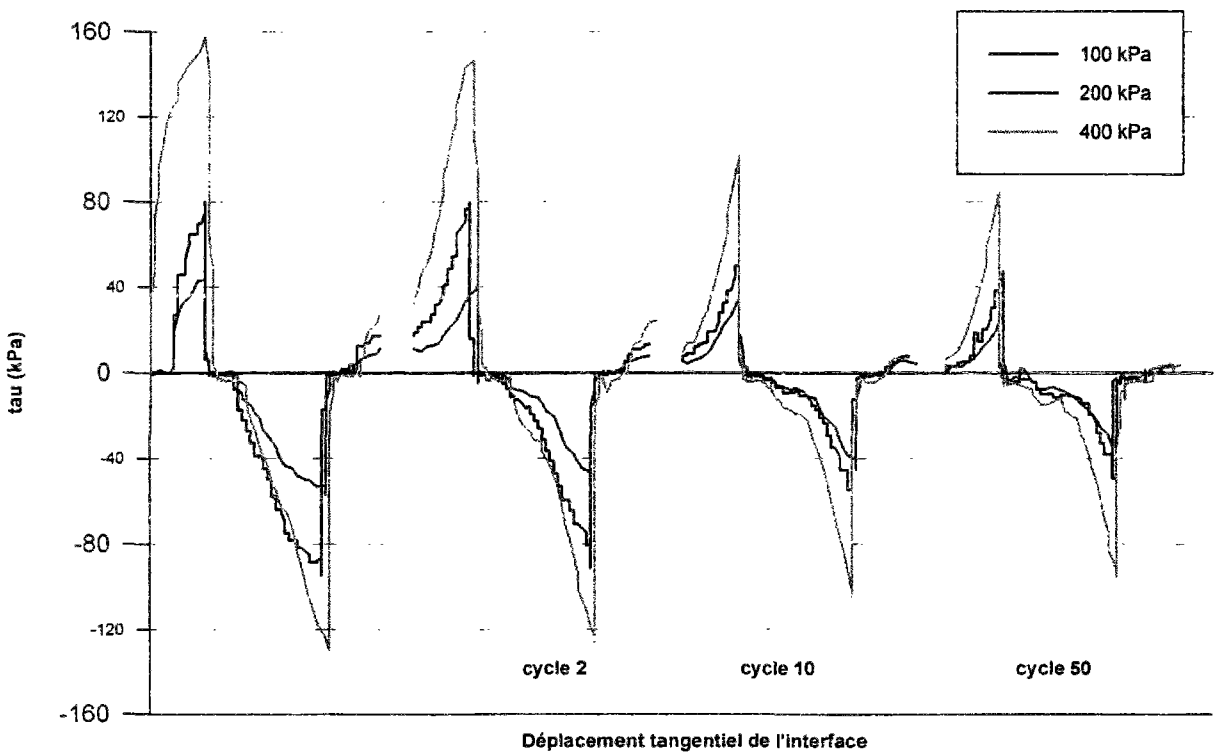


Figure V-33. Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour différents cycles ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse, amplitude : 1 mm

La pression radiale externe varie de façon identique pour les trois valeurs de la pression radiale initiale. Au bout de 50 cycles, elle a perdu 60% de sa valeur initiale (figure V-34). Les phases de contractance et dilatance successives apparaissent sur ce graphe, avec des amplitudes similaires.

Les chemins de cisaillement suivis pour les trois essais sont représentés sur la figure V-35. L'angle de frottement mobilisé pour ces trois essais, et à chaque cycle, est sensiblement le même. Ces chemins peuvent être inscrits à l'intérieur de deux droites symétriques par rapport à l'axe des abscisses.

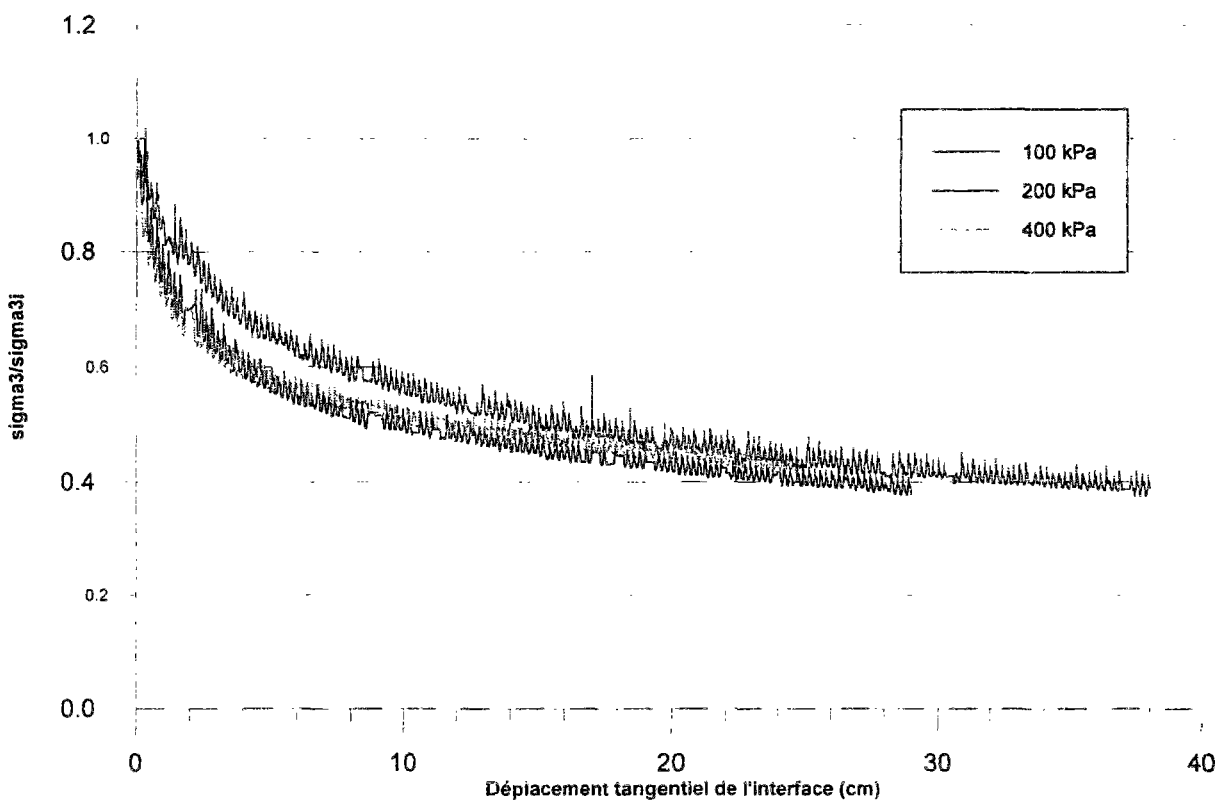


Figure V-34. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse, amplitude : 1 mm*

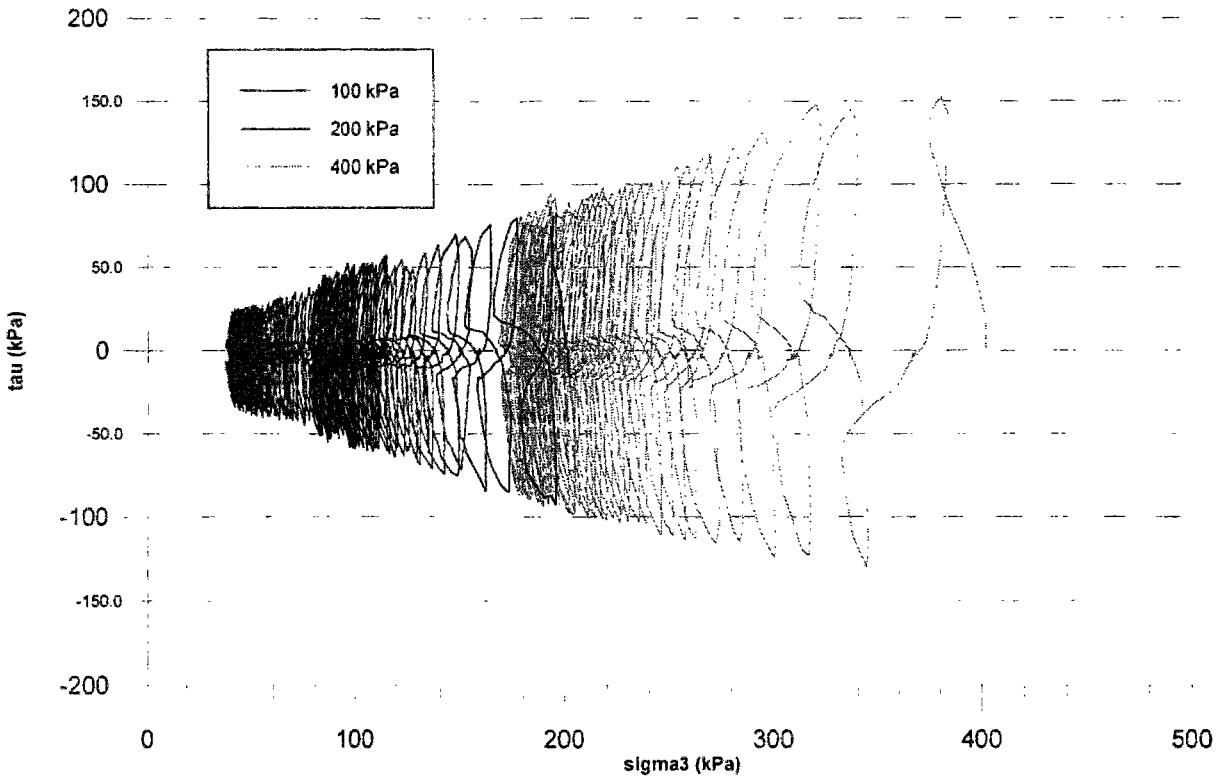


Figure V-35. *Chemins de cisaillement dans le plan (sigma3 - τ) ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse, amplitude : 1 mm*

c. Influence de la densité initiale de l'échantillon

Pour une interface rugueuse, deux essais ont été réalisés, avec une amplitude de cisaillement de 1 mm et une pression radiale initiale de 100 kPa, sur un échantillon dense (I_d = 0,67) et un échantillon initialement lâche (I_d = 0,31). La diminution de la contrainte de cisaillement est plus importante pour le sable initialement lâche que pour le sable dense (pour le sable lâche, τ_{max} = 30 kPa pour le premier cycle et τ_{max} = 10 kPa pour le centième cycle ; pour le sable dense, τ_{max} = 44 kPa pour le premier cycle et τ_{max} = 23 kPa pour le centième cycle ; figure V-36).

La valeur de la pression radiale externe diminue pour les deux densités mais beaucoup plus pour le gravier initialement lâche que pour le gravier dense (figure V-37). Les phases de contractance - dilatance sont plus marquées pour l'échantillon dense que pour l'échantillon initialement lâche. Pour l'échantillon initialement lâche, la pression radiale externe passe de 100 kPa à 5 kPa à partir de 50 cycles.

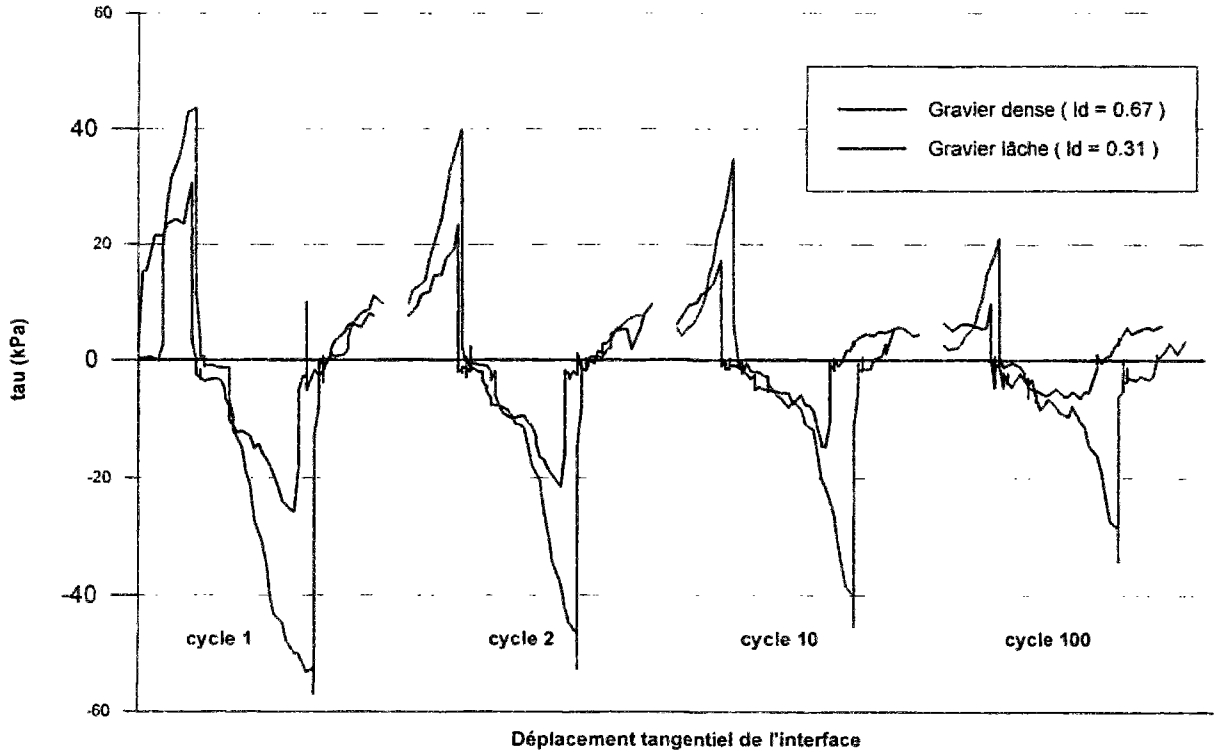


Figure V-36. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel ; gravier 14~10 dense et lâche, interface rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

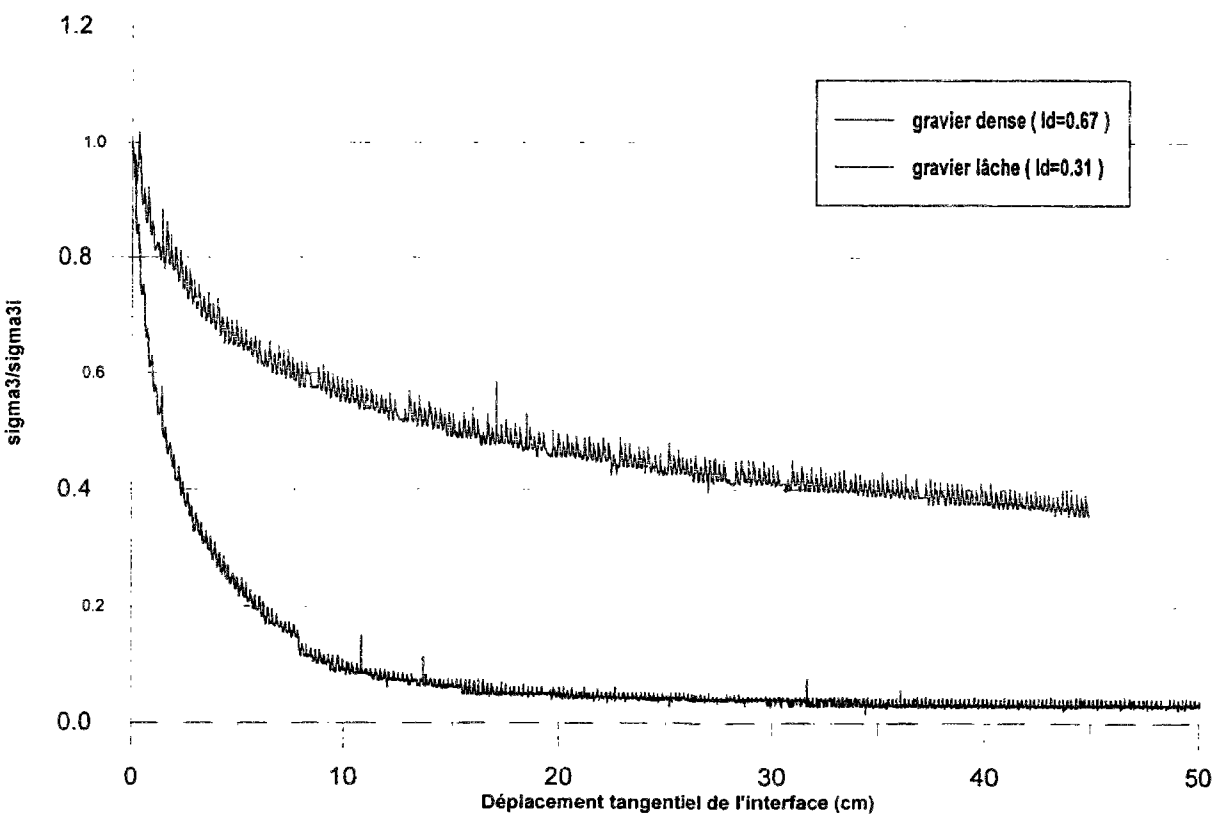


Figure V-37. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; gravier d'Hostun 14~10 dense et lâche, interface rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

d. Influence de la rugosité de l'interface

Deux essais ont été réalisés, l'un avec un clou lisse (R_{max} = 15 µm) et l'autre avec un clou rugueux (R_{max} = 1 mm), avec une amplitude de cisaillement de 1 mm et une pression radiale initiale de 100 kPa, sur des échantillons de gravier dense. Lors du premier cycle, la valeur maximale atteinte par le contrainte de cisaillement est de 42 kPa pour l'interface rugueuse et de 10 kPa pour l'interface lisse (figure V-38). Pour les cycles suivants, alors que la contrainte de cisaillement diminue pour l'interface rugueuse, elle augmente pour l'interface lisse. Ce phénomène, rencontré lors de l'étude bibliographique, n'était pas encore apparu lors des essais de cisaillement simple annulaire. Après 100 cycles, alors que pour l'interface rugueuse, la contrainte de cisaillement mobilisée vaut 20 kPa, elle atteint 24 kPa pour l'interface lisse.

La valeur de la pression radiale externe diminue pour les deux densités mais beaucoup plus pour l'interface rugueuse que pour l'interface lisse (figure V-39). L'étude de cette variable n'explique pas l'augmentation de la contrainte de cisaillement pour le cisaillement avec l'interface lisse. Lors du cisaillement avec une interface lisse, la contrainte de cisaillement atteint une valeur supérieure à celle obtenue lors du cisaillement monotone, avec les mêmes conditions d'essais.

Cette différence de comportement peut s'expliquer par des ruptures de grains importantes pour une interface rugueuse (accompagnées de forts mouvements au sein de la couche d'interface), alors que pour une interface lisse, aucune rupture de grain ne se produit (épaisseur de couche d'interface nulle). Cette différence est également illustrée sur la représentation des chemins de cisaillement suivis (figure V-40).

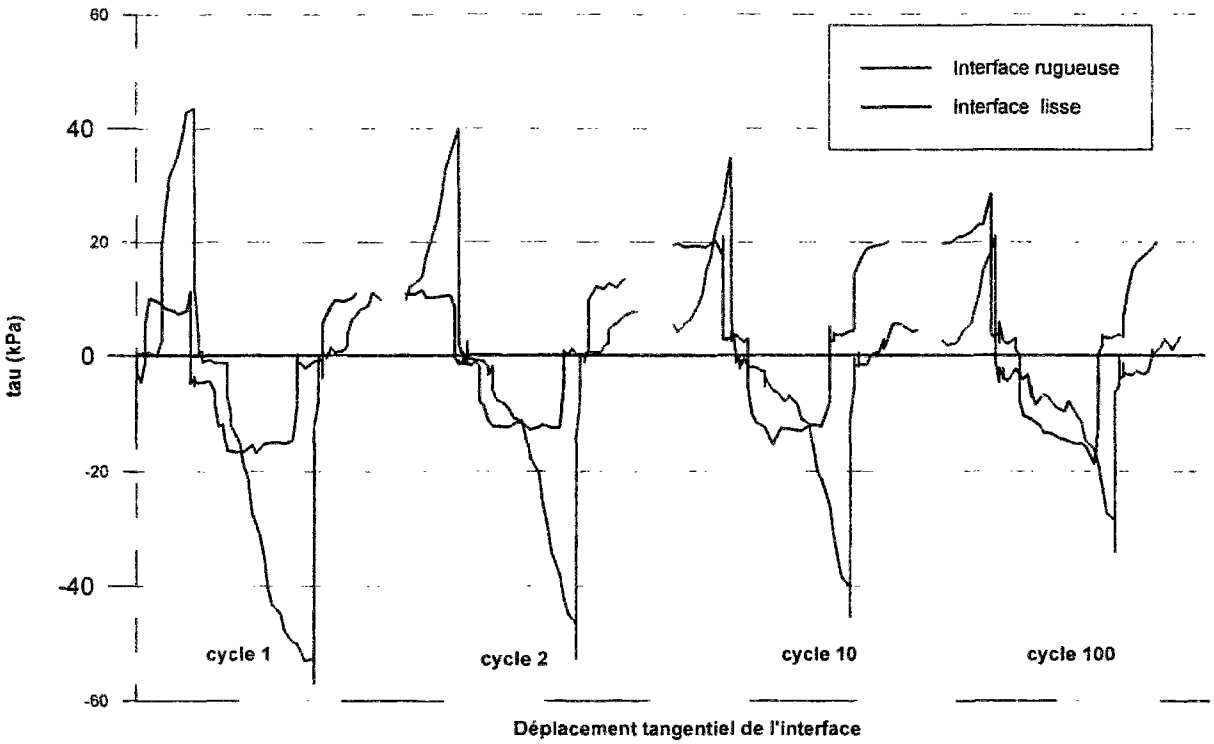


Figure V-38. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface lisse et rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

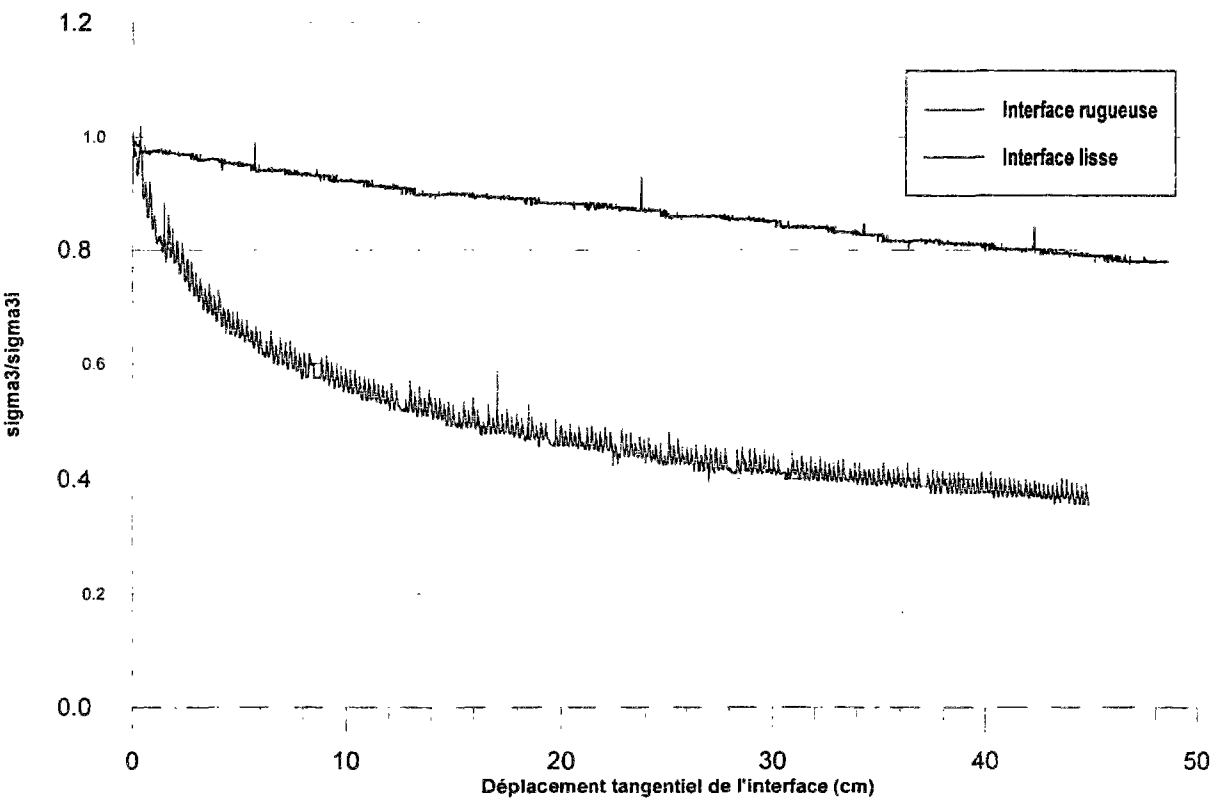


Figure V-39. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface lisse et rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

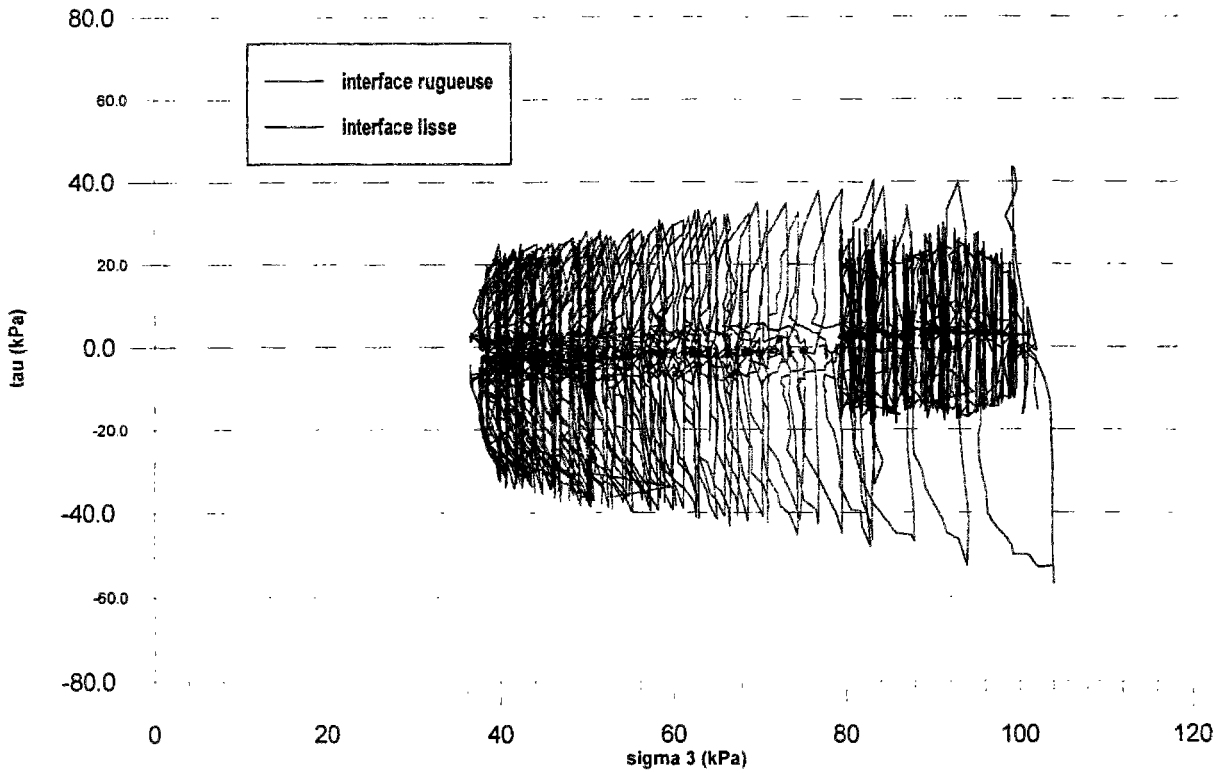


Figure V-40. *Chemins de contrainte dans le plan (sigma3 - τ) ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface lisse et rugueuse, amplitude : 1 mm, σ_{3i} = 100 kPa*

e. Influence de l'amplitude de cisaillement

Des essais avec une amplitude de cisaillement de 1, 2 et 5 mm ont été réalisés avec une pression radiale initiale de 100 kPa, sur des échantillons de gravier 14~10 dense. Pour les essais monotones présentés dans le chapitre III, le maximum de la contrainte de cisaillement a été obtenu pour des déplacements tangentiels de l'interface de l'ordre de 2 cm. Contrairement aux essais sous sollicitation cyclique réalisés sur les échantillons de sable, les trois valeurs de l'amplitude choisie ici(1mm, 2mm et 5mm) sont inférieures au déplacement nécessaire pour atteindre le pic de résistance lors des essais monotones.

Pour les trois amplitudes, les courbes se superposent pour la première phase de chargement. La contrainte de cisaillement continue à augmenter avec l'amplitude pour atteindre sa valeur maximale. Lors du second cycle, l'augmentation de contrainte se fait plus rapidement pour les amplitudes les plus faibles (figure V-41).

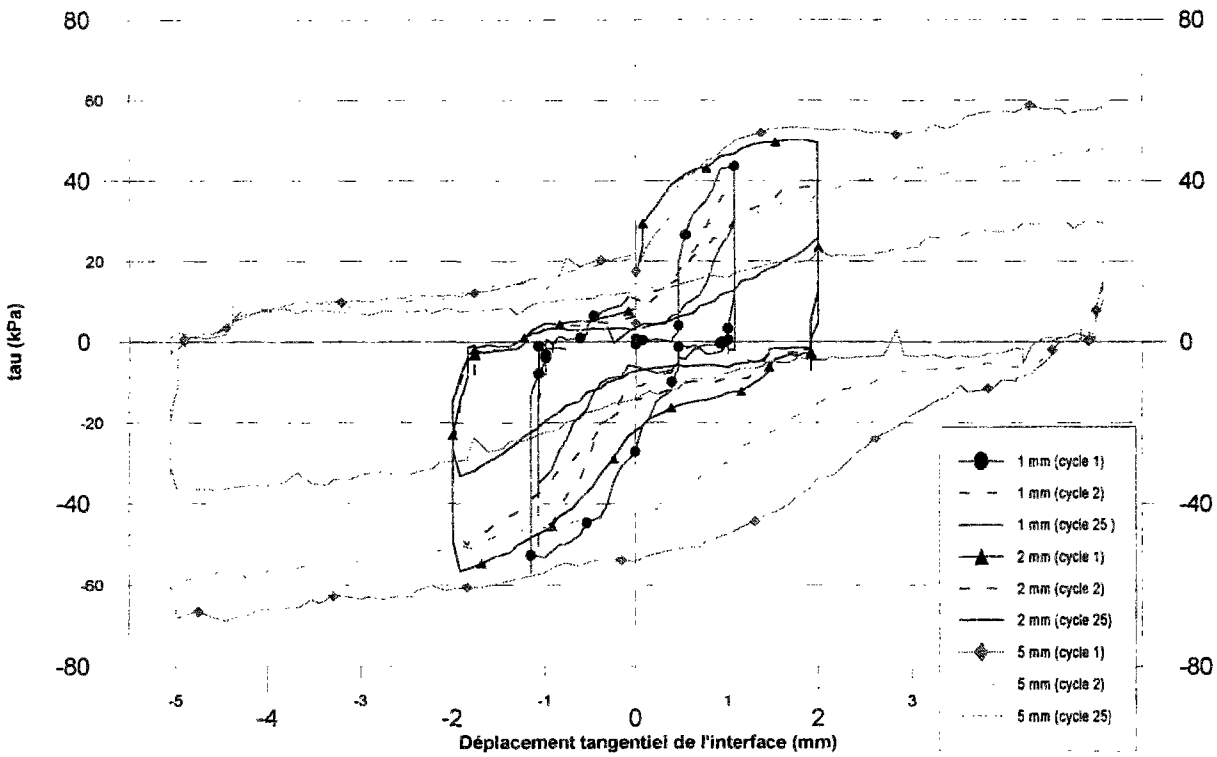


Figure V-41. *Contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel pour 1mm, 2 mm et 5 mm d'amplitude ; gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse,* σ_{3i} *= 100 kPa*

La mesure de la pression radiale externe (figure V-42) nous montre des phases de contractance et de dilatance plus marquées pour des amplitudes plus importantes, résultat analogue aux essais réalisés sur des échantillons de sable. Après le premier cycle, le comportement de l'échantillon est globalement contractant pour des amplitudes de 1 et 2 mm alors qu'il est globalement dilatant pour les deux premiers cycles pour 5 mm d'amplitude. La contractance est cependant plus rapide, en fonction du nombre de cycles, pour de fortes amplitudes alors qu'elle est plus faible en fonction du déplacement tangentiel cumulé.

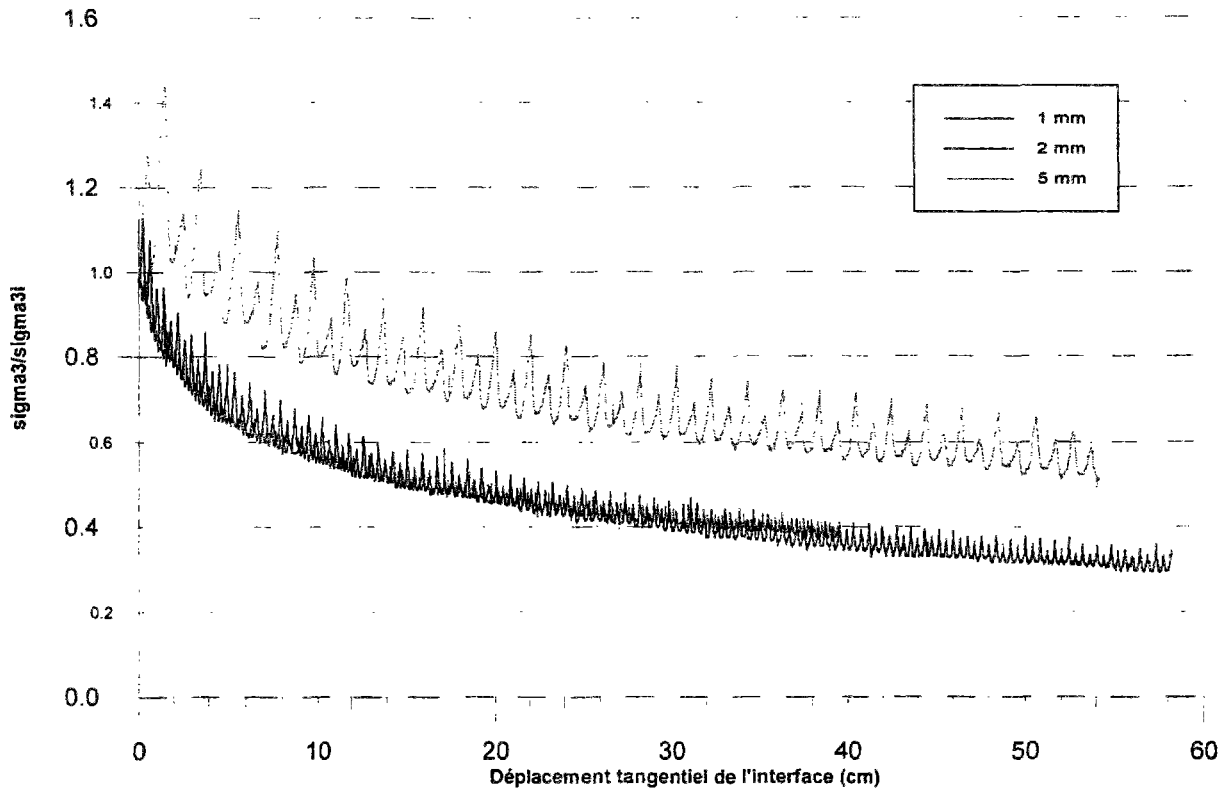


Figure V-42. *Pression radiale externe en fonction du déplacement tangentiel gravier d'Hostun 14~10 dense, interface rugueuse, σ_{3i} = 100 kPa*

V.4. Conclusion

Comme l'étude bibliographique le laissait apparaître, le comportement sous sollicitation cyclique des interfaces est un phénomène complexe. Par rapport au comportement monotone, un nouveau paramètre, l'amplitude du cisaillement, apparaît comme déterminant, sa valeur pouvant être supérieure ou inférieure à la valeur correspondant au pic de contrainte de cisaillement sous chargement monotone, donc directement liée au diamètre moyen du matériau considéré.

Dans notre étude, hormis pour un essai réalisé avec une interface lisse sur un échantillon de gravier 14~10 dense, la contrainte de cisaillement diminue avec le nombre de cycles de chargement, plus ou moins rapidement selon les autres paramètres d'essai.

Notre étude, qui consiste en une première approche limitée à quelques essais réalisés uniquement à volume global d'échantillon constant et à déplacement alterné, mérite d'être complétée pour pouvoir parfaitement décrire le comportement d'une interface sous sollicitation cyclique.

D'une part, des essais à contrainte radiale constante doivent être réalisés pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus par d'autres auteurs.

D'autre part, des essais à chargement contrôlé peuvent facilement être réalisés avec l'appareil de cisaillement simple annulaire, l'asservissement développé pour le déplacement contrôlé pouvant être facilement adapté.

D'autres valeurs d'amplitudes doivent également être utilisées pour analyser clairement les valeurs pré-pic et post-pic obtenues sous chargement monotone. De même, des essais avec de fortes contraintes de chargement (jusqu'à 1 000 kPa pour des essais à pression radiale externe constante), pour lesquelles d'importantes ruptures de grains se produisent, doivent être réalisés. Des chargements cycliques non alternés ("one way") donneront aussi des informations intéressantes par rapport aux chargements monotones.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

A travers l'étude bibliographique, nous avons mis en évidence l'importance du mode de transmission des efforts d'une structure vers le sol, à partir de l'analyse des soutènements en sol renforcé. Ce transfert de charge se fait à travers une fine couche de sol, appelée couche d'interface, qui présente des propriétés singulières par rapport au reste du massif de sol : de forts gradients de déplacement et des variations volumiques importantes apparaissent dans cette zone d'une épaisseur de quelques grains.

Des appareils ont été développés pour analyser le comportement de la couche d'interface, aussi bien *in situ* qu'en laboratoire. Plusieurs appareillages ont été conçus ces dernières années : la boîte de cisaillement direct annulaire (Boutrif, 1993), l'appareil de cisaillement tridimensionnel (Fakharian et Evgin, 1993), l'appareil de cisaillement double (Paikowsky *et al,* 1995), venant compléter les études réalisées classiquement à partir de la boîte de cisaillement plan (simple ou direct) modifiée. Cependant, tous ces appareils présentent des inconvénients, généralement liés aux effets de bord. Ils ne permettent pas d'effectuer des essais avec, simultanément :

- des mesures de la contrainte normale au sein de la couche d'interface,
- une visualisation de la couche d'interface pour avoir accès aux mouvements à l'échelle microscopique, au niveau des grains, et,
- des déplacements tangentiels de cisaillement de grande ampleur, sans perte de matériau.

Nous avons donc consacré notre étude à la conception et à la réalisation d'un appareil de type nouveau, l'appareil de cisaillement simple annulaire, qui permet d'enrichir les connaissances actuelles du comportement des interfaces en fournissant de nouvelles données expérimentales. Le principe de fonctionnement de cet appareil est de faire tourner un cylindre métallique, modélisant la structure rigide, dans un échantillon de sol annulaire. Les effets de bord en sont donc très réduits et la perte de matériau est nulle, même pour de

grands déplacements. Des capteurs de contrainte totale ont été adaptés à la configuration géométrie de l'appareil et permettent une approche qualitative de l'évolution de la contrainte normale, donc des variations volumiques, au sein de la couche d'interface.

Des essais sous sollicitation monotone ont été réalisés, sur du sable d'Hostun RF et sur du gravier d'Hostun 14~10, pour mettre en évidence l'influence des paramètres suivants : la pression radiale initiale de confinement, les conditions aux limites, l'état de compacité de l'échantillon et la rugosité de l'interface.

L'influence de la pression radiale initiale est apparue sur la valeur de la contrainte de cisaillement, mais reste mineure sur les coefficients de frottement. Ceux ci, comme pour l'étude de Boutrif (1993), sont inférieurs aux coefficients de frottement obtenus à partir d'essais réalisés à l'aide d'une boîte de cisaillement direct modifiée. Un échantillon lâche et / ou cisaillé par une interface lisse a globalement un comportement contractant. Cependant, les lectures effectuées par les capteurs de contrainte normale ont montré un comportement local dilatant lors du cisaillement d'un échantillon de sable RF dense par une interface rugueuse. Pour un échantillon dense cisaillé par une interface de ce type, les phases de contractance - dilatance classiquement observées sont suivies par une seconde phase de contractance, pour de grands déplacements tangentiels. Cette seconde phase de contractance est plus importante pour les fortes pressions radiales initiales, qui provoquent des ruptures de grains nombreuses dans la couche d'interface. La rugosité de l'interface et la compacité de l'échantillon sont donc deux paramètres déterminants dans le comportement de l'interface.

Importante pour une modélisation par milieux continus avec microstructure, l'étude du mouvement des grains lors d'un cisaillement simple annulaire a été faite à partir de trois types d'expérimentation (essais sur du gravier 14~10 avec l'appareil de cisaillement simple annulaire, essais sur des rouleaux de Schneebeli à l'aide de l'appareil de cisaillement simple annulaire modifié et simulation numérique du cisaillement simple annulaire d'un échantillon de rouleaux de Schneebeli par la méthode des éléments distincts). Ces expérimentations donnent des résultats qualitativement comparables : la formation de la couche d'interface, d'une épaisseur de 6 à 8 pour une interface rugueuse, est accompagnée de forts gradients de déplacement et d'importantes rotations de grains proches de l'interface.

Le comportement sous sollicitation cyclique des interfaces est un phénomène complexe. Notre étude, qui a consisté en une première approche et qui s'est limitée à une quinzaine d'essais, a permis de mettre en évidence le rôle primordial de l'amplitude du cisaillement. Hormis pour l'essai réalisé avec une interface lisse sur un échantillon de gravier 14~10 dense, nous avons constaté que la contrainte de cisaillement diminue avec le nombre de cycles de chargement. Le comportement globalement contractant de l'échantillon résulte de phases successives de contractance - dilatance, comme l'ont montré les mesures de la contrainte normale au sein de l'interface.

Ainsi, nous disposons maintenant d'un appareil de cisaillement simple annulaire de laboratoire performant, dont tout le potentiel n'a pas encore été exploité.

Sous sollicitation monotone, des essais sous fortes contraintes, jusqu'à 1 000 kPa, doivent être réalisés pour mettre en évidence les phénomènes d'attrition au sein de la couche d'interface. Une extension de l'utilisation de capteurs de contrainte totale au sein de la couche d'interface, permettant éventuellement la mesure du cisaillement, pour les essais avec une interface rugueuse et du gravier, donnerait des résultats quantitatifs de meilleure qualité.

L'emploi d'un pluviateur permettra de construire des échantillons à densité variable et d'une meilleure homogénéité. Des consolidations isotropes sont également réalisables.

L'amélioration de l'étude du mouvement des grains au sein de la couche d'interface est liée à des développements dans le traitement et le dépouillement des acquisitions réalisées. Au niveau expérimental, une visualisation de l'échantillon en cours de cisaillement est possible et une adaptation de l'appareil de cisaillement simple annulaire permet déjà des essais sur rouleaux de Schneebeli. L'utilisation de cylindres de diamètres plus faibles conduirait en effet une meilleure analogie avec le gravier 14~10 et permettrait des comparaisons qualitatives intéressantes.

Sous sollicitation cyclique, une étude importante reste à mener. Des essais à contrainte radiale constante doivent être mis en oeuvre pour confirmer ou infirmer les résultats obtenus par d'autres auteurs. L'influence de l'amplitude de cisaillement doit être approfondie. D'autres essais, à chargement contrôlé, à chargement non alterné ("one way"), et sous fortes contraintes, donneraient aussi des informations intéressantes par rapport aux chargements monotones.

Enfin, des essais sur d'autres types de sol, en particulier sur des sols fins, sont réalisables. Le problème majeur résiderait alors dans la fabrication et la consolidation de l'échantillon, ce qui pourrait durer une ou deux semaines. Le comportement d'interface entre un sol et des géotextiles peut aussi être l'objet de nouvelles investigations. des essais à l'aide de l'appareil de cisaillement simple annulaire pouvant compléter les études actuelles dans ce domaine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDERRAHIM, A. & TISOT, J. P. 1992. Utilisation d'un mini-pressiomètre pour la mesure directe du frottement à l'interface sol pulvérulent-inclusion. *Revue Française de Géotechnique,* 61 : p. 63-74.

ABDERRAHIM, A. & TISOT, J. P. 1993. Friction at the cohesionless soil-structure interface : effect of various parameters according to the classic study and a new approach. *Geotechnical Testing Journal,* 16(1) : p. 122-130.

ACAR, Y. B., DURGUNOGLU, H. T. & TUMAY, M. T. 1982. Interface properties of sand. *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering,* 108 (GT4) : p. 648-654.

AIREY, D. W., AL-DOURI, R. H. & POULOS, H. G. 1992. Estimation of pile friction degradation from shearbox tests. *Geotechnical Testing Journal,* 15(4) : p. 388-392.

AL-DOURI, R. H. & POULOS, H. G. 1992. Static and cyclic direct shear tests on carbonate sands. *Geotechnical Testing Journal,* 15(2) : p. 138-157.

ALIMI, I., BACOT, J., LAREAL, P., LONG, N. T. & SCHLOSSER, F. 1977. Etude de l'adhérence "Sol-Armature". *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo,* 1 : p. 11-14.

BAGUELIN, F., JEZEQUEL, J. F. & SHIELD, D. H. 1978. The Pressuremeter and Foundation Engineering, Series on Rock and Soil Mechanics, Trans Tech Publications, 617 p.

BELMONT, G., DELAURE, E., LERAT, P., SCHLOSSER, F., UNTERREINER, P. & VARDOULAKIS, I. 1994. Dispositif de mesure pour l'évaluation des propriétés d'interface entre un matériau solide et un matériau granulaire. *Brevet d'invention.*

BIAREZ, J. 1968. Généralités sur les propriétés mécaniques des sols ; nouveaux appareils de mesures ; construction de digues sur argiles molles. *La Houille blanche,* 7 : p. 582-590.

BISHOP, A. W., GREEN, G. E., GARGA, V. K., ANDRESEN, A. & BROWN, J. D. 1971. A new ring shear apparatus and its applications to the measurement of residual strength. *Géotechnique*, 21 (4) : p. 273-328.

BJERRUM, L. & LANDVA, A. 1966. Direct simple shear tests on an Norwegian quick clay. *Géotechnique*, 16 : p. 1-20.

BOGDANOVA-BONTCHEVA, N. & LIPPMANN, H. 1975. Rotationssymmetrisches ebenes FlieBen eines granularen Modellmaterials. Acta Mechanica, 21 : p. 93-113.

BOSSCHER, P. J. & ORTIZ, C. G. 1987. Frictional properties between sand and various construction materials. *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 113 (9) : p. 1035-1039.

BOULEBNANE, A. & LAREAL, P. 1994. Mesure des pressions au sein d'un massif de sable sollicité en macrogravité. Rapport final. Programme Macrogravité.

BOULEBNANE, A. 1996. Mesure des pressions totales sous divers champs de contraintes. Application au procédé Pneusol. Thèse de doctorat, INSA de Lyon (en préparation).

BOULON, M., DESRUES, J. & FORAY, P. 1978. Calcul des pieux : tassements sous charge de service, frottement négatif. *Revue Française de Géotechnique*, 5 : p. 13-21.

BOULON, M., DESRUES, J. & FORAY, P. 1979. Méthode de calcul du comportement des pieux à l'arrachement. *Revue Française de Géotechnique*, 7 : p. 11-22.

BOULON, M. & PUECH, A. 1984. Calcul des pieux sous sollicitations cycliques par la méthodes des éléments finis. *Revue Française de Géotechnique*, 26 : p. 7-20.

BOULON, M. 1986. Développement d'une boîte de cisaillement annulaire. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux*, p. 299-317, Aussois, France.

BOULON, M. & FORAY, P. 1986. Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand. *Proceedings of the 3rd International Conference in Numerical Methods in Offshore Piling*, Nantes, p. 127-147.

BOULON, M., PLYTAS, C. & FORAY, P. 1986. Comportement d'interface et prévision du frottement latéral le long des pieux et tirants d'ancrage. *Revue Française de Géotechnique*, 35 : p. 31-48.

BOULON, M. 1987. Développement d'une boîte de cisaillement annulaire. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux,* p. 369-380, Aussois, France.

BOULON, M. 1988 a. Contribution à la mécanique des interfaces sols-structures. Application au frottement latéral des pieux. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université Joseph Fourier, Grenoble.

BOULON, M. 1988 b. Développement d'une boîte de cisaillement annulaire. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux,* p. 334-339, Aussois, France.

BOULON, M. 1989. Développement d'une boîte de cisaillement annulaire. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux,* p. 368-373, Aussois, France.

BOULON, M. 1991. Le comportement d'interface sol-structure : aspects expérimentaux et numériques. *Revue Française de Géotechnique,* 54 : p. 27-37.

BOULON, M. & BOUTRIF, A. 1991. Essais de cisaillement direct sable - plaque lisse à la boîte de cisaillement annulaire. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux,* p. 295-299, Aussois, France.

BOULON, M. & HASSAN, H. 1994. Mouvement des grains au sein d'une interface sol granulaire-structure. *1ère réunion annuelle, réseau GEO,* 11-15 Décembre, Aussois, France.

BOUTRIF, A. 1993. Mesure du comportement d'interface sol-structure à la boîte de cisaillement annulaire et modélisation. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.

BOWDEN, F. P. & TABOR, D. 1950. The friction and Lubrication of Solids, Part. 1, Oxford University Press, London.

BRUMUND, W. F. & LEONARDS, G. A. 1973. Experimental study of static and dynamic friction between sand and typical construction materials. *Journal of Testing and Evaluation*, 1 (2) : p. 162-165.

BUSTAMANTE, M., FRANK, R. & CHRISTOULAS, S. 1991. Evaluation de quelques méthodes de calcul des pieux forés. *Revue Française de Géotechnique*, 54 : p. 39-52.

BUTTERFIELD, R. & ANDRAWES, K. Z. 1972. On the angles of friction between sand and plane surfaces. *Journal of Terramechanics*, 8 (4) : p. 15-23.

CLOUGH G. W. & DUNCAN J. M. 1969. Finite Element Analyses of Port Allen and Old River Locks. Report n° TE-69-3, U.S. Army Engineers, Waterways Experiment Station, University of California, Berkeley, Calif.

CLOUTERRE. 1991. Recommandations pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols, Presses de l'ENPC, Paris.

COOLING, L. F. & SMITH, D. B. 1935. The shearing resistance of soils. *Journal of the Institution of Civil Engineering* , 3 : p. 333-343.

COOLING, L.F. & SMITH, D.B. 1936. The shearing resistance of soils. *Proceedings of the 1st International Conference of Soil Mechanics and Foundation Enginnering*, Cambridge, U.S.A., 1, p.37-41.

COSSERAT, E. & COSSERAT, F. 1907. Sur la mécanique générale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences,* Paris, Vol. 145.

COSSERAT, E. & COSSERAT, F. 1909. Théorie des Corps Déformables, Herman, Paris.

DESAI, C. S. 1981. Behavior of interfaces between structural and geologic media. *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla Mo, p. 619-638.

DESAI, C. S., DRUMM, E. C. & ZAMAN, M. M. 1985. Cyclic testing and modeling of interfaces. *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, 111(6) : p. 793-815.

DESRUES, J. 1984. Localisation de la déformation dans les milieux granulaires. Thèse de Docteur d'Etat, Institut National Polytechnique, Grenoble.

DESRUES, J. & DUTHILLEUL, B. 1984. Mesure du champ de déformation d'un objet plan par la méthode stéréophotogrammétrique de faux relief. *Journal de Mécanique Théorique et Appliquée*, 3 (1) : p.79-103.

DIDLEY, L., ZASLAWSKY, M. & BLAKE, A. 1974. Method for predicting movements of structural members emplaced in the earth. United States Patent n° 3798962.

DUPLA, J. C. 1995. Application de la sollicitation d'expansion de cavité cylindrique à l'évaluation des caractéristiques de liquéfaction d'un sable. Thèse de doctorat, ENPC.

ESASHI, Y., KATAOKA, T., & YASUDA, M. 1966. Uplift resistance of piles : Pat 1, Cohesionless soil. Report of Central Research Institute of Electric Power Industrie (66037), 1-60 (in Japanese).

FAKHARIAN, K., & EVGIN, E. 1993. A three dimensional apparatus for cyclic testing of interfaces, *Proceedings of the 46th Annual Canadian Geotechnical Conference*, Saskatoon, Canada, p. 485-493.

FAKHARIAN, K., & EVGIN, E. 1995. Simple shear versus direct shear tests on interfaces during cyclic loading. *Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St Louis, USA.

FEDA, J. 1976. Skin friction of piles. *Proceedings of the 6th Europeen Conference of Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Vienne, p. 423-428.

FLAVIGNY, E., DESRUES, J. & PALAYER, B. 1990. Le sable d'Hostun "RF". *Revue Française de Géotechnique*, 53 : p. 67-70.

FRANCIS, R., CANOU, J. & DUPLA, J. C. 1996. Essais de chargement de micropieux modèles isolés et en groupe en mini chambre d'étalonnage. Rapport interne n° FO/94/14, projet national FOREVER.

GARNICA, P., BOUTRIF, A. & BOULON, M. 1990. Comportement d'interface sol-structure. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux*, p. 233-239, Le Pradet, France.

GOH, A. T. C. & DONALD, I. B. 1984. Investigation of soil- concrete interface behaviour by simple shear apparatus. *Proceedings of the fourth Australia - New Zealand Conference on Geomechanics*, Perth, p. 101-106.

GOURVES, R. & ABRIAK, N. 1991. Micromécanique des milieux granulaires. Etat des possibilités offertes au plan expérimental. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux,* p. 759-763, Aussois, France.

GRUNER, H. E. & HAEFELI, R. 1934. Beitrag zur Untersuchung des physikalischen und statischen Verhaitens Röharenter Böden. Schweiz. Bauztg 103, p. 171-174, 185-188.

GUDEHUS, G. & TEJCHMAN, J. 1988. Behavior of sand particles in sand-steel friction. *Soils and Foundations*, 28 (3) : p.178-182.

HAMMAD, W. 1991. Modélisation non linéaire et étude expérimentale des bandes de cisaillement dans les sables. Thèse de doctorat, Université Joseph Fournier, Grenoble.

HASSAN, A.H. 1995. Etude expérimentale et numérique du comportement local et global d'une interface sol granulaire-structure. Thèse de doctorat, Université Joseph Fournier, Grenoble.

HAWKES, I. & FELLERS, G. E. 1969. Theory of the determination of the greatest principal stress in a biaxial stress field using photoelastic hollow cylinder inclusions. *International Journal of Rock Mechanics Science* 6.

HENKE, R. & HENKE, W. 1986. Method and apparatus for testing soil. United States Patent n° 4594899.

HOTEIT, N. 1990. Contribution à l'étude du comportement d'interface sable-inclusion et application au frottement apparent. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique, Grenoble.

HUCK, P. J. & *al.* 1974. Dynamic Response of Soil-Concrete interfaces at high pressure. Report for Air Force Weapons Laboratories Defense Nuclear Agency.

HVORSLEV, J. 1936. A ring shearing apparatus for the determination of the shearing resistance and plastic flow in soils. *Proceedings of the 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, U.S.A.. 2, p. 125-129.

HVORSLEV, M. J. 1939. Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. *Proceedings of the American Society of Testing Materials*, 39 : p. 999-1022.

JACOBSEN, M. 1976. On pluvial compaction of sand. Report n° 9, Laboratoriet for fundering. University of Aalborg, Danmark.

JEAN, M. 1990. Documentation sur L.M.G.C., Logiciel de Mécanique Gérant le Contact, Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil, Université de Montpellier II.

JEAN, M. & MOREAU, J. J. 1992. Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid bodies collections. *Proceedings of the Contact Mechanics International Symposium*, ed. A. Curnier, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, p. 31-48.

JOER, H., LANIER, J., DESRUES, J. & FLAVIGNY, E. 1992. 1γ2ε, a new shear apparatus to study the behavior of granular materials. *Geotechnical Testing Journal, ASTM,* 15 (2) : p. 31-48.

KELLNER, J. 1983. Appareil d'essai de contraintes de sol. Demande de brevet d'invention n° 83 15641.

KISHIDA, T., FUKAYA, T. & HANZAWA, H. 1986. Development of the friction meter for evaluating the skin friction of a pile. *Soils and Foundations*, 26 (1) : p. 122-128.

KISHIDA, H. & UESUGI, M. 1987. Tests of interface between sand and steel in the simple shear apparatus. *Géotechnique*, 37 (1) : p. 42-52.

KOLBUSZEWSKI, J. J. 1948. An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands. *Proceedings of the 2nd International Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, 2 : p. 158-165.

KULHAWY, F. H. & PETERSON, S. 1979. Behavior of sand-concrete interfaces. *Proceedings of the 6th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Lima, Peru, 2, p. 225-236.

LADANYI, B. & HOYAUX, B. 1969. A study of the trap-door problem in a granular mass. *Revue Canadienne de Géotechnique*, 6 (1) : p. 1-14.

LEE, K. & SEED, H. B. 1967. Drained strengh characteristics of sands. *ASCE, Soil Mechanics and Foundations Division*, p. 117-141.

LERAT, P. & UNTERREINER, P. 1994. A new ring simple shear apparatus for the analysis of the behaviour of interfaces between rigid structures and granular materials. *Proceedings of the 8th European Young Geotechnical Engineers Conference,* Stara Lesna, Slovak Republic, 5-9 September, p. 31-34.

LERAT, P. & YAHIA-AISSA, M. 1995. Etude expérimentale du comportement des interfaces sol granulaire - structure. *2ème réunion annuelle, réseau GEO*, 11-15 Décembre, Aussois, France.

LERAT, P., ZERVOS, A., JEAN, M. & VARDOULAKIS, I. 1995. Déplacement et rotation des grains au sein d'une interface structure - milieu granulaire : résultats expérimentaux et numériques. *2ème réunion annuelle, réseau GEO*, 11-15 Décembre, Aussois, France.

LERAT, P. 1996. Experimental analysis of mobilized friction between a rigid structure and a granular material using ring simple shear tests. *Proceedings of the 49th Canadian Geotechnical Conference*, September 23-25, St. John's, Canada (à paraître).

LERAT, P. & SCHLOSSER, F. 1996. Mesure du comportement d'interface à l'appareil de cisaillement simple annulaire. *11ème Colloque franco-polonais en mécanique des sols et des roches appliquée*, 7-10 septembre 1996, Gdansk, Pologne (à paraître).

LERAT, P., UNTERREINER, P. & SCHLOSSER, F. 1996. Experimental analysis of mobilized friction between sand and reinforcing element using ring simple shear tests. *International Symposium on Earth Reinforcement (IS Kyushu '96),* November 12-14, Fukuoka, Japan (à paraître).

LERAT, P., CANOU, J., RUSSELLO, M., VIRION, J. & FRANCIS, R. 1996. Etude des interfaces sol granulaire - structure sous sollicitation cyclique. *3ème réunion annuelle, réseau GEO*, 9-13 Décembre, Aussois (à paraître).

LERAT, P., BOULON, M. & SCHLOSSER, F. 1997. Interaction sol - structure : étude rhéologique de l'interface. *Revue Française de Génie Civil* (soumis pour publication).

LERAT, P., CANOU, J., RUSSELLO, M. & VIRION, J. 1997. Soil-structure interface behaviour under cyclic loading. *Ninth International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, November 2 - 7, 1997; Wuhan, China (accepté pour publication).

LERAT, P., SCHLOSSER, F., UNTERREINER, P. & VARDOULAKIS, I. 1997. Nouvel appareil de cisaillement annulaire pour l'étude des interfaces matériau granulaire - structure. *14ème Conférence Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations*, 6-12 Septembre, Hambourg, Allemagne (accepté pour publication).

LEVACHER, D., GARNIER, J. & CHAMBON, P. 1994. Reconstitution d'éprouvettes de sable. Appareils de pluviation. *Revue Francaise de Géotechnique*, 68, p.49-56.

LÖFFELMANN, G. 1989. Theorische und experimetelle Untersuchungen zur Schüttgut-Wand - Wechslwirkung von Granulaten. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Karlsruhe.

LUTENEGGER, A. J., REMMES, B. D. & HANDY, R. L. 1978. Borehole shear test for stiff soil. *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, 104 (GT11) : p. 1403-1407.

LUTENEGGER, A. J. & HALLBERG, G. R. 1981. Borehole Shear Test in Geotechnical Investigations. Laboratory Shear Strength of Soil, *ASTM STP 740* : p. 566-578.

LUTENEGGER, A. J. 1987. Suggested method for performing the borehole shear test. *Geotechnical Testing Journal*, 10 (1) : p. 19-25.

LUTENEGGER, A. J. & TIMIAN, D. A. 1987. Reproductibility of borehole shear test results in marine clay. *Geotechnical Testing Journal*, 10 (1) : p. 13-18.

MANDL, G., DE JONG, L. N. & MALTHA, A. 1977. Shear zones in granular material. *Rock Mechanics*, 9 : p. 95-144.

MEMIER, B. 1980. Contribution à l'étude des capteurs de pression totale dans les sols. Thèse de doctorat, INSA de Lyon.

MENZIES, B. 1988. A computer controlled hydraulic triaxial testing system. *ASTM Symposium on Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock.*

MOHAN, D. & CHANDRA, S. 1961. Frictional resistance of bored piles in expansive clays. *Géotechnique,* 11 (4), p. 294-301.

MOKRANI, L. 1991. Simulation physique du comportement des pieux à grande profondeur en chambre de calibration. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble.

MUHLHAUS, H. B. 1987. Berücksichtigung von Inhomogenitäten im Gebirge im Rahmen einer Kontinuumstheorie ; Habilitationsschrift. Institut fur Boden und Felsmechanik der Univeristät Karlsruhe.

PAIKOWSKY, S. G., PLAYER, C. M. & CONNORS, P. J. 1995. A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces. *Geotechnical Testing Journal,* 18 (2), p. 168-193.

PECKER, A. 1984. Dynamique des sols. Presses des Ponts et Chaussées. 259 p.

PHILIPPONNAT, G. 1986. Le phicomètre : essai de cisaillement in situ. *Revue Française de Géotechnique*, 35 : p. 49-65.

PHILIPPONNAT, G. & ZERHOUNI, M. 1991. L'apport de l'essai au phicomètre pour la détermination du forttement latéral des pieux. *Comptes rendus du colloque international Fondations Profondes,* Paris, Presses de l'ENPC, p. 267-275.

PHILIPPONNAT, G. & ZERHOUNI, M. 1993. Interprétation de l'essai au phicomètre. *Revue Française de Géotechnique*, 65, p. 3-28.

PLUMELLE, C. 1979. Etude expérimentale du comportement des tirants d'ancrage. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

PLYTAS. C. 1985. Contribution à l'étude expérimentale et numérique des interfaces sol granulaire-structure. Application à la prévision du frottement latéral des pieux. Thèse de docteur - ingénieur, Institut National Polytechnique, Grenoble.

POTYONDY, J. G. 1961. Skin friction between various soils and construction materials. *Geotechnique International Journal of Soil Mechanics,* 11 (4) : p. 339-353

POULOS, H. G. & DAVIS, E. H. 1990. Pile foundation analysis and design. Robert E. Griger Publishing Company, Malibar, Florida.

RAD, N. S. & TUMAY, M. T. 1987. Factors affecting sand specimen preparation by raining. *Geotechnical Testing Journal,* 10(1) : p. 31-37.

REYNOLDS, O. 1885. On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. *Philosophia magazine* (5), p. 20-46.

REZAIE, F. 1994. Etude expérimentale et modélisation du comportement de l'interface sols-structures sous chargements monotone et cyclique. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies, Lille.

ROSCOE, K. H. 1970. The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*, 20(2) : p. 129-170

ROWE, P. W. 1962. The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact. *Proceedings of the British Royal Society*, 269 : p. 500-527.

SCARPELLI, G., & WOOD, D. M. 1982. Experimental observation of shear band pattens in direct shear tests. *IUTAM Conference on deformation and failure of granular*, p 473-484.

SCHLOSSER, F. & ELIAS, V. 1978. Friction in reinforced earth. *Proceedings of the International Symposium of Earth Reinforcement,* Pittsburgh, U.S.A.

SCHLOSSER, F. & GUILLOUX, A. 1981. Le frottement dans le renforcement des sols. *Revue Française de Géotechnique*, 16 : p. 65-77.

SCHLOSSER, F., LERAT, P., UNTERREINER, P., SULEM, J., VARDOULAKIS, I., DOUGALIS, V., ANTONOPOULOS, D., ZERVOS, A., BOULON, M. & HASSAN, H.

1995. Experimental, theoretical and numerical modelling of soil-structure interfaces. Final report, Science Project n°SC1*CT91-0659.

SCHNEEBELI, G. 1957. Une analogie mécanique pour l'étude de la stabilité des ouvrages en terre à deux dimensions. *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Londres, 2 : p. 228-232.

SEED, H. B. & LEE, K. L. 1966. Liquefaction of saturated sands during cyclic loading. *ASCE Soil Mechanics and Foundations Division*, p. 105-134.

SHAHROUR, I., BENCHEIKH, B. & REZAIE, F. 1992. Etude du comportement cyclique de l'interface sols-structures. *Rapport scientifique, GRECO Rhéologie des géomatériaux,* p. 243-248.

SIKA, produits minéraux siliceux du sud-est. Analyse des propriétés physico-chimiques et granulométriques du sable RF et du sable 14~10. Notes internes, société SIKA, Hostun, France.

SWEENEY, B. P. & CLOUGH, G. W. 1990. Design of a large calibration chamber. *Geotechnical Testing Journal,* 13 (1) : p. 36-44.

TABUCANON, J. T. & AIREY, D. W. 1992. Interface tests to investigate pile skin friction in sands. Research Report n°R662, University of Sydney.

TABUCANON, J. T., AIREY D. W., & POULOS H. G. 1995. Pile skin Friction in sands form constant normal stiffness tests. *Geotechnical Testing Journal,* 18 (3), p. 350-364.

TEJCHMAN, J. & WU, W. 1995. Experimental and numerical study of sand-steel interfaces. *International Journal for Numerical Methods in Geomechanics*, 19, p. 513-536.

TIEDEMANN, B. 1937. Uber die Schubfestigheit bindiger Böden. Bautechnik 15, N°s 30 and 33, p. 400-403, 433-435.

TIKA-VASSILIKOS, T. 1991. Clay-on-steel ring shear tests and their implications for displacement piles. *Geotechnical Testing Journal,* 14 (4) : p. 457-463.

UESUGI, M. & KISHIDA, H. 1986 a. Influential factors of friction between steel and dry sands. *Soils and Foundations*, 26 (2) : p. 33-46.

UESUGI, M. & KISHIDA, H. 1986 b. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel. *Soils and Foundations*, 26 (4) : p. 139-149.

UESUGI, M., KISHIDA, H. & TSUBAKIHARA, Y. 1988. Behavior of sand particles in sand-steel friction. *Soils and Foundations*, 28 (1) : p. 107-118.

UESUGI, M., KISHIDA, H. & TSUBAKIHARA, Y. 1989. Friction between sand and steel under repeated loading. *Soils and Foundations*, 29 (3) : p. 127-137.

UNTERREINER, P. 1994. Contribution à l'étude et à la modélisation numérique des sols cloués : application au calcul en déformation des ouvrages de soutènement. Thèse de doctorat, ENPC. Paris.

VALIN, M. 1985. Etude expérimentale des interfaces sols-pieux ; essais de cisaillement direct à rigidité normale imposée. DEA de Mécanique, Grenoble.

VARDOULAKIS, I. 1977. Scherfugenbildung in Sandkörpern als Verzweigungsproblem. Dissertation, Universität Karlsruhe, Veröffentlichungen IBF, Heft N° 70.

VARDOULAKIS, I. & GRAF, B. 1985. Calibration of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments. *Géotechnique*, 35, p. 299-317.

VARDOULAKIS, I., ZERVOS, A., JEAN, M. & LERAT, P. 1996. Microkinematics of shear interfaces in granular media. *EUROMECH Colloquium 347 - Stability and bifurcation in Solid Mechanics*, May 13-15, Paris, France.

WERNICK, E. 1978 a. Skin friction of cylindrical anchors in non-cohesive soils. *Symposium on soil reinforcing and stabilising techniques*, Sydney, Australia, p. 201-219.

WERNICK, E. 1978 b. Stresses and strains on surface of anchors. *Revue Française de Géotechnique*, 3 : p. 113-119.

YAHIA-AISSA, M. 1995. Etude expérimentale du comportement des interfaces sol granulaire - structure, mémoire du stage de D.E.A. Mécanique des structures et des

Ouvrages dans leur Environnement, E.C.P., Université Paris VI, E.N.P.C., ENSMP, Ecole Polytechnique.

YAHIA-AISSA, M. & LERAT, P. 1996. Etude rhéologique des interfaces sol granulaire - structure avec l'appareil de cisaillement simple annulaire. *1er Congrés Maghrébin de Mécanique, CMM'96*, 23-26 Mars, Ghardaïa, Algérie, 2 : p 188 - 190.

YANG, Y. 1992. Mesure du champ de déplacement des matériaux sous charge mécanique par analyse des images. Thèse de doctorat, ENPC, Paris

YOSHIMI, Y. & OH-OKA, H. 1973. A ring torsion apparatus for simple shear tests. *Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscou, 1 : p. 501-506.

YOSHIMI, Y. & KISHIDA, T. 1981 a. A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surfaces. *Geotechnical Testing Journal*, 4(4) : p. 145-152.

YOSHIMI, Y. & KISHIDA, T. 1981 b. Friction between sand and metal surface. *Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, 1 : p. 831- 834.

ZERVOS, A. 1995. Micropolar properties of two-dimensional discrete media. Mémoire de fin d'études, NTU Athènes, Grèce.

ZERVOS, A., VARDOULAKIS, I., JEAN, M. & LERAT, P. 1997. Numerical investigation of granular interfaces kinematics. *Journal of cohesive - frictional materials* (soumis pour publication).

ZONG-ZE, Y., HONG, Z. & GUO-HUA, X. 1995. A study of deformation in the interface between soil and concrete. *Computers and Geotechnics*, 17 : p. 75-92.

ANNEXES

Annexe A : ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE SABLE D'HOSTUN RF.....A-1

Annexe B : ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 ..... B-10

Annexe C : ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE SABLE D'HOSTUN RF : INFLUENCE DE LA DENSITE.....C-22

Annexe D : ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE SABLE D'HOSTUN RF : INFLUENCE DE LA RUGOSITE.....D-29

Annexe E : ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 : INFLUENCE DE LA DENSITE.....E-35

Annexe F : ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 : INFLUENCE DE LA RUGOSITE.....F-43

Annexe A ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE SABLE D'HOSTUN RF

Figure A-1. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,86, σ_{r0} = 50 kPa (essai 1604-43)* A-2

Figure A-2. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,97, σ_{r0} =100 kPa (essai 1205-18)* A-3

Figure A-3. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,82, σ_{r0} = 400 kPa (essai 1905-20)* A-4

Figure A-4. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id = 0,80, σ_{r0} = 50 kPa (essai 1904-45)*.....A-5

Figure A-5. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id =0,88, σ_{r0} = 100 kPa (essai 2407-36)*.....A-6

Figure A-6. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id = 0,92, σ_{r0} = 400 kPa (essai 2405-23)*.....A-7

Figure A-7. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,37, σ_{r0} = 200 kPa (essai 2107-35)* A-8

Figure A-8. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,90, σ_{r0} = 200 kPa (essai 2607-38)* A-9

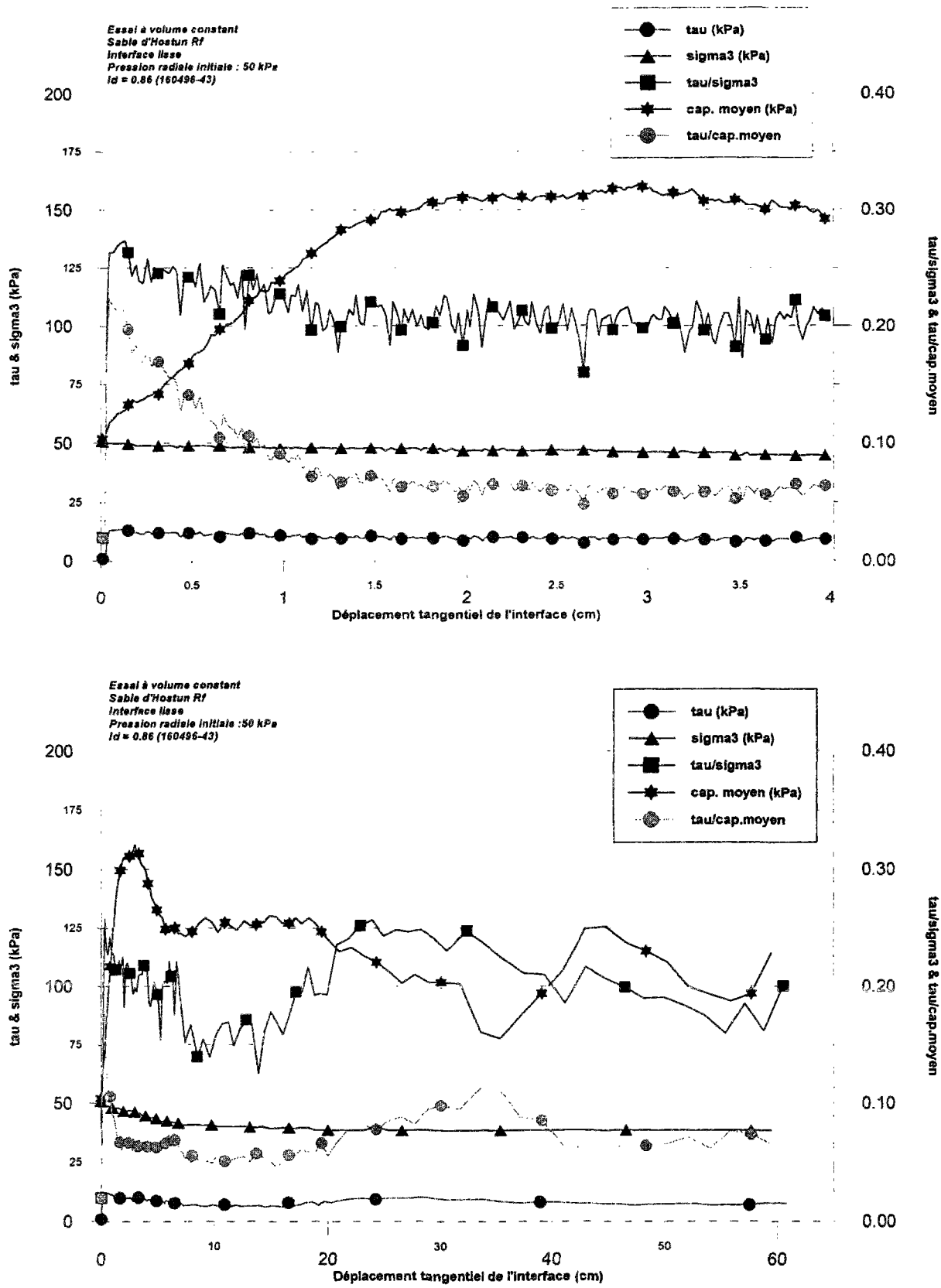


Figure A-1. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,86, σ_{r0} = 50 kPa (essai 1604-43)*

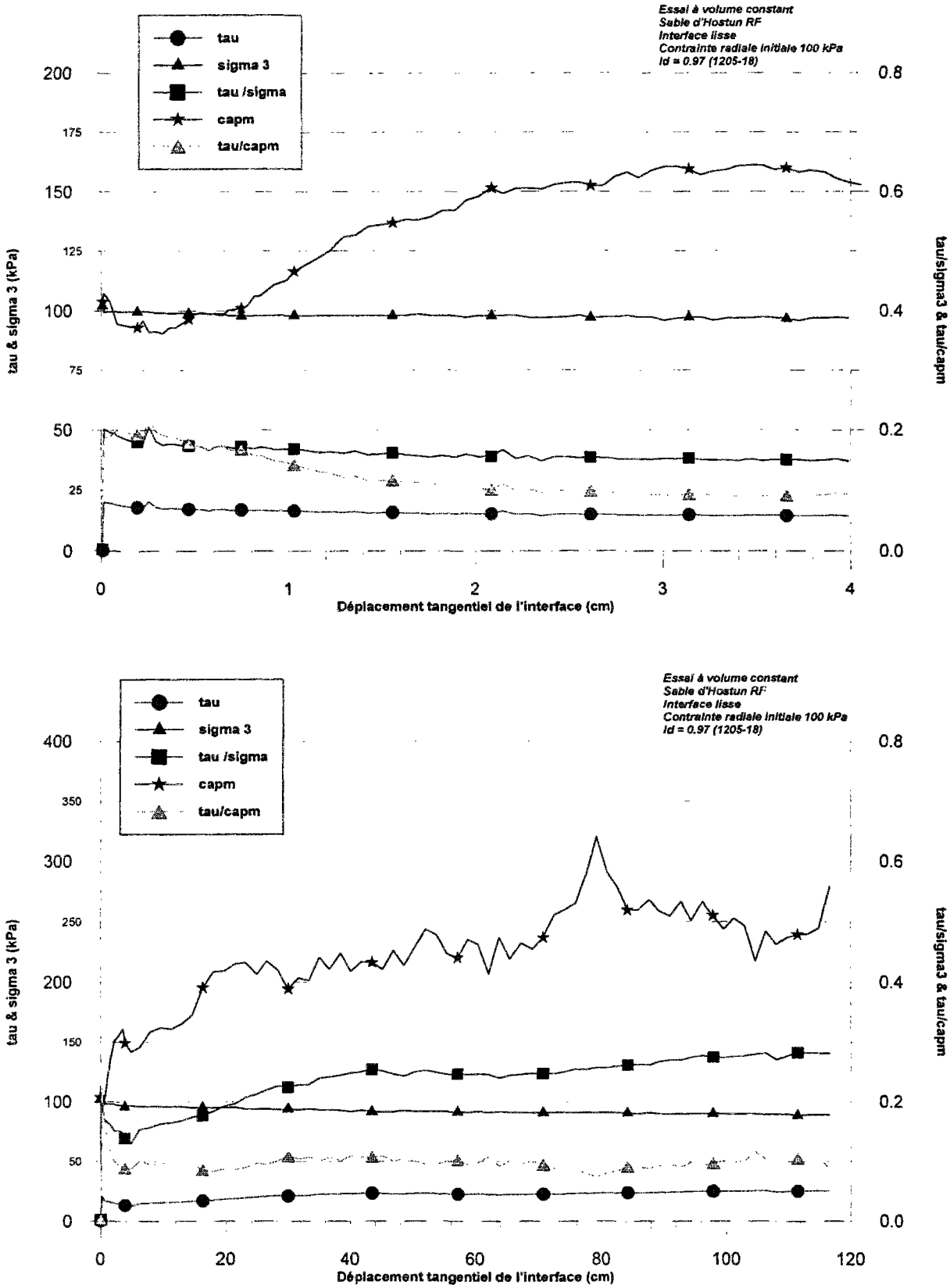


Figure A-2. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,97, σ_{r0} =100 kPa (essai 1205-18)*

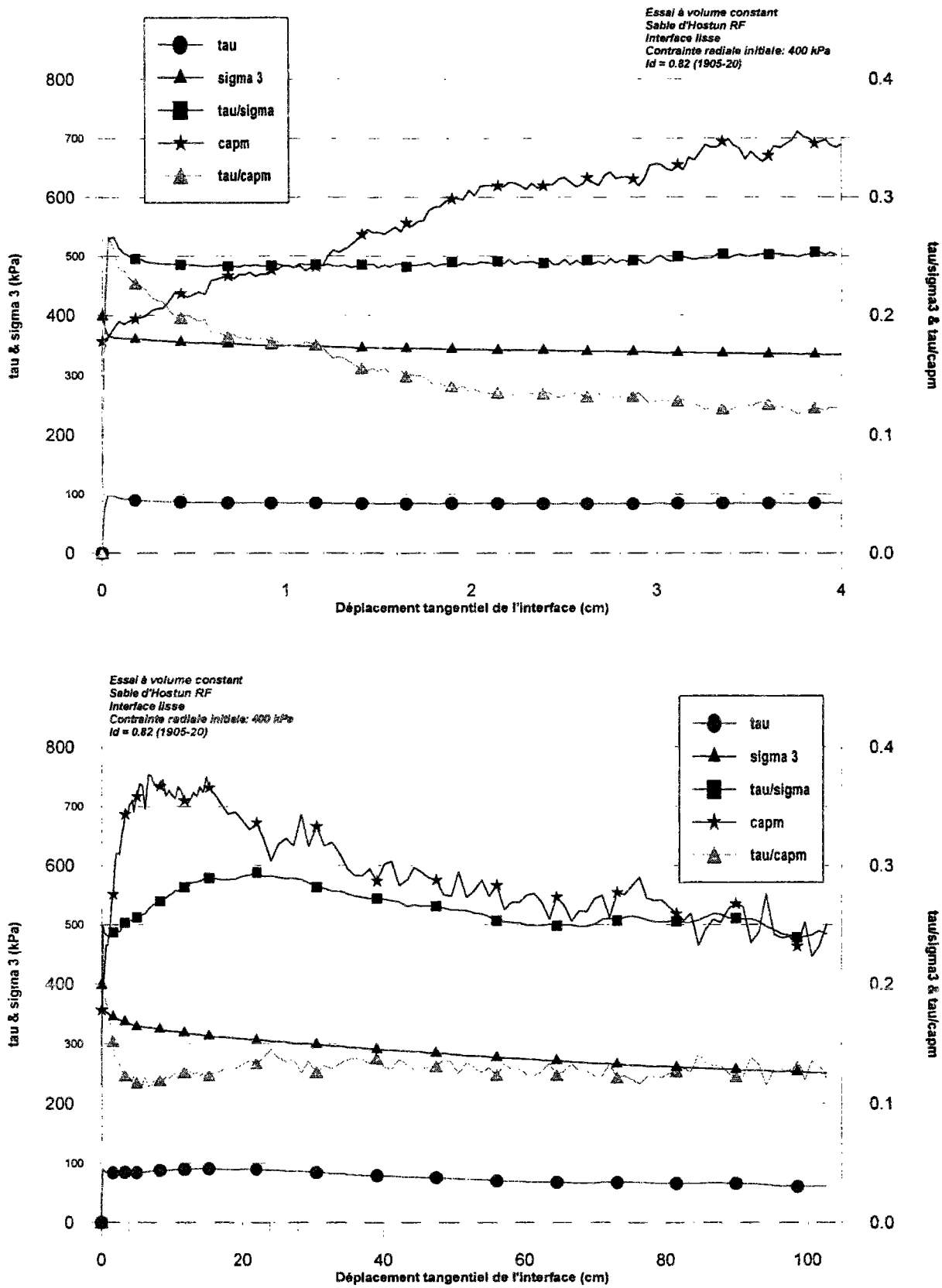


Figure A-3. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,82, σ_{r0} = 400 kPa (essai 1905-20)*

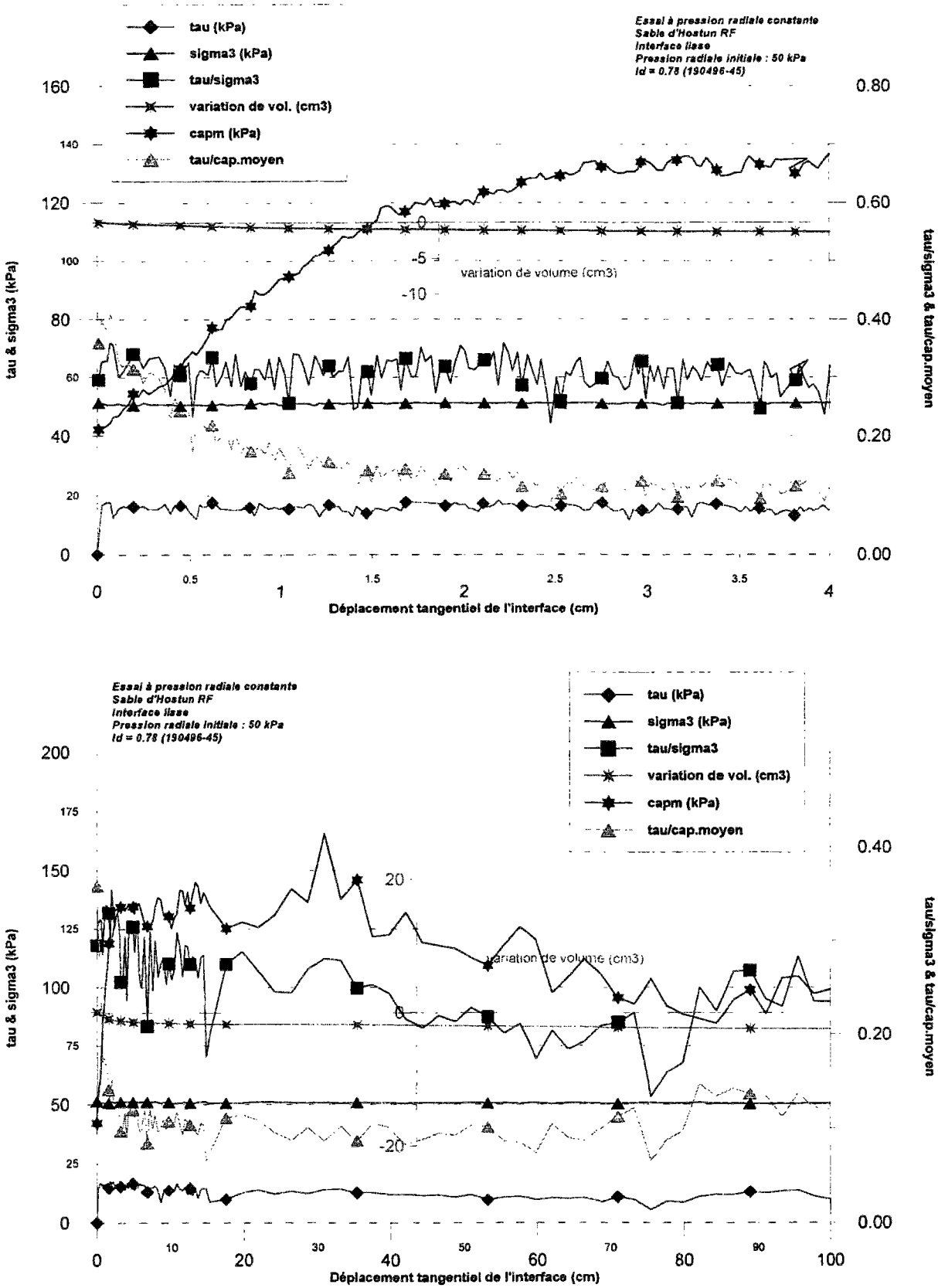


Figure A-4. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id = 0,80, σ_{r0} = 50 kPa (essai 1904-45)*

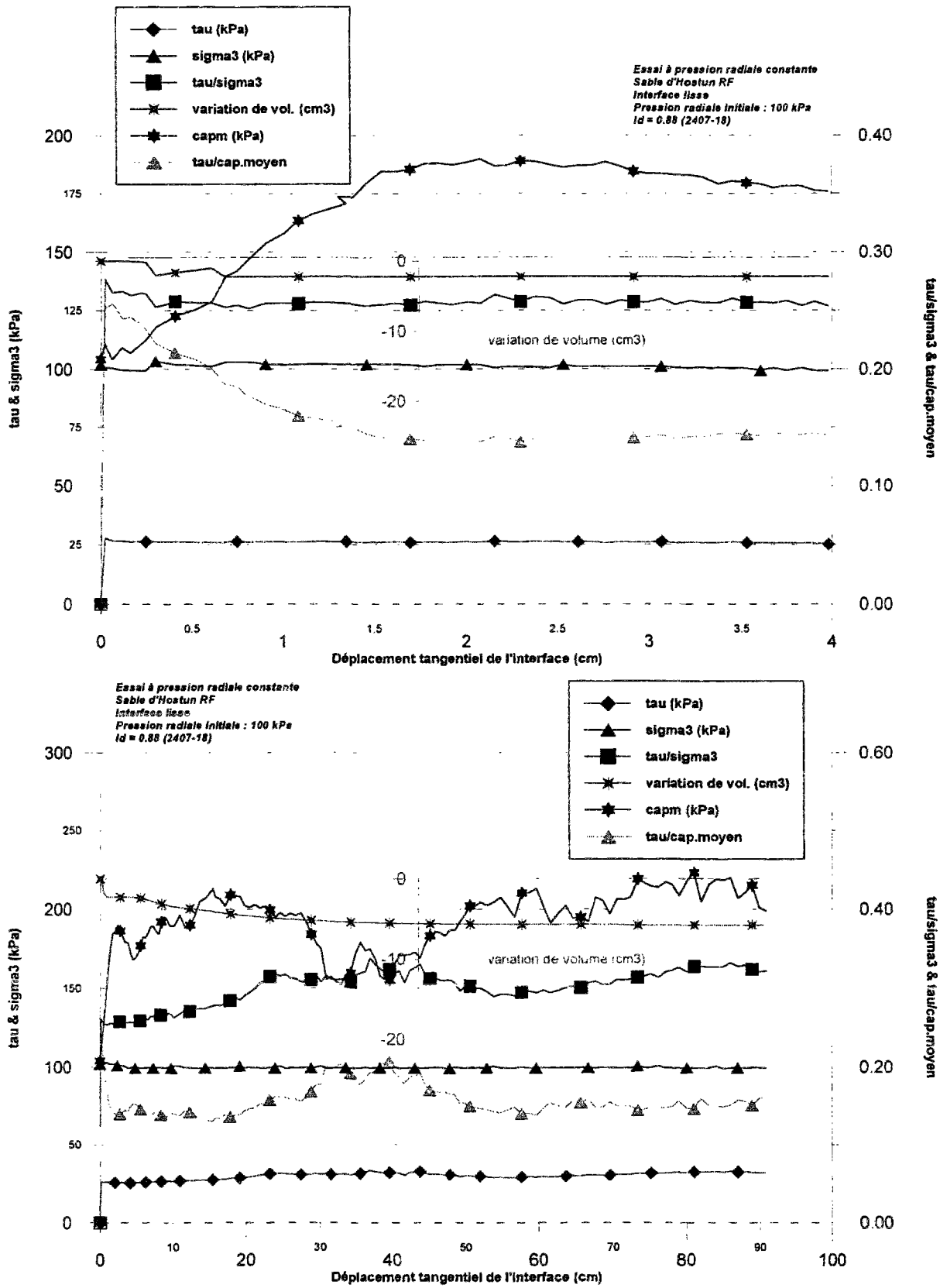


Figure A-5. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id =0,88, σ_{r0} = 100 kPa (essai 2407-36)*

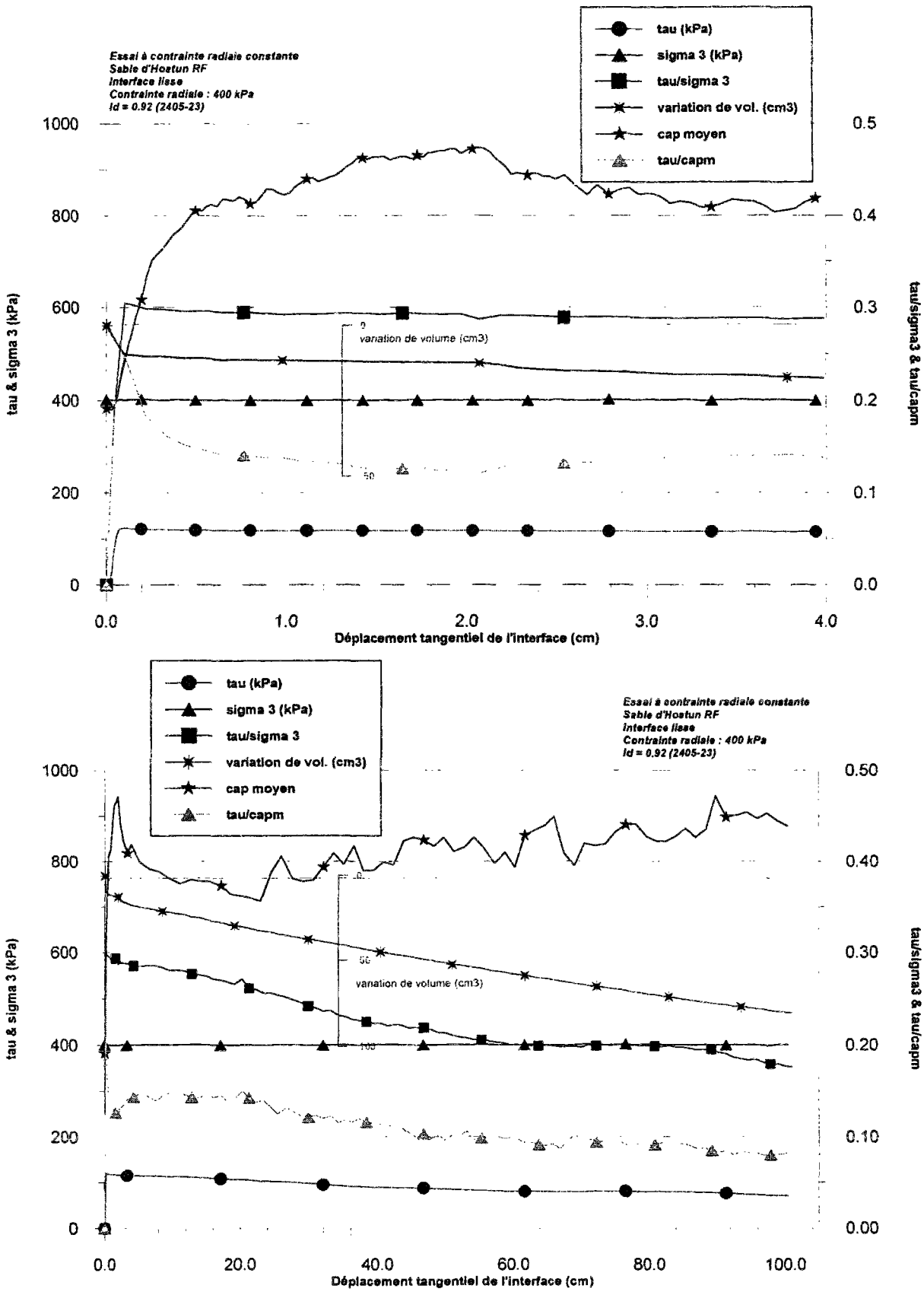


Figure A-6. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, pression radiale constante, Id = 0,92, σ_{r0} = 400 kPa (essai 2405-23)*

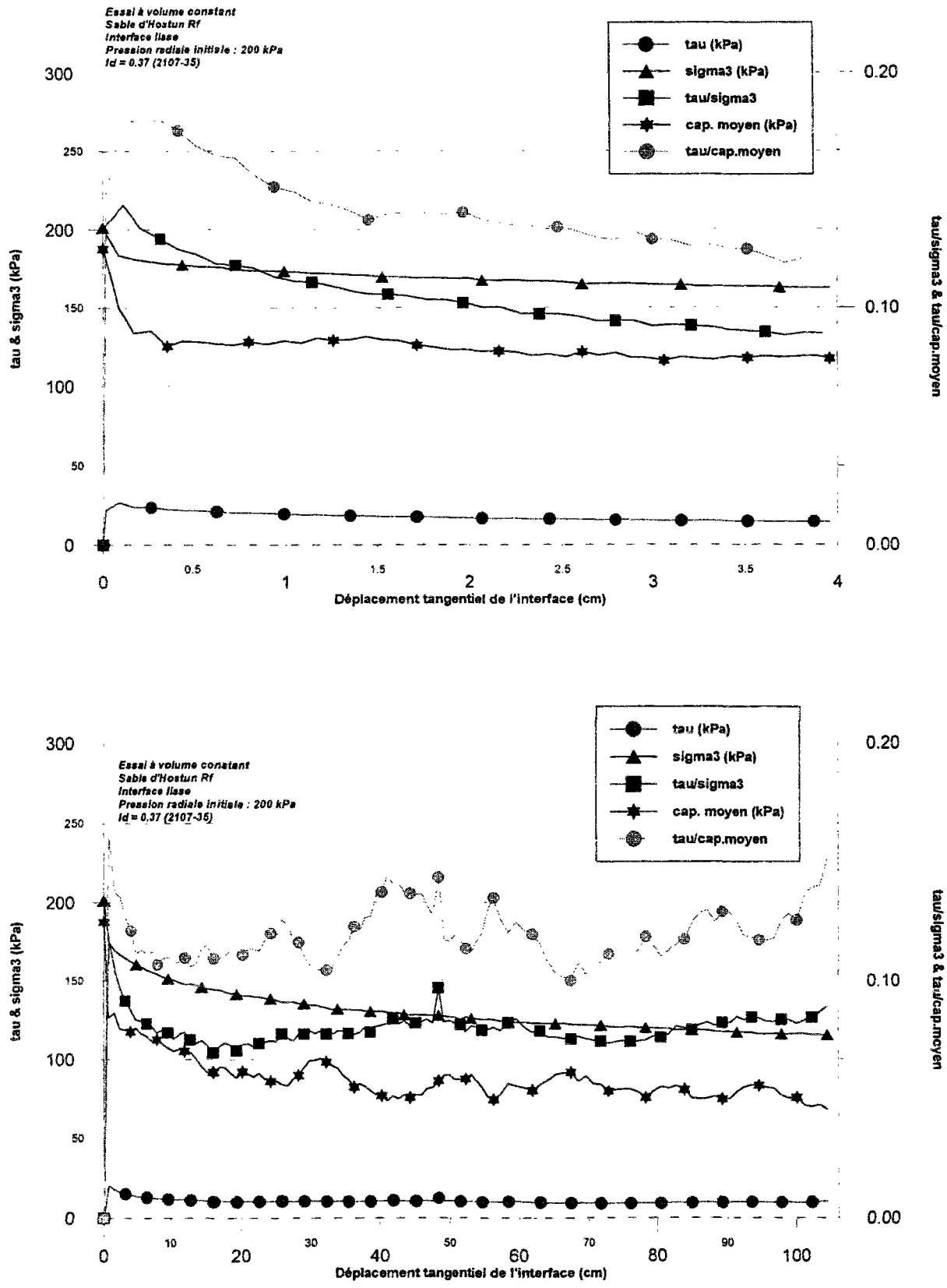


Figure A-7. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur sable d'Hostun RF : interface lisse, volume constant, Id = 0,37, σ_{r0} = 200 kPa (essai 2107-35)*

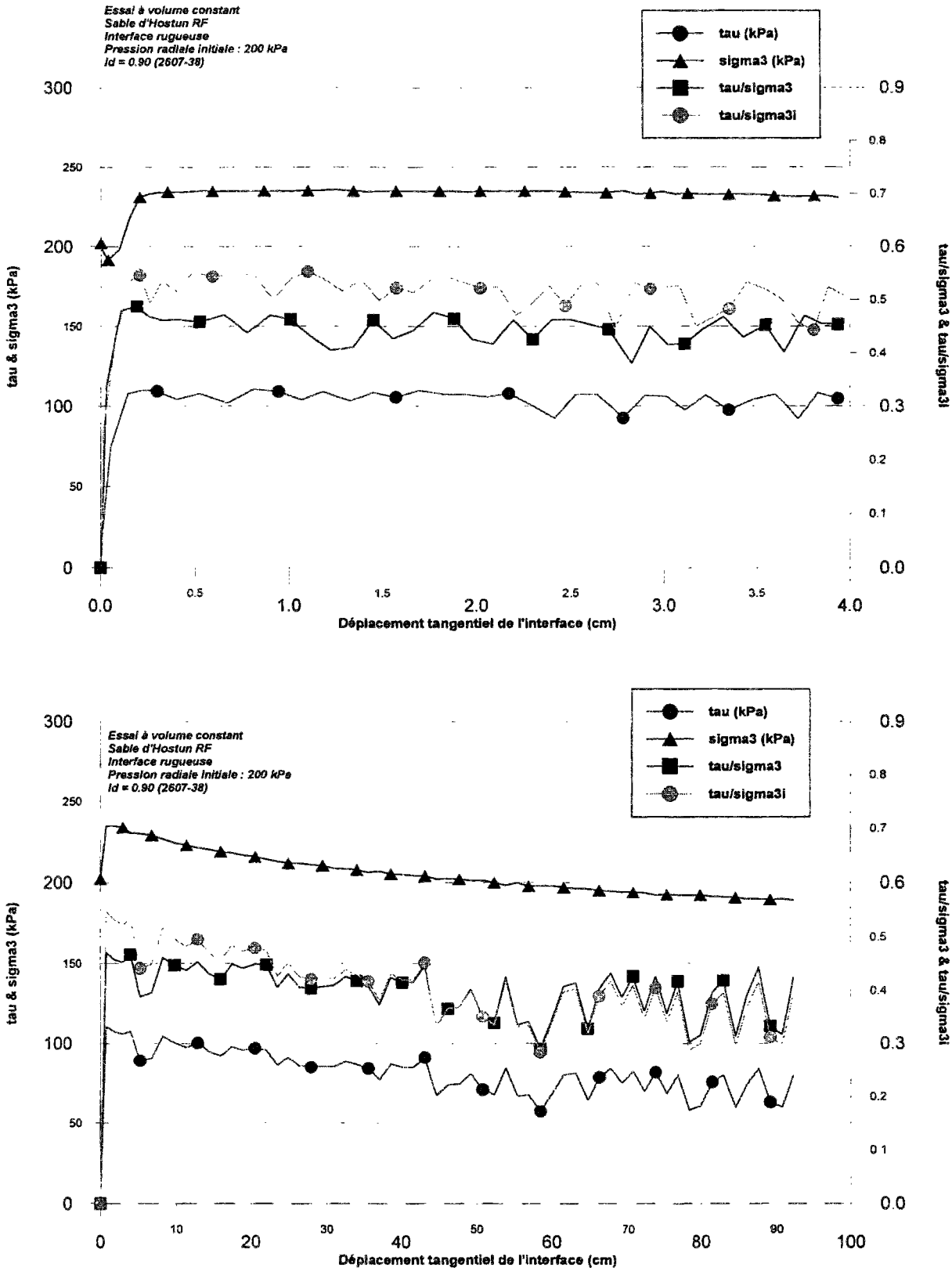


Figure A-8. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,90, σ_{r0} = 200 kPa (essai 2607-38)*

Annexe B ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10

Figure B-1. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,65, σ_{r0} = 50 kPa (essai 0904-40)* B-11

Figure B-2. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,57, σ_{r0} =100 kPa (essai 2804-16)* B-12

Figure B-3. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,60, σ_{r0} = 400 kPa (essai 0404-8)* B-13

Figure B-4. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,60, σ_{r0} = 600 kPa (essai 1204-9)* B-14

Figure B-5. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,66, σ_{r0} = 50 kPa (essai 1504-42)*....B-15

Figure B-6. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id =0,70, σ_{r0} = 100 kPa (essai 2604-15)*...B-16

Figure B-7. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,72, σ_{r0} = 400 kPa (essai 2404-13)*..B-17

Figure B-8. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,54, σ_{r0} = 600 kPa (essai 0405-17)*..B-18

Figure B-9. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,27, σ_{r0} = 200 kPa (essai 1307-31)*..B-19

Figure B-10. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,33, σ_{r0} = 200 kPa (essai 1207-30)* B-20

Figure B-11. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface lisse, volume constant, Id = 0,64, σ_{r0} = 200 kPa (essai 2007-34)*.....B-21

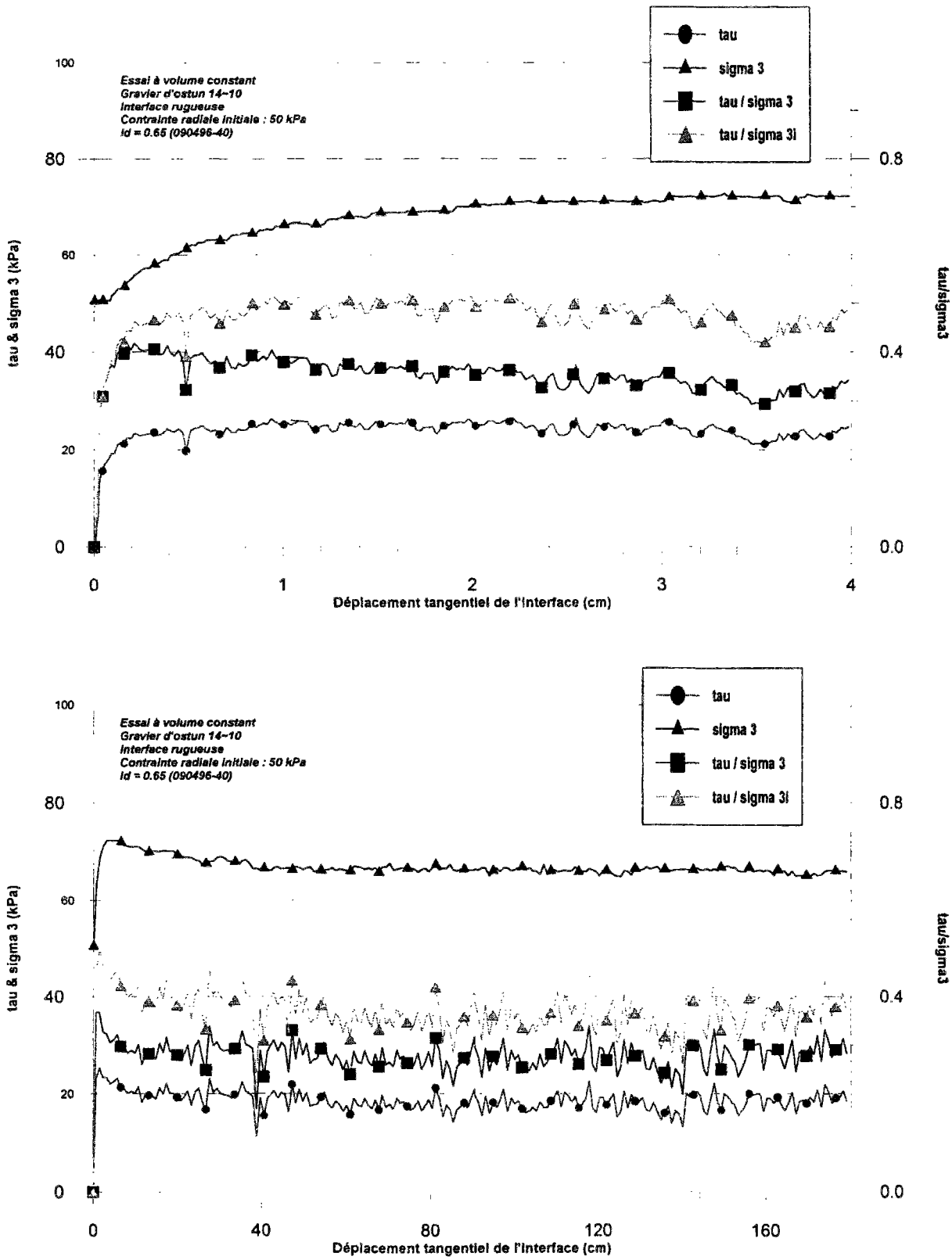


Figure B-1. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,65, σ_{r0} = 50 kPa (essai 0904-40)*

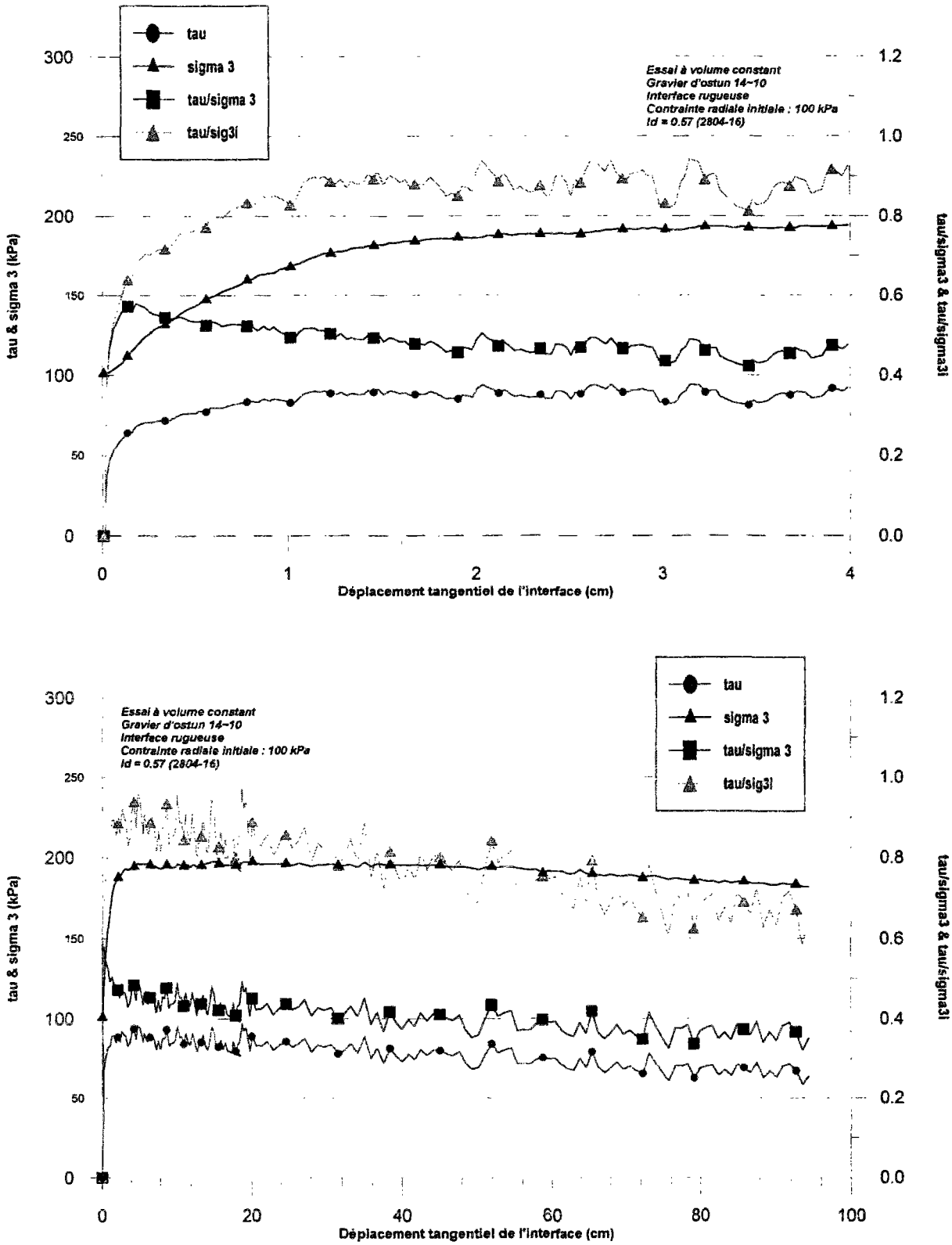


Figure B-2. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,57, σ_{r0} =100 kPa (essai 2804-16)*

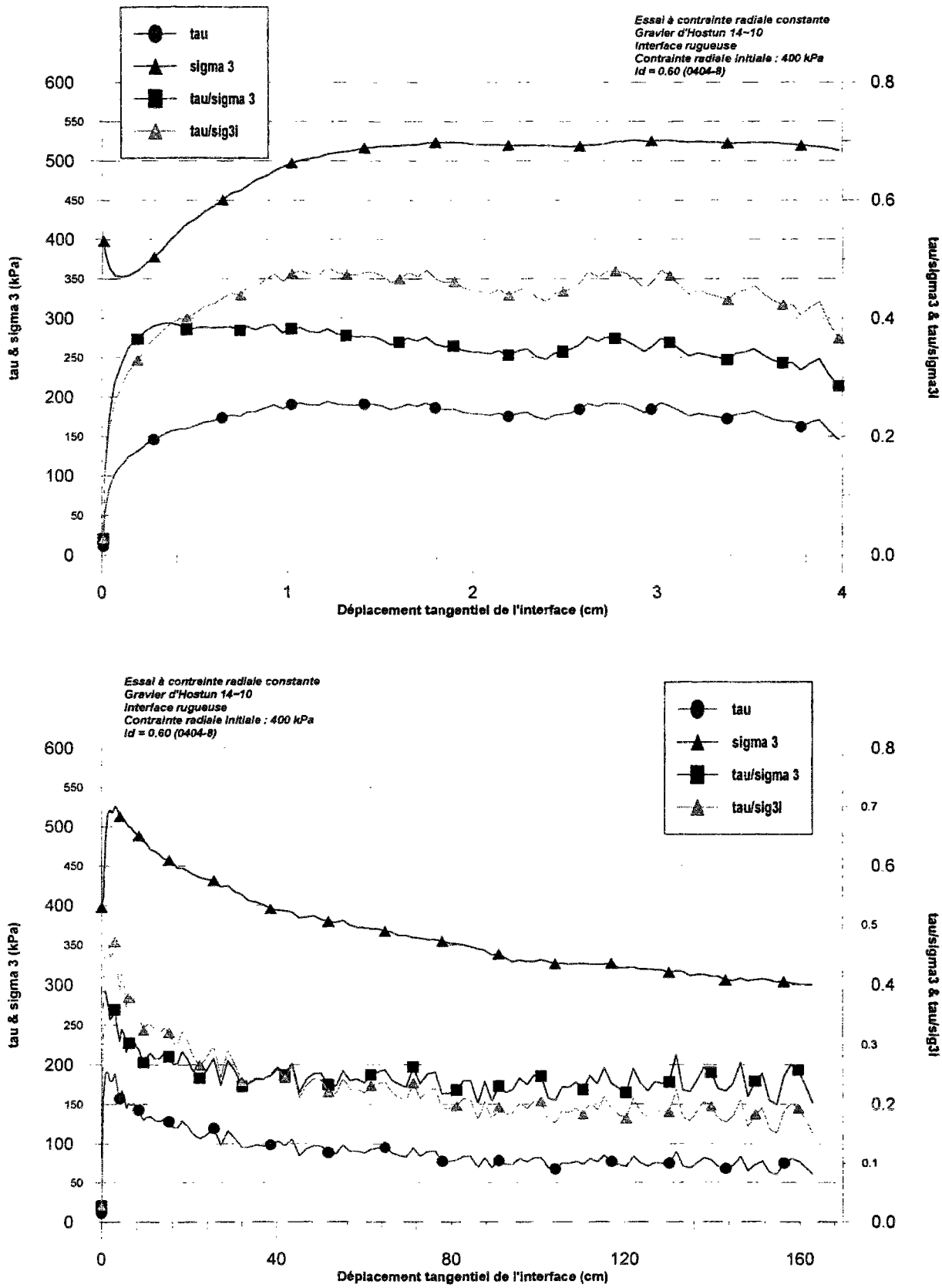


Figure B-3. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,60, σ_{r0} = 400 kPa (essai 0404-8)*

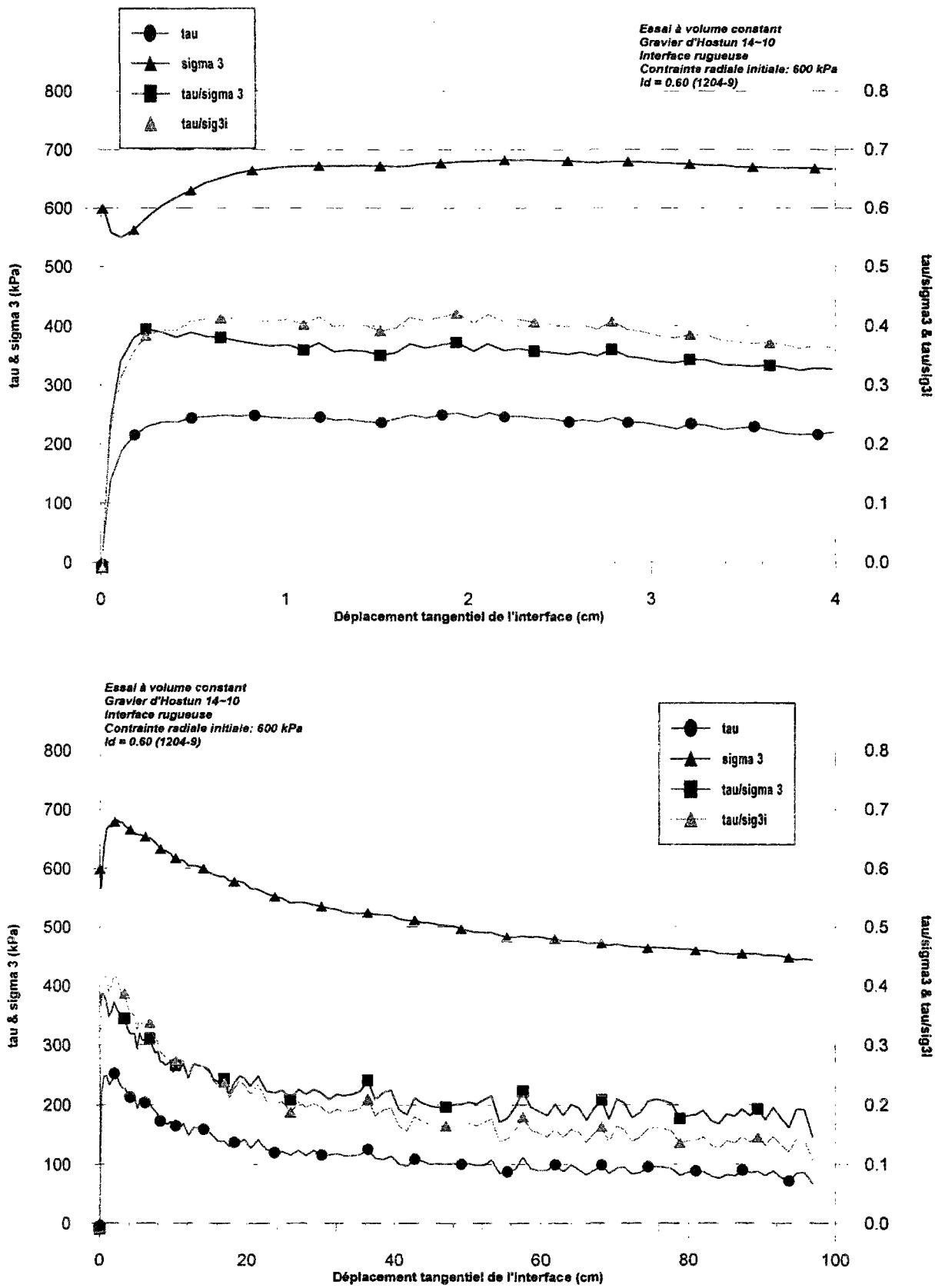


Figure B-4. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,60, σ_{r0} = 600 kPa (essai 1204-9)*

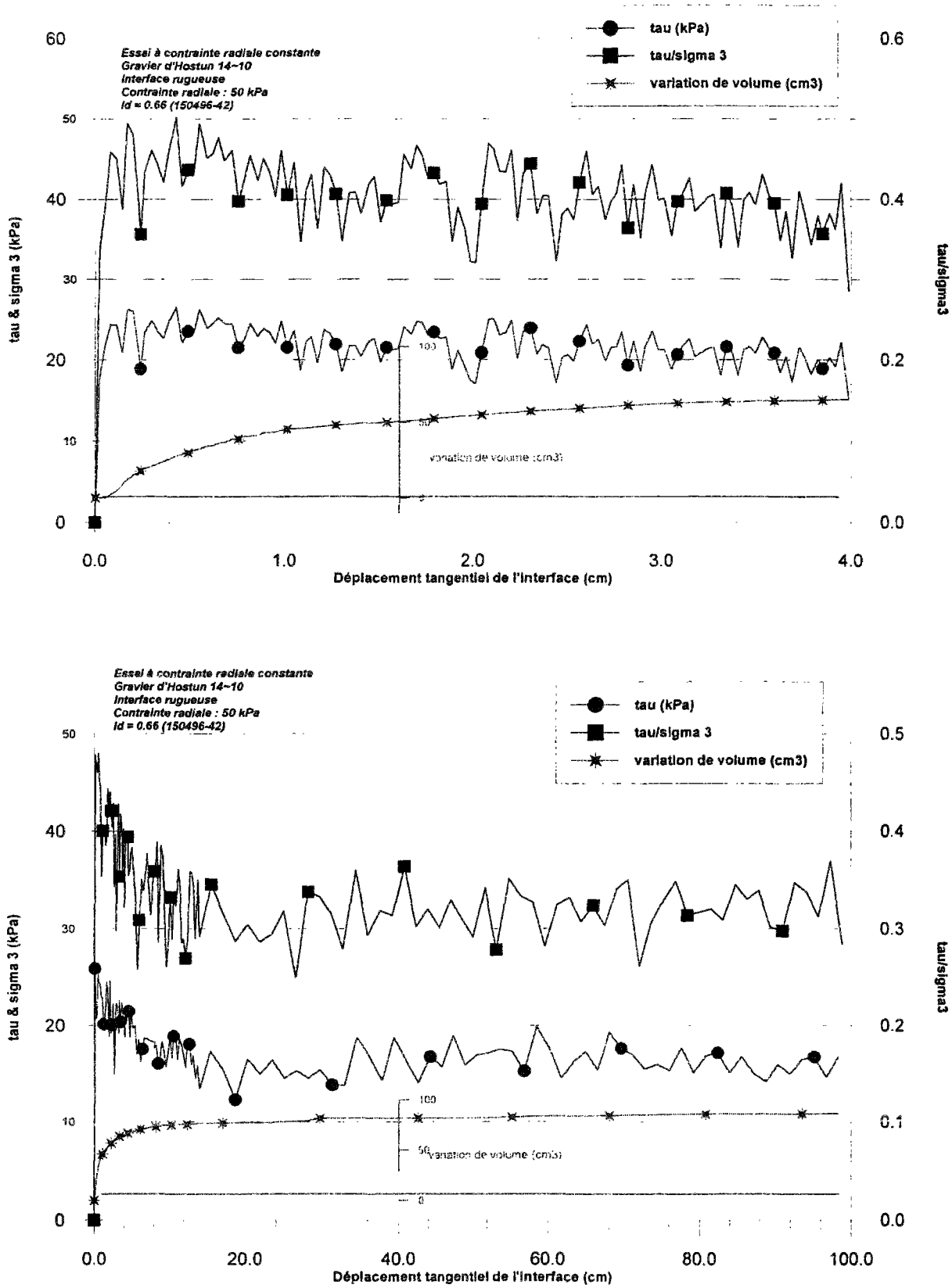


Figure B-5. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,66, σ_{r0} = 50 kPa (essai 1504-42)*

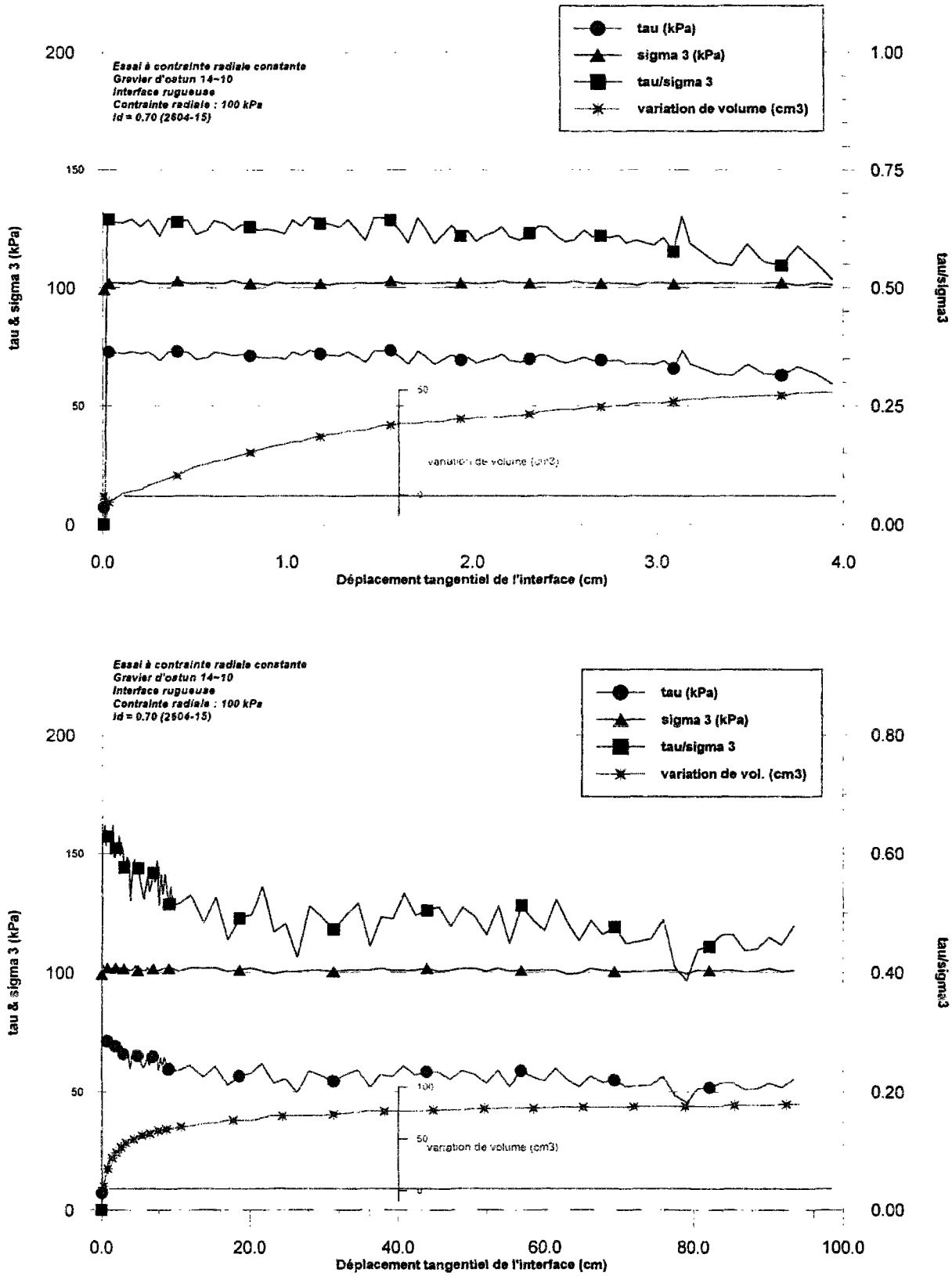


Figure B-6. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id =0,70, σ_{r0} = 100 kPa (essai 2604-15)*

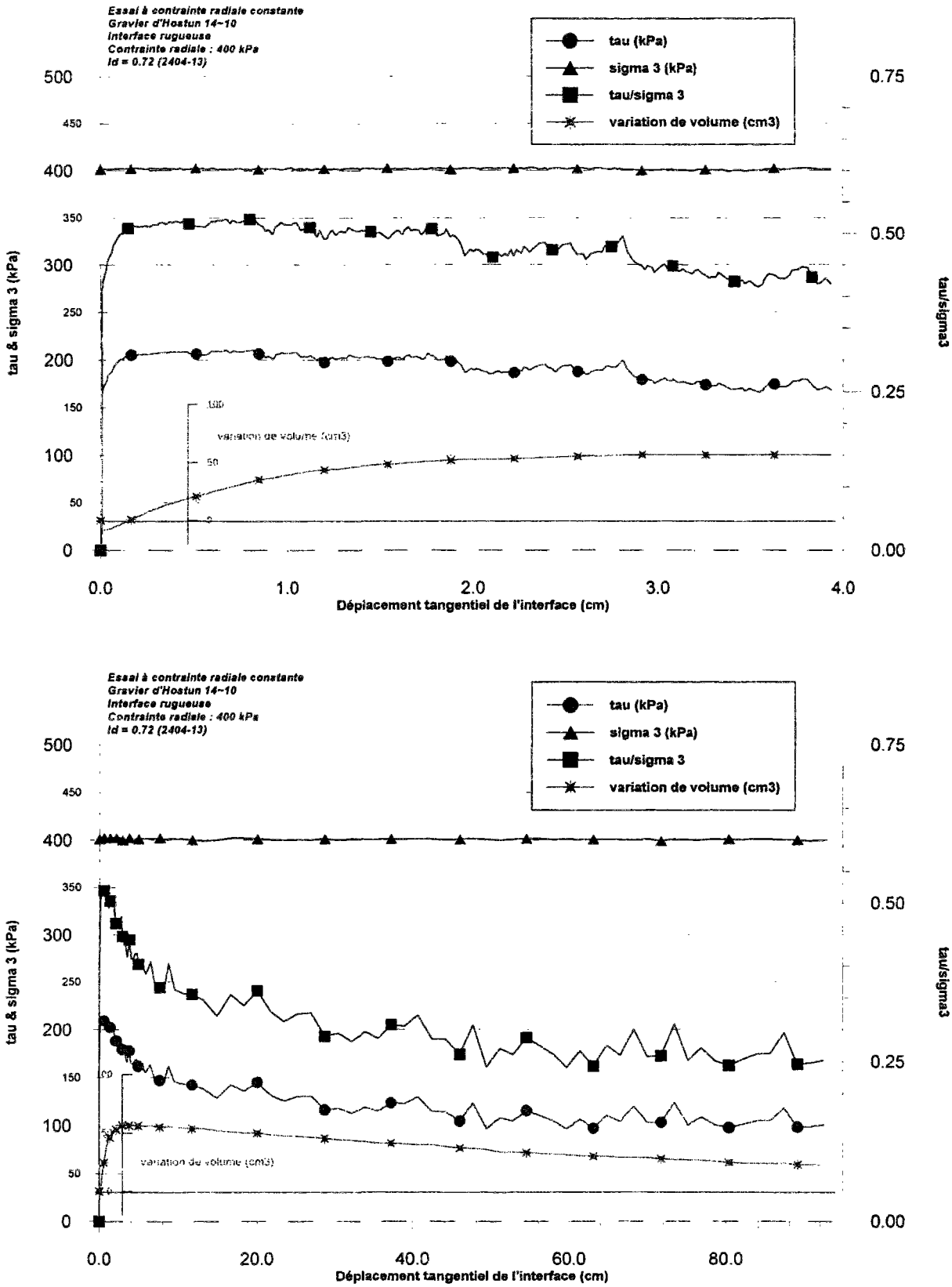


Figure B-7. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,72, σ_{r0} = 400 kPa (essai 2404-13)*

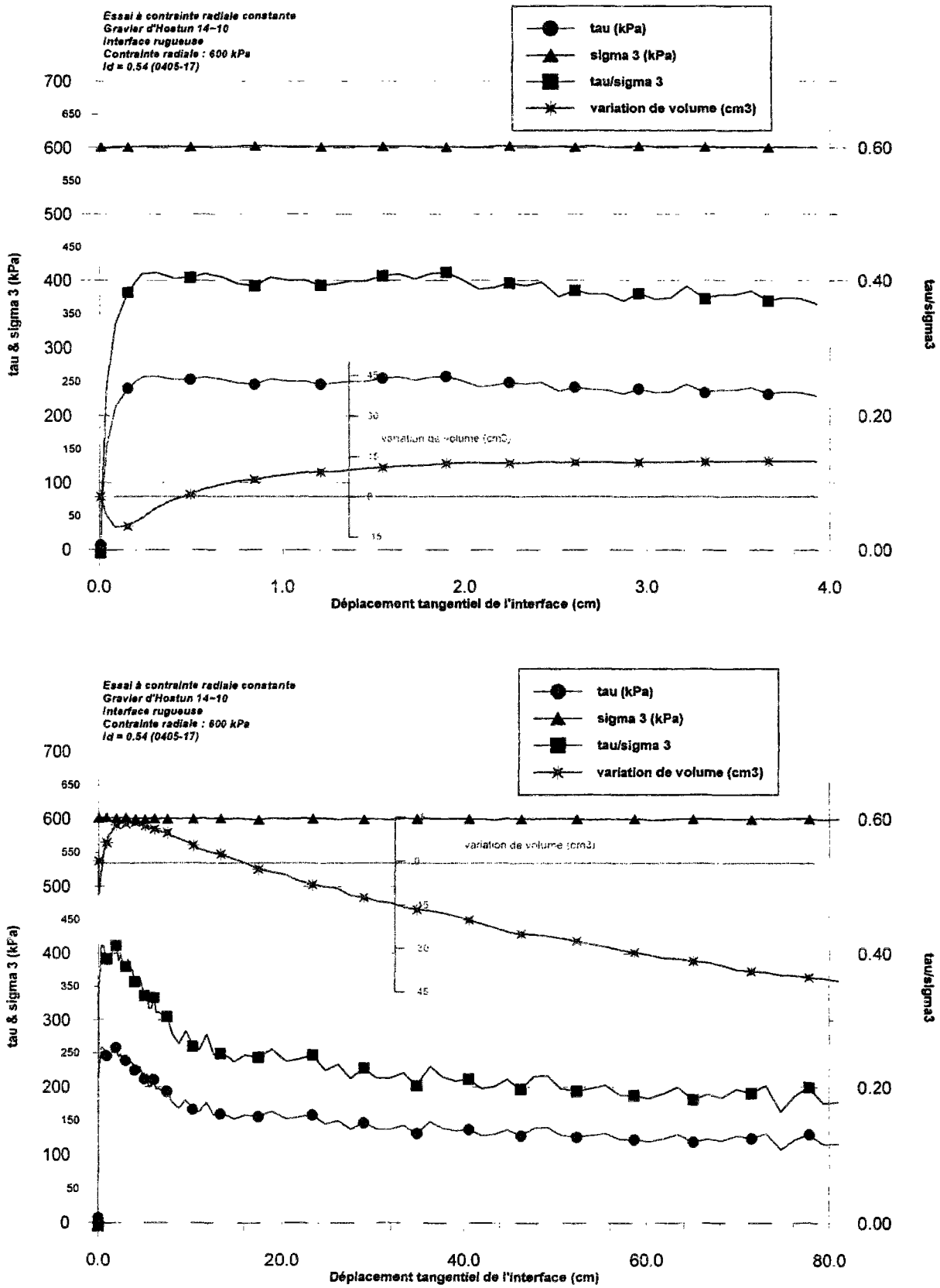


Figure B-8. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,54, σ_{r0} = 600 kPa (essai 0405-17)*

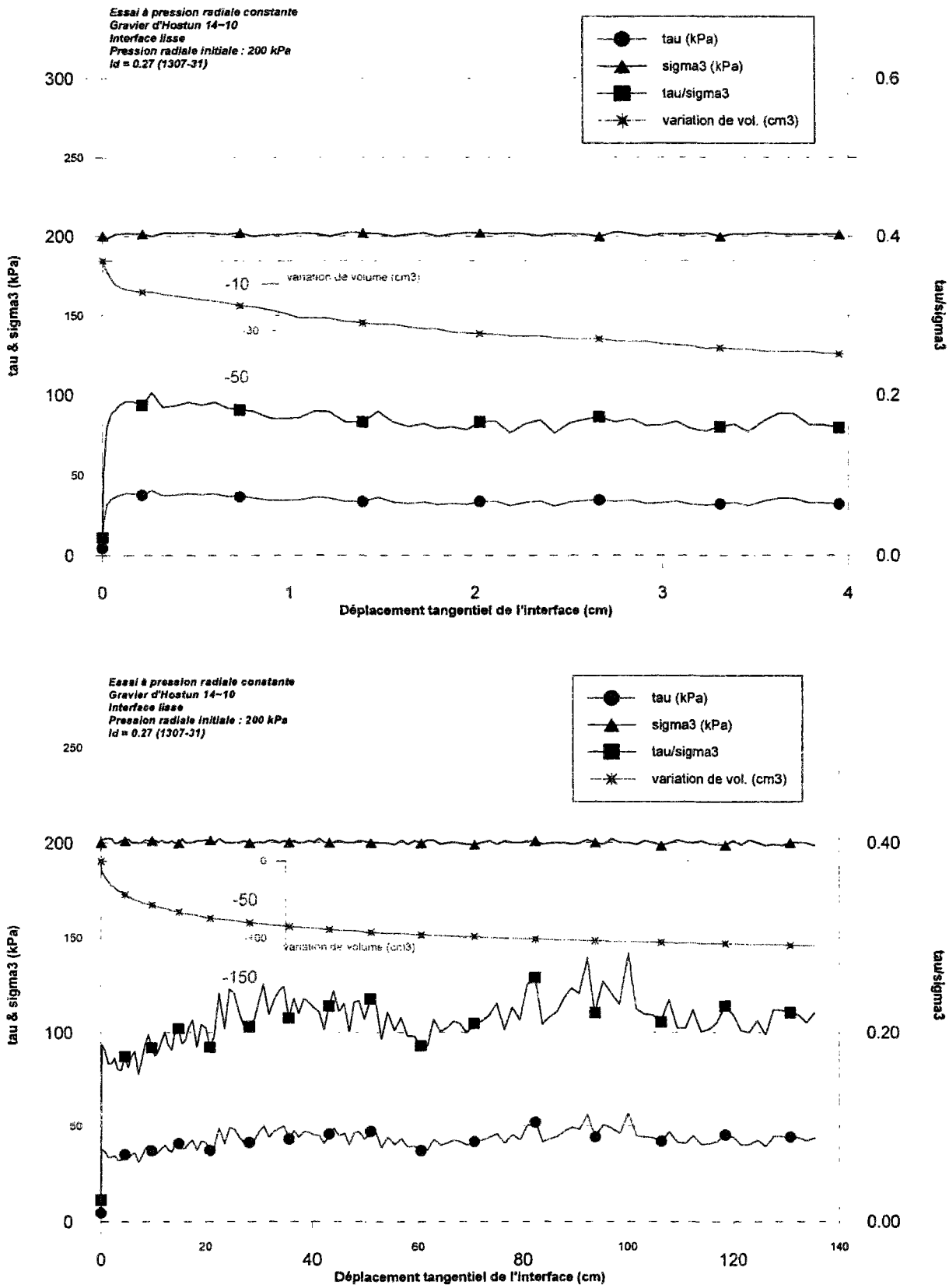


Figure B-9. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, pression radiale constante, Id = 0,27, σ_{r0} = 200 kPa (essai 1307-31)*

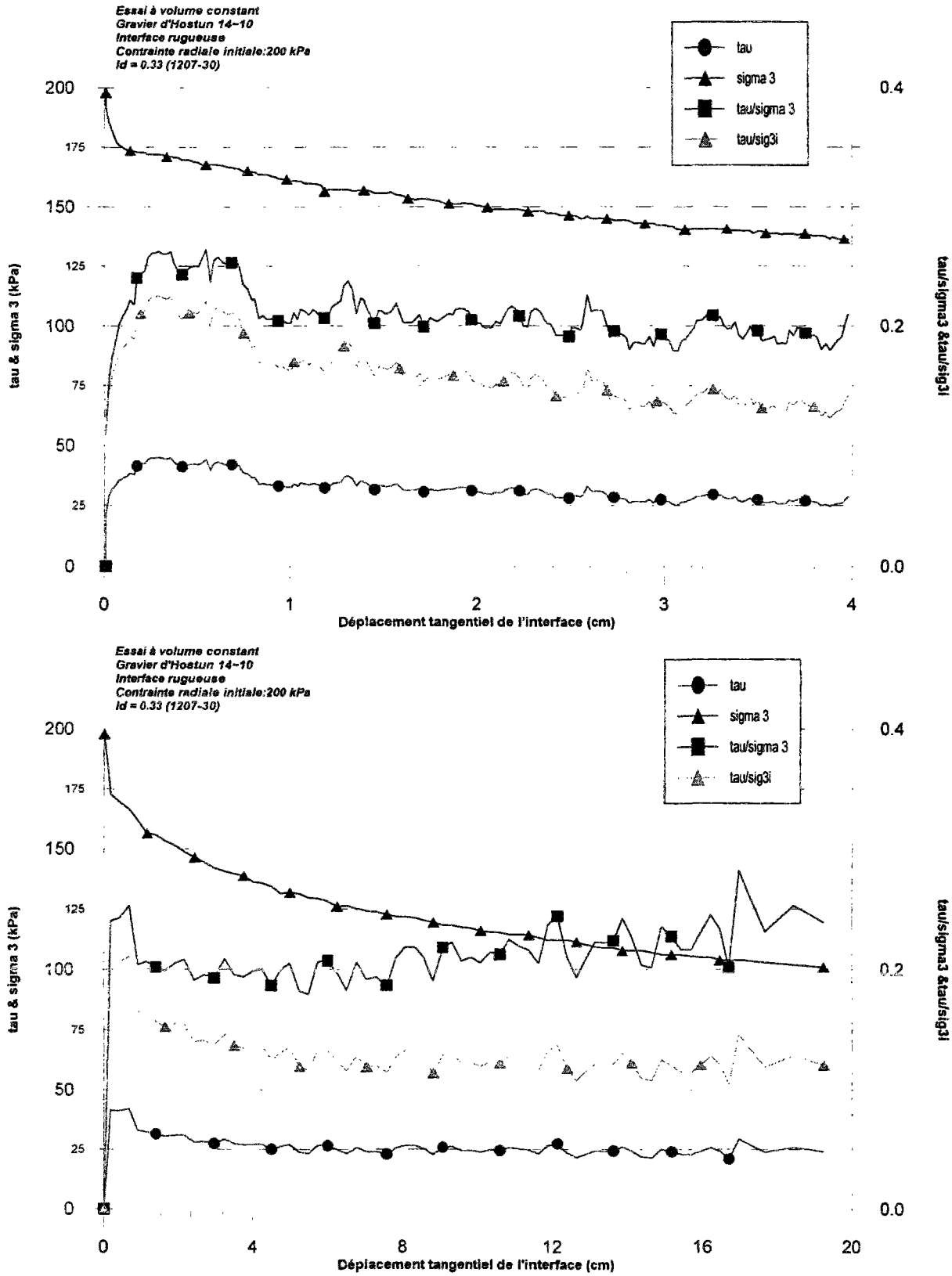


Figure B-10. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface rugueuse, volume constant, Id = 0,33, σ_{r0} = 200 kPa (essai 1207-30)*

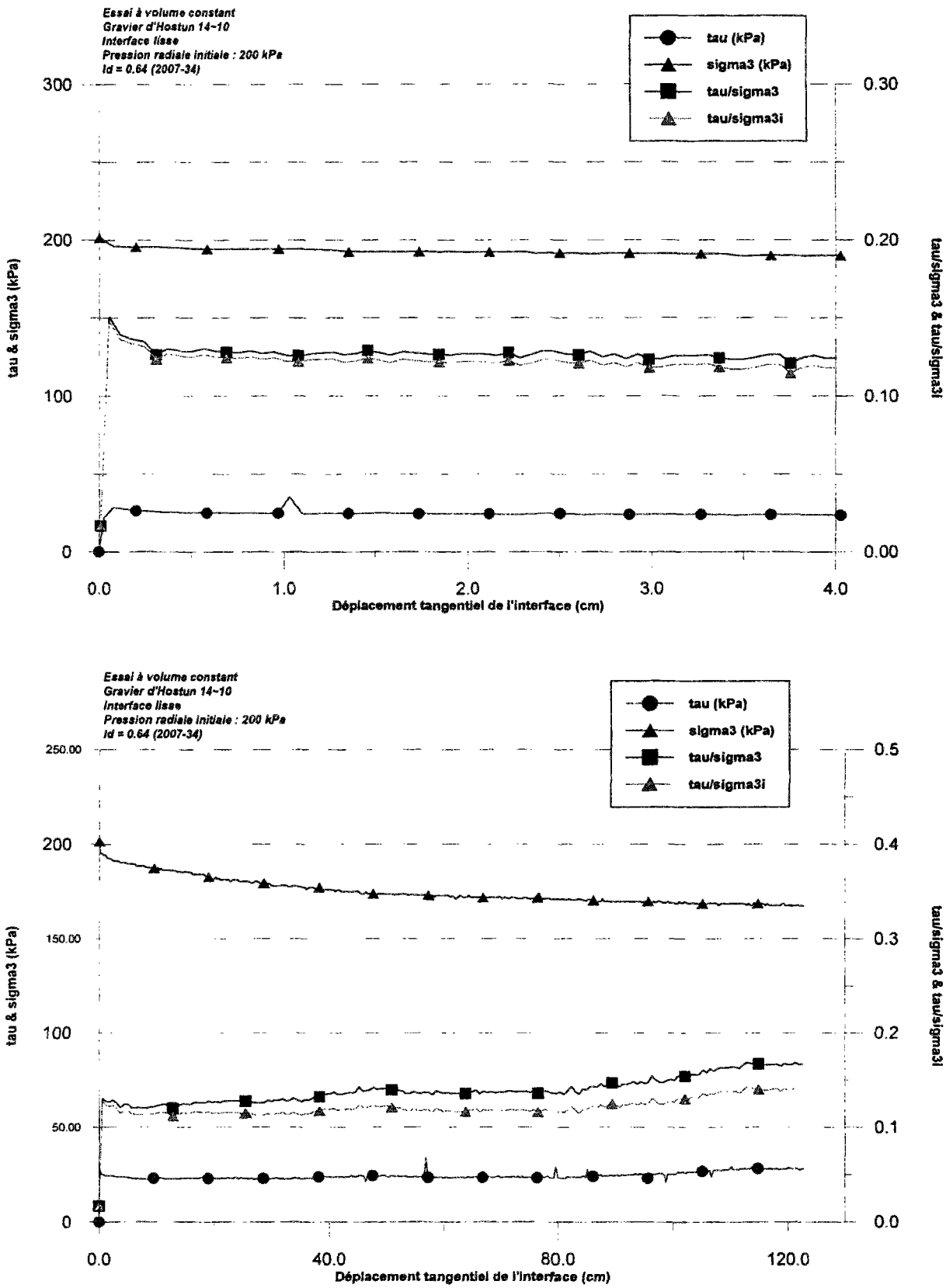


Figure B-11. *Résultats d'un essai de cisaillement simple annulaire sur gravier d'Hostun 14~10 : interface lisse, volume constant, Id = 0,64, σ_{r0} = 200 kPa (essai 2007-34)*

Annexe C ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE SABLE D'HOSTUN RF : INFLUENCE DE LA DENSITE

Figure C-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-23*

Figure C-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-23*

Figure C-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-24*

Figure C-4. *Courbes (capteur moyen/$\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-24*

Figure C-5. *Courbes (μ_c = τ/capteur moyen) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-25*

Figure C-6. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-26*

Figure C-7. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-27*

Figure C-8. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense..... C-28*

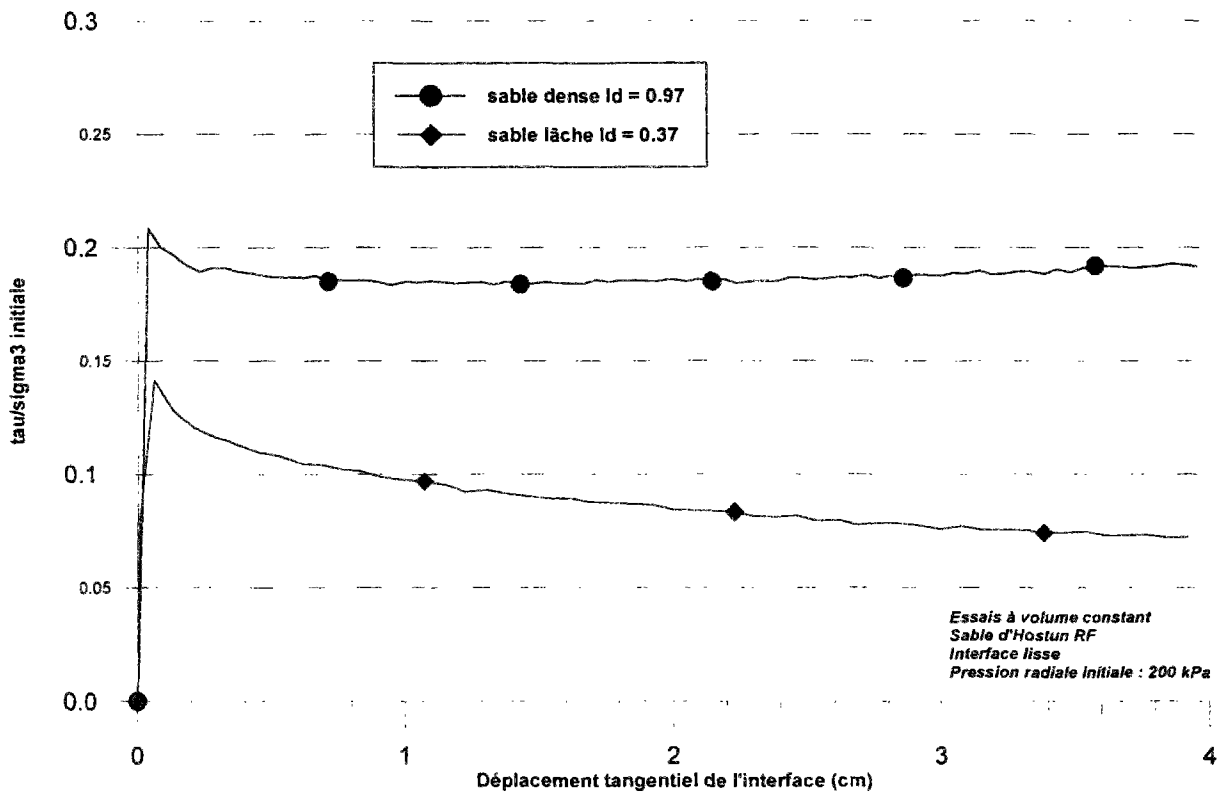


Figure C-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

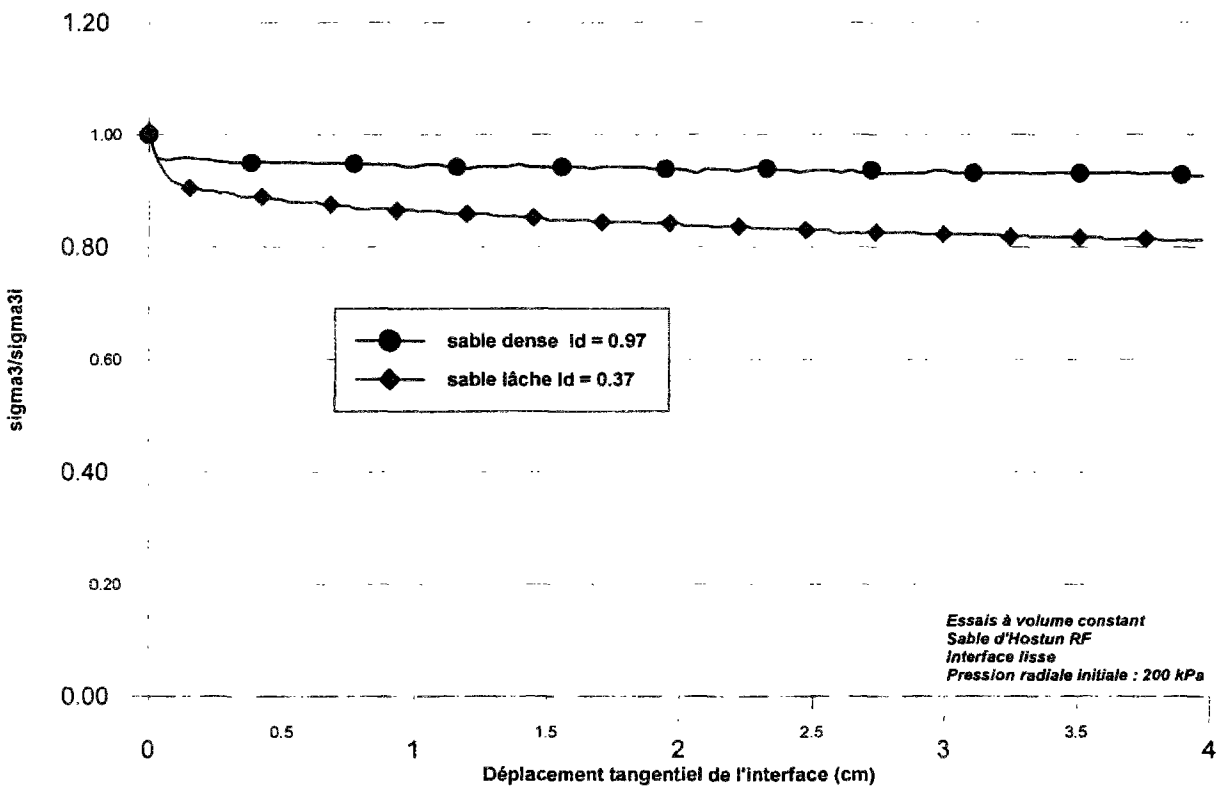


Figure C-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

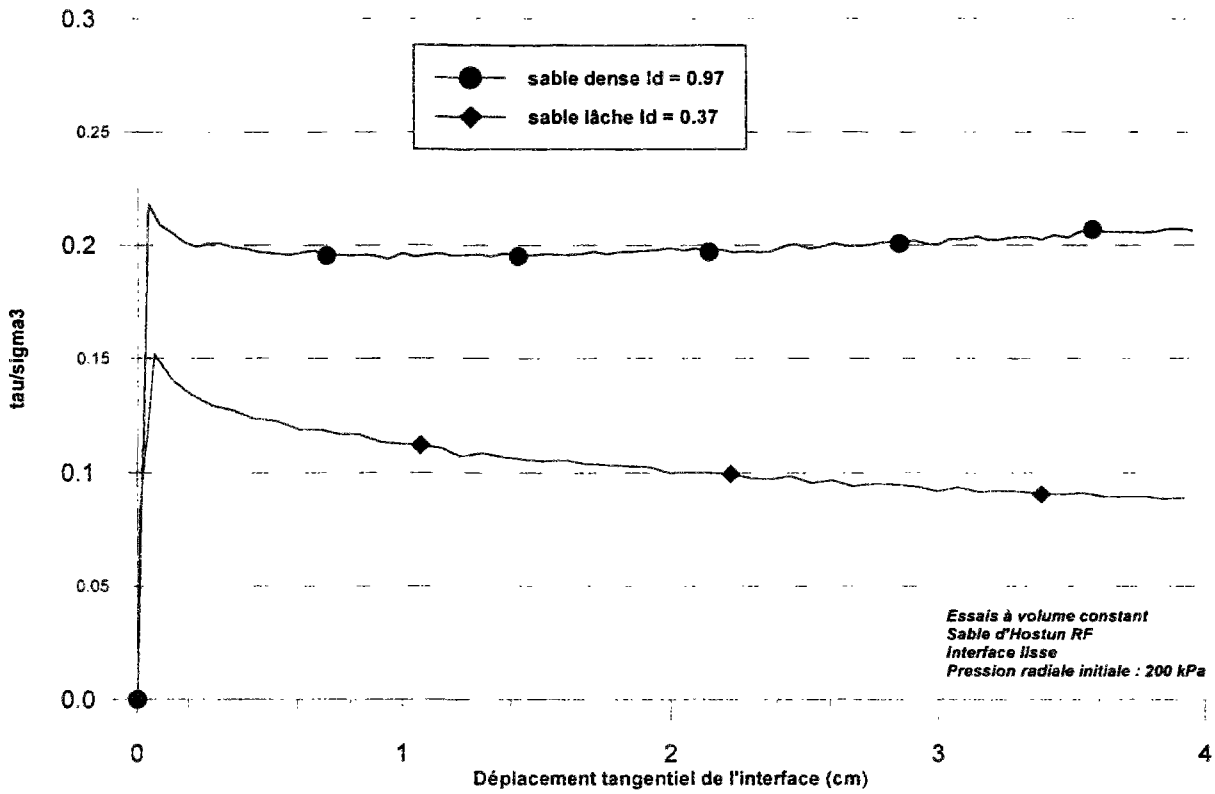


Figure C-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

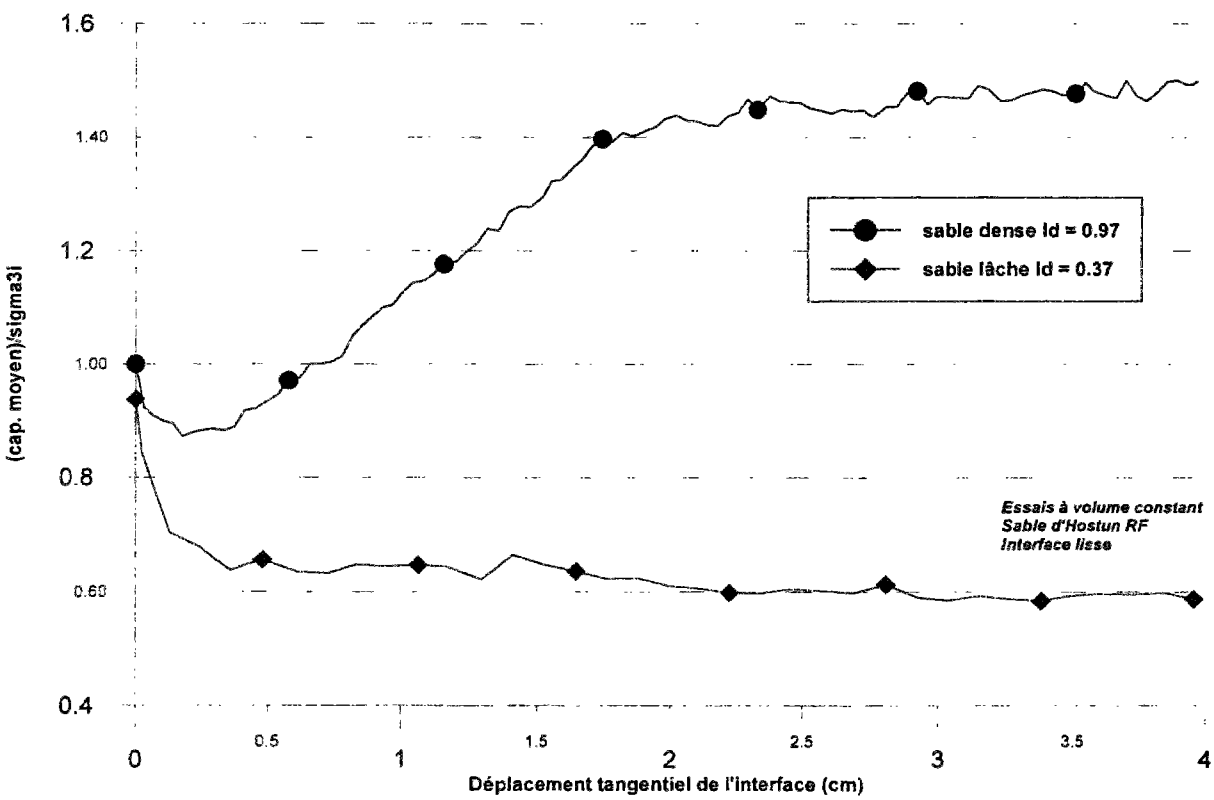


Figure C-4. *Courbes (capteur moyen/$\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

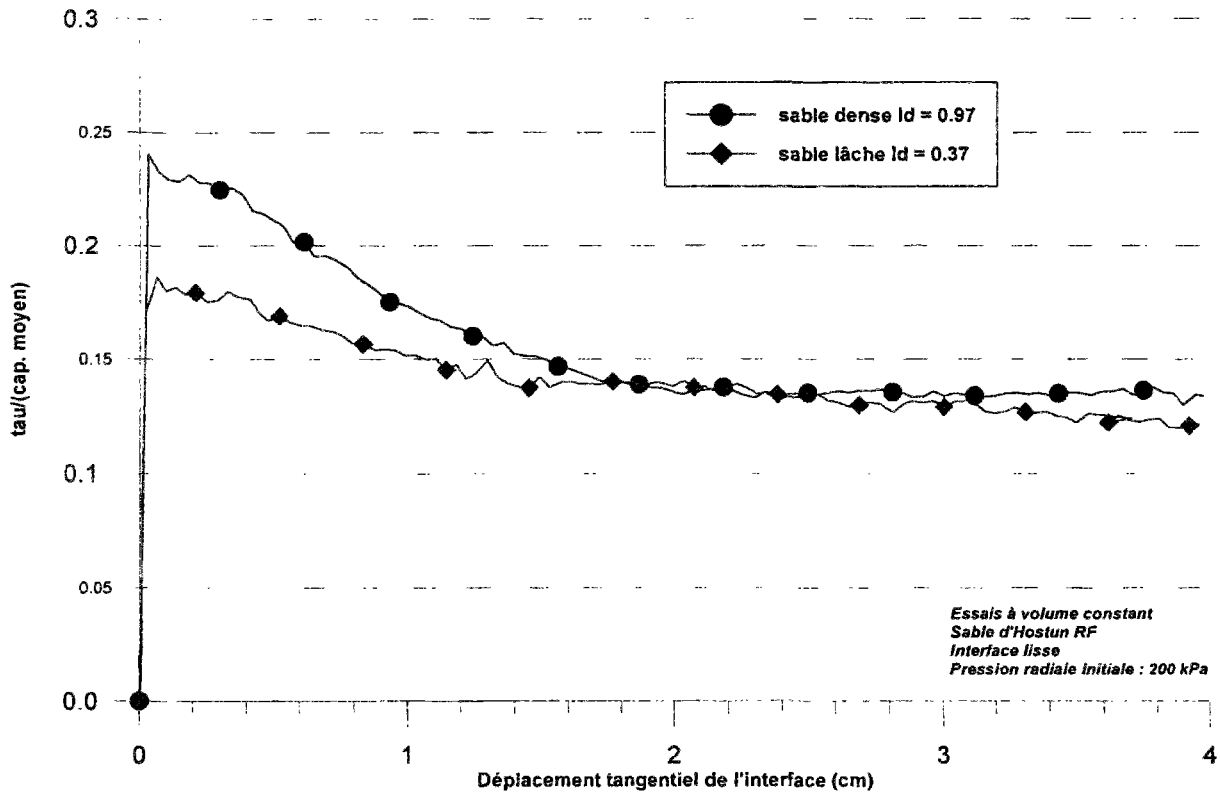


Figure C-5. *Courbes (μ_c = τ/capteur moyen) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

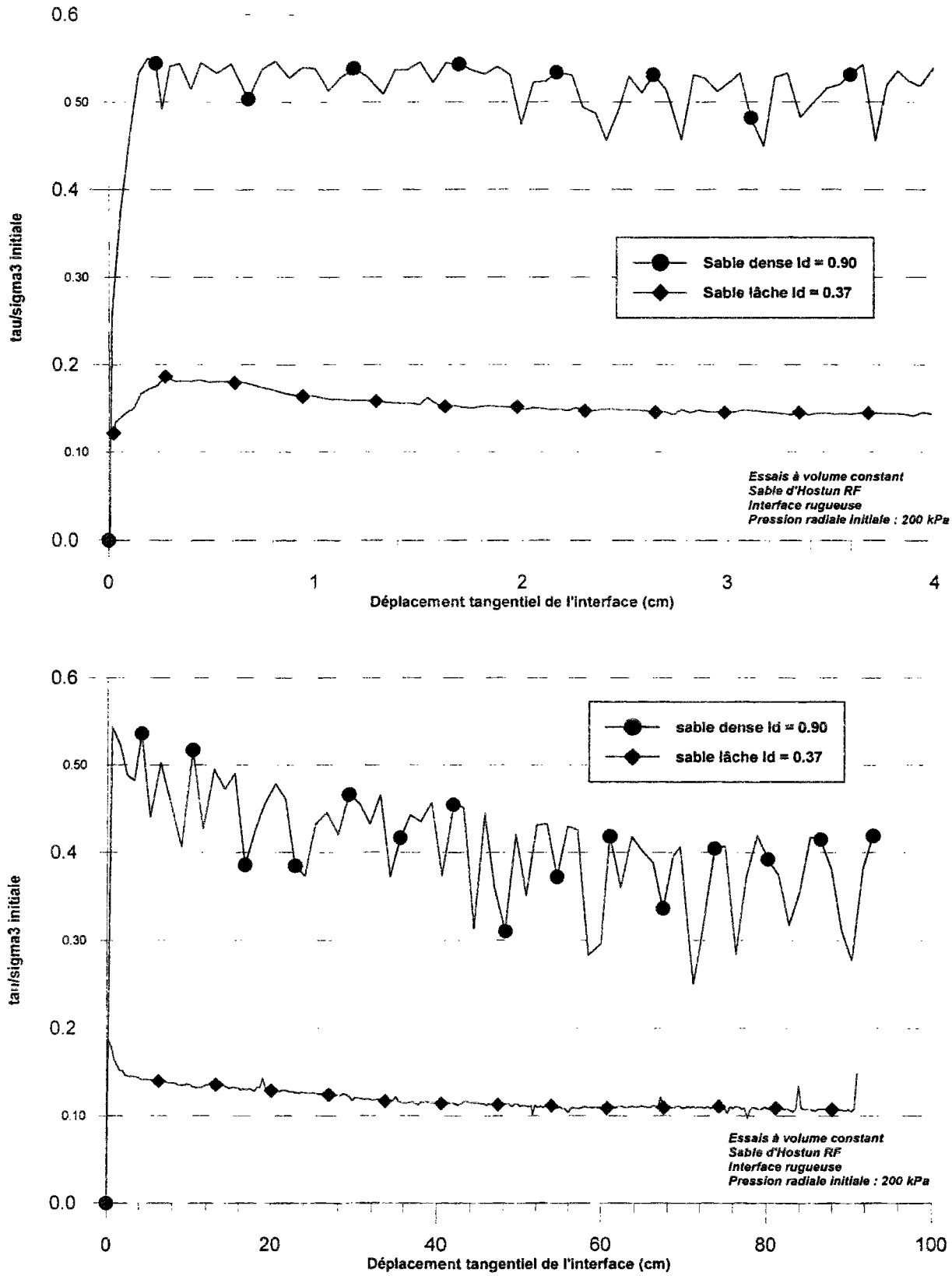


Figure C-6. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

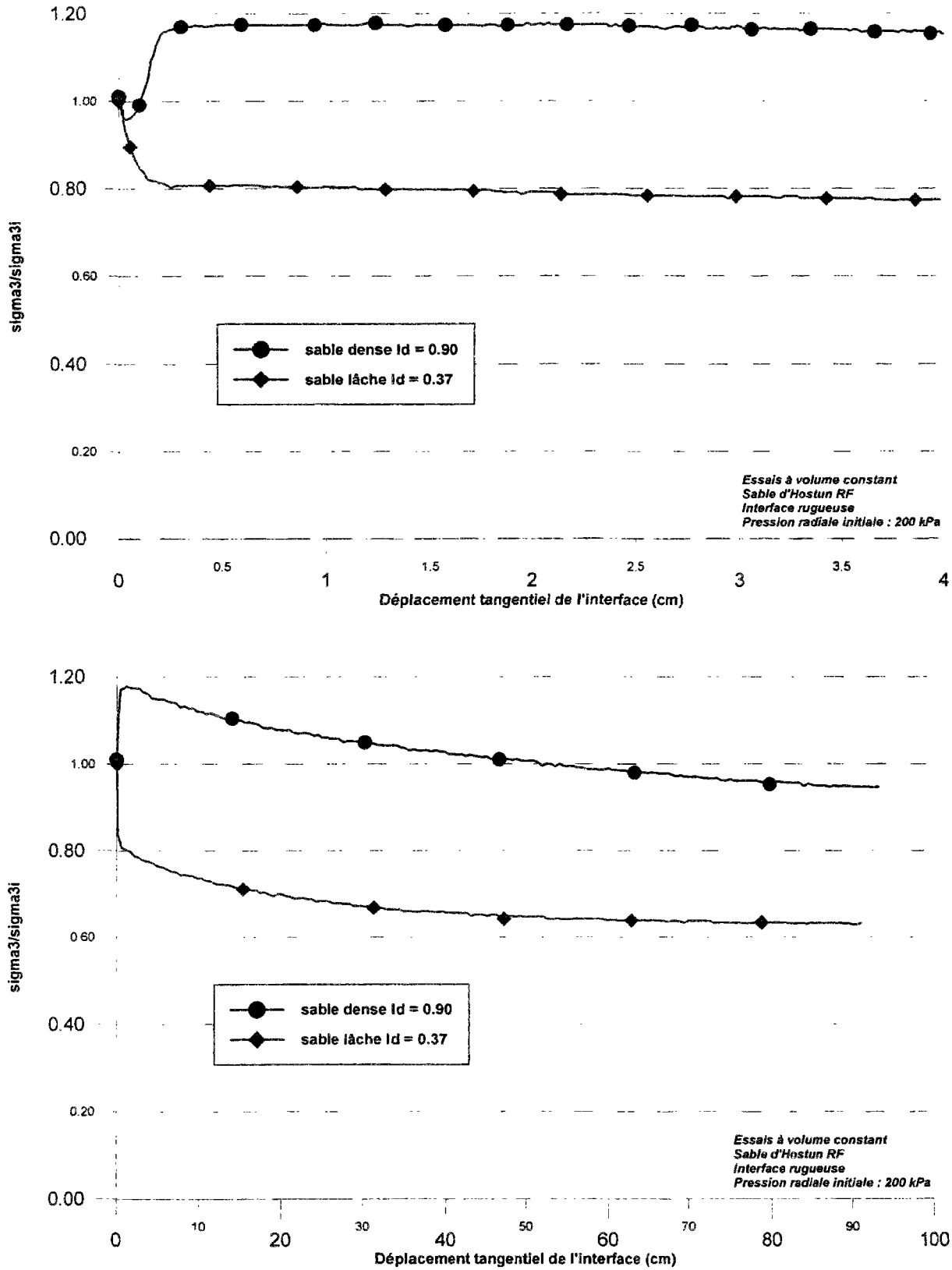


Figure C-7. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

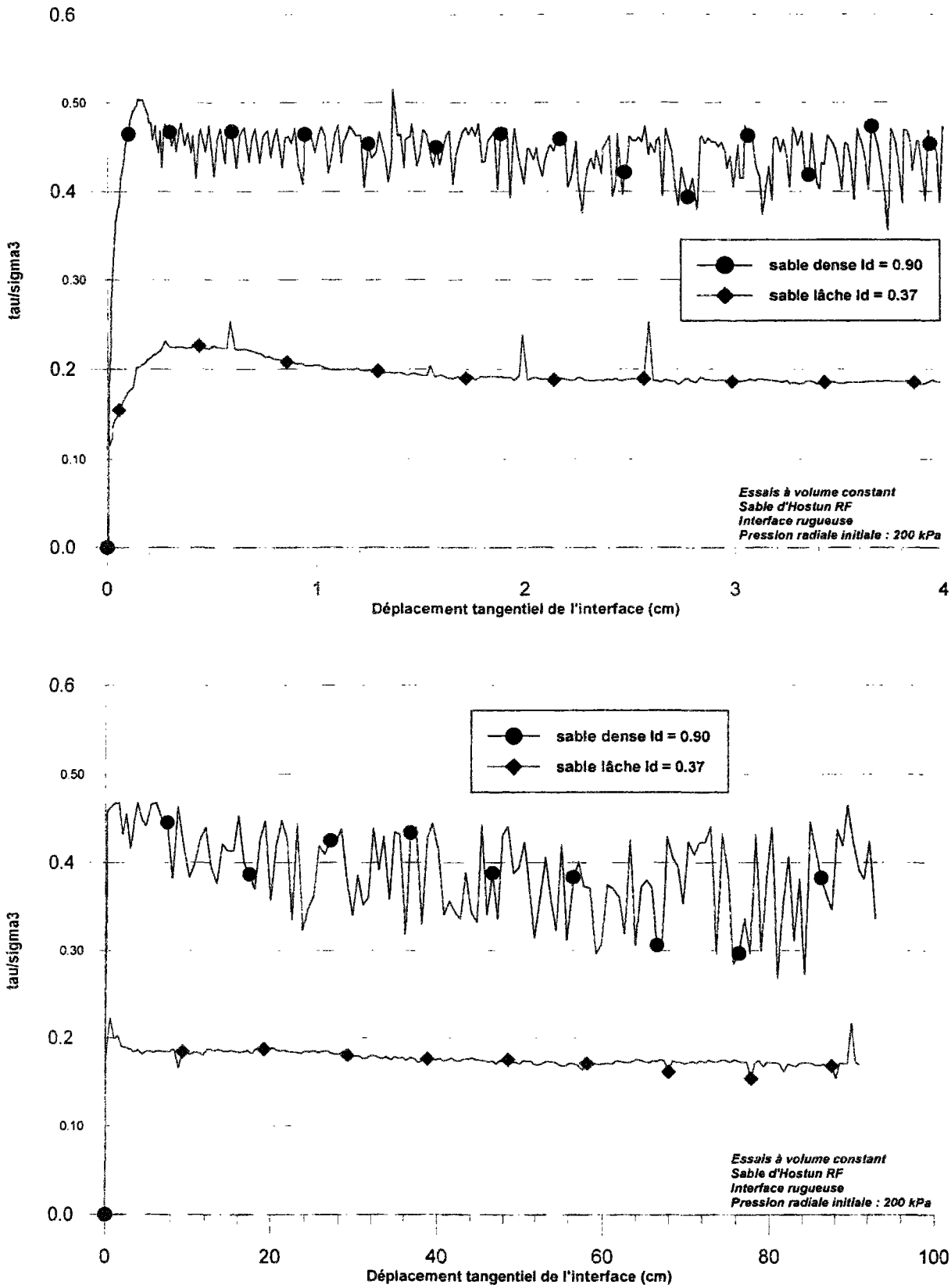


Figure C-8. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, sable d'Hostun RF lâche et dense*

Annexe D ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE SABLE D'HOSTUN RF : INFLUENCE DE LA RUGOSITE

Figure D-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant* *D-30*

Figure D-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant* *D-30*

Figure D-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant* *D-31*

Figure D-4. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *D-32*

Figure D-5. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *D-33*

Figure D-6. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *D-34*

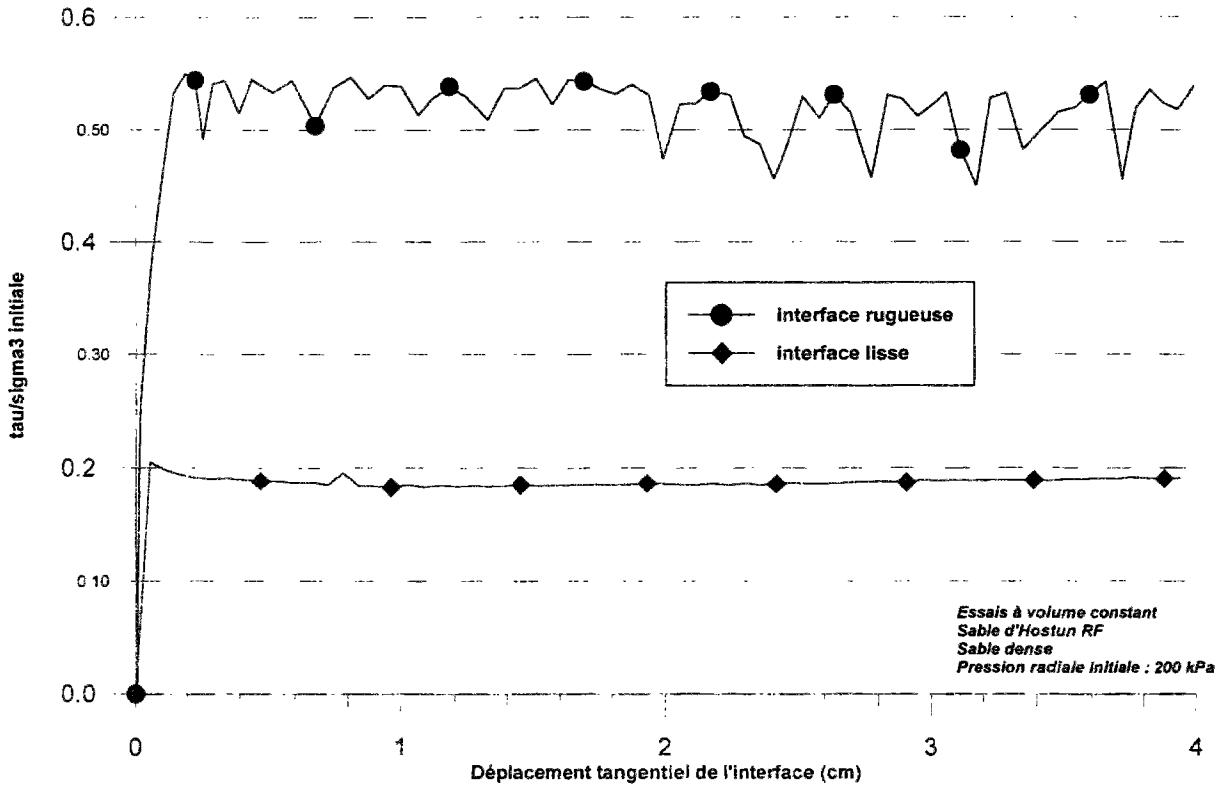


Figure D-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

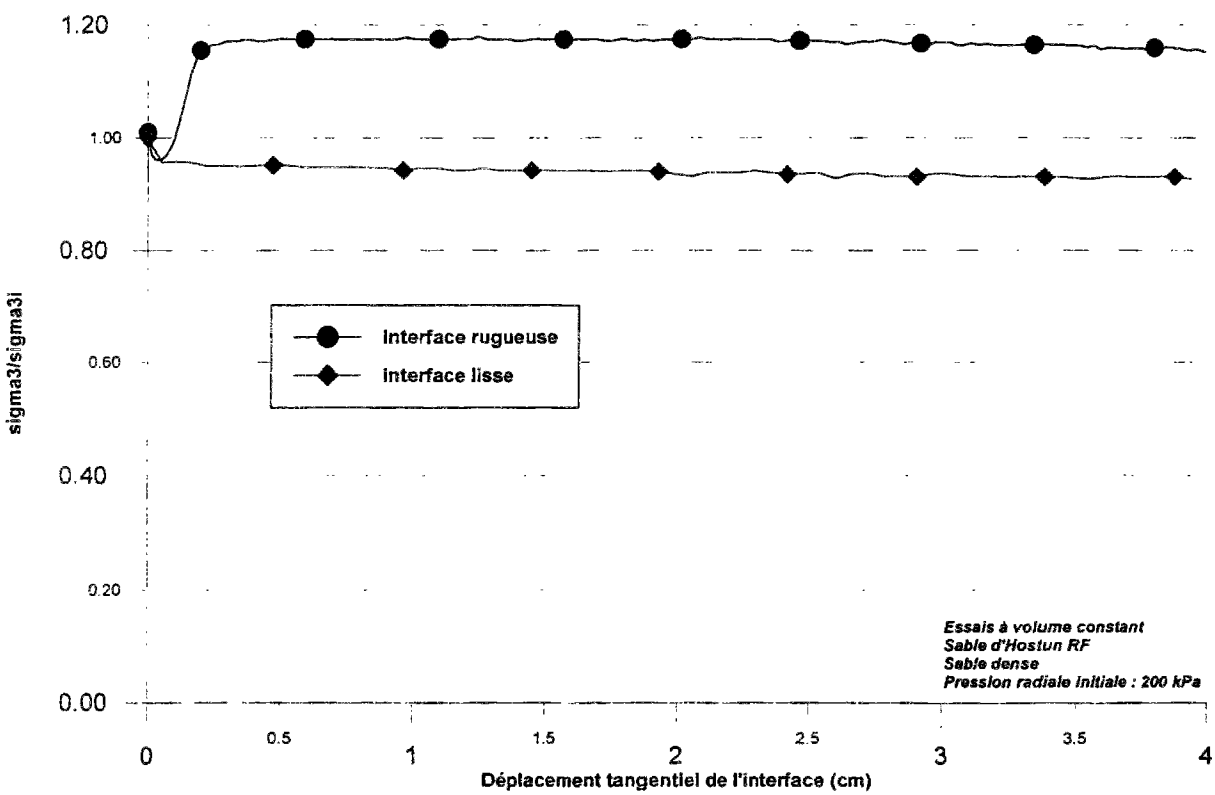


Figure D-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

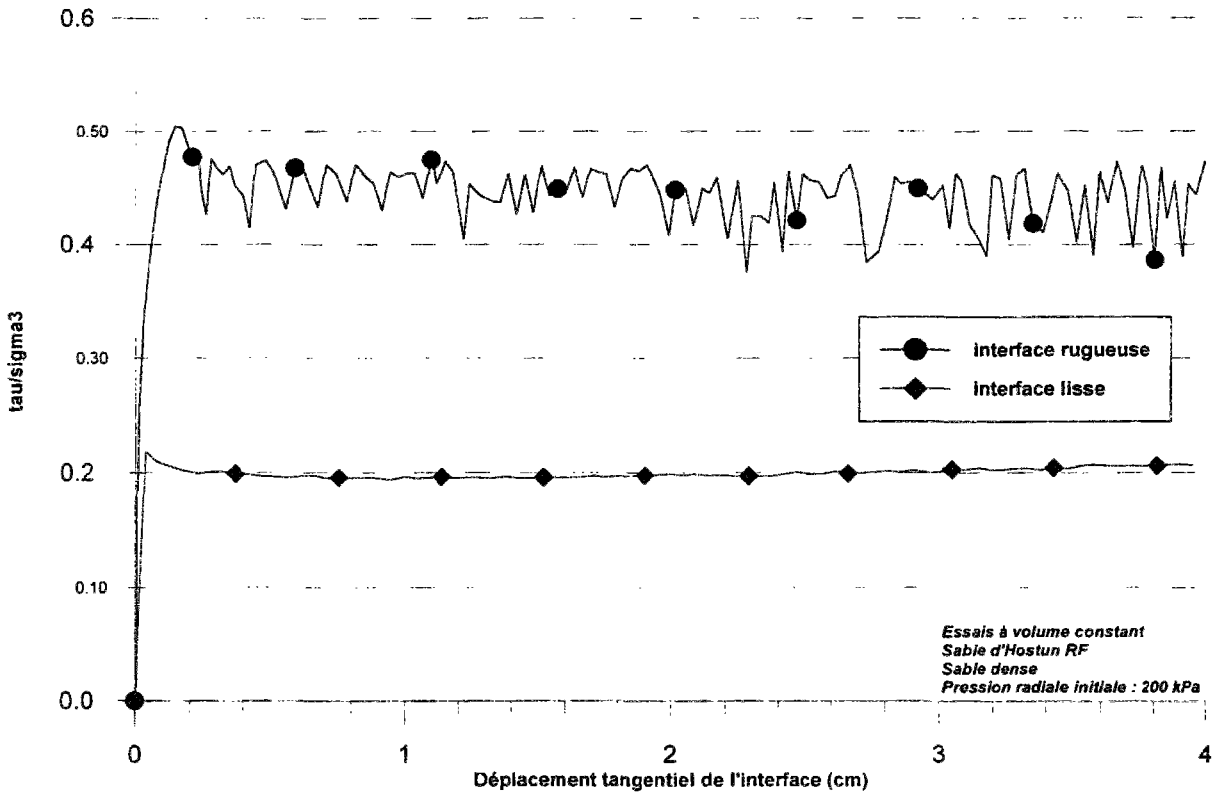


Figure D-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

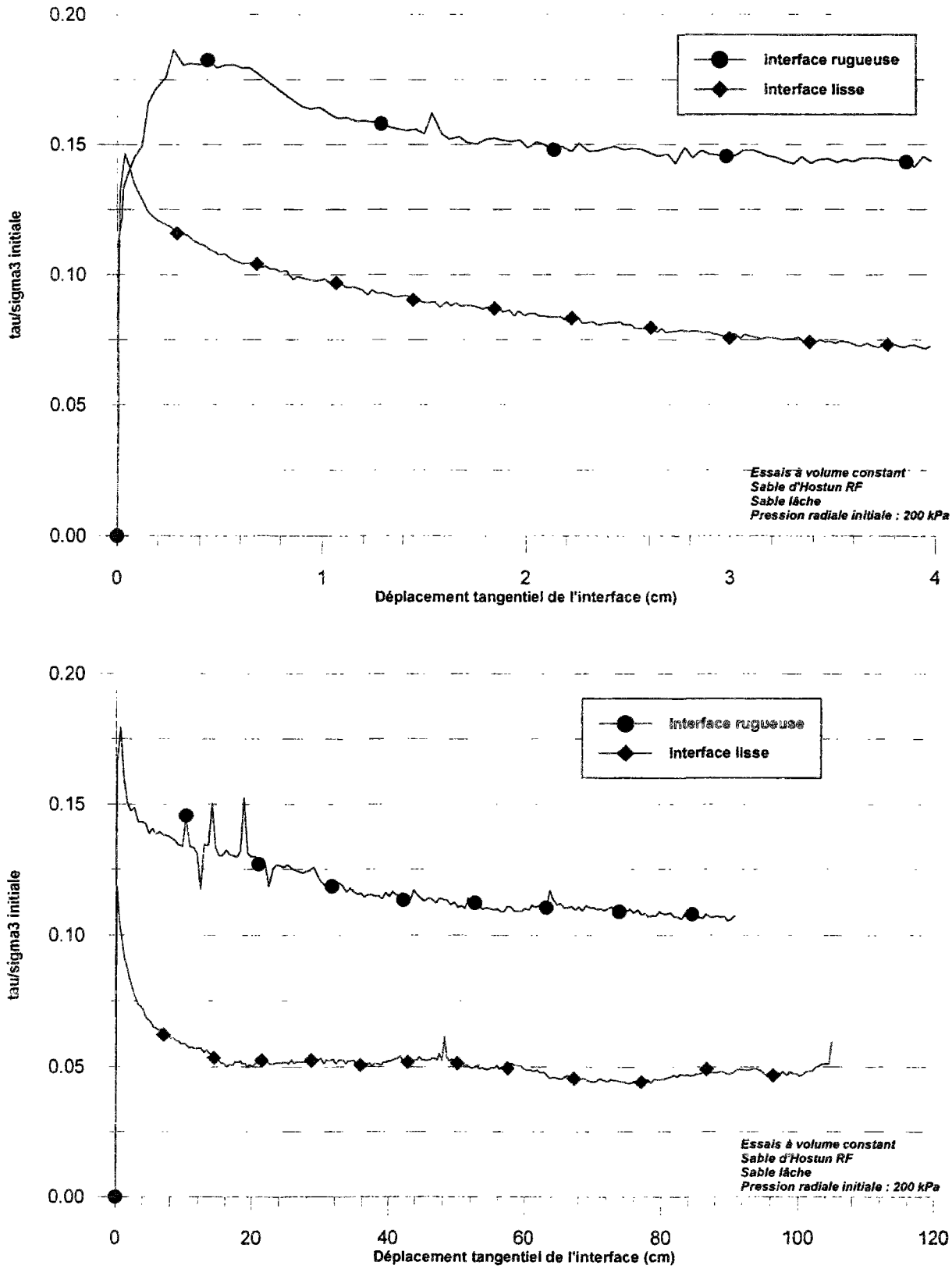


Figure D-4. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*

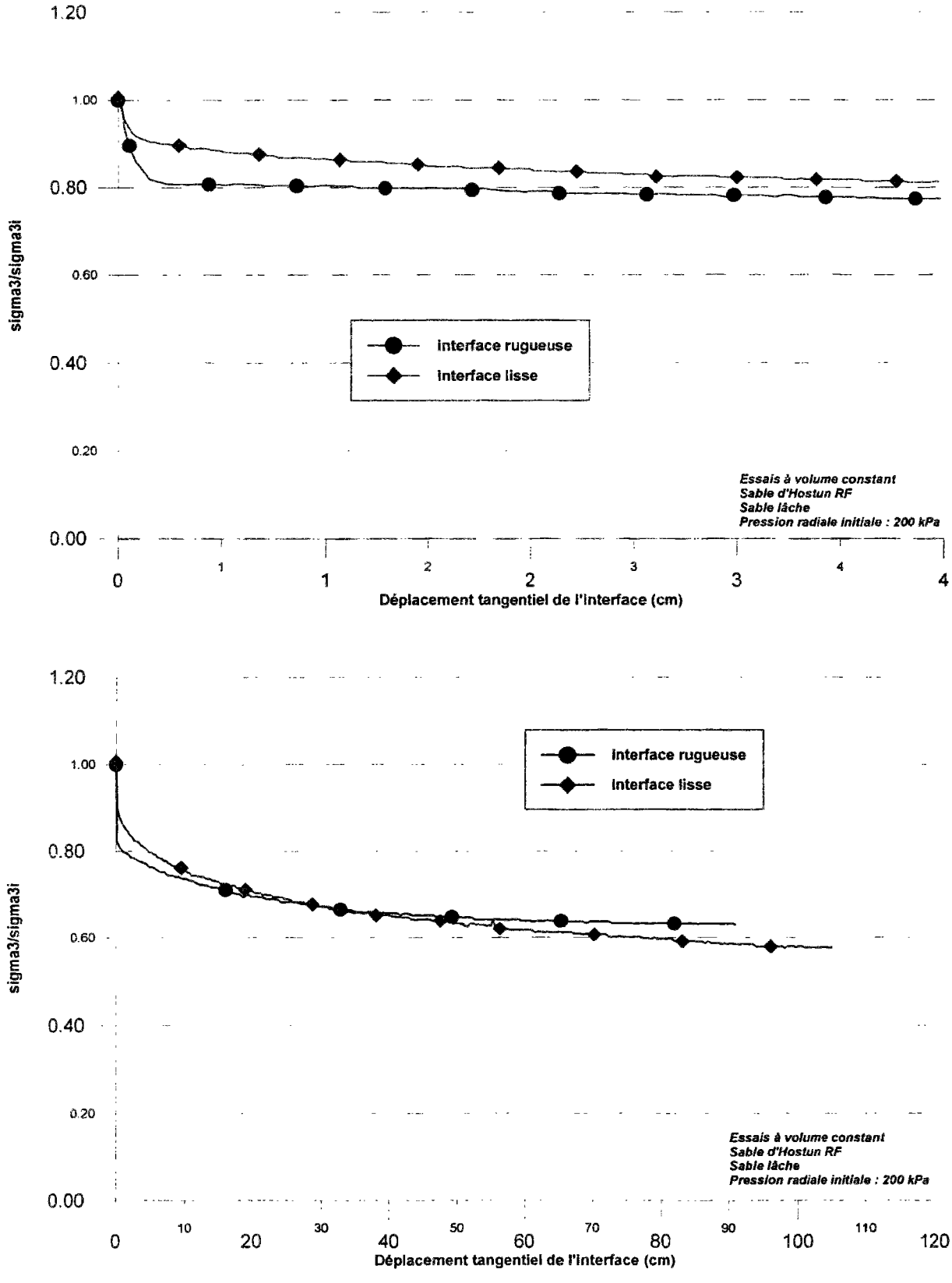


Figure D-5. *Courbes (σ3/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*

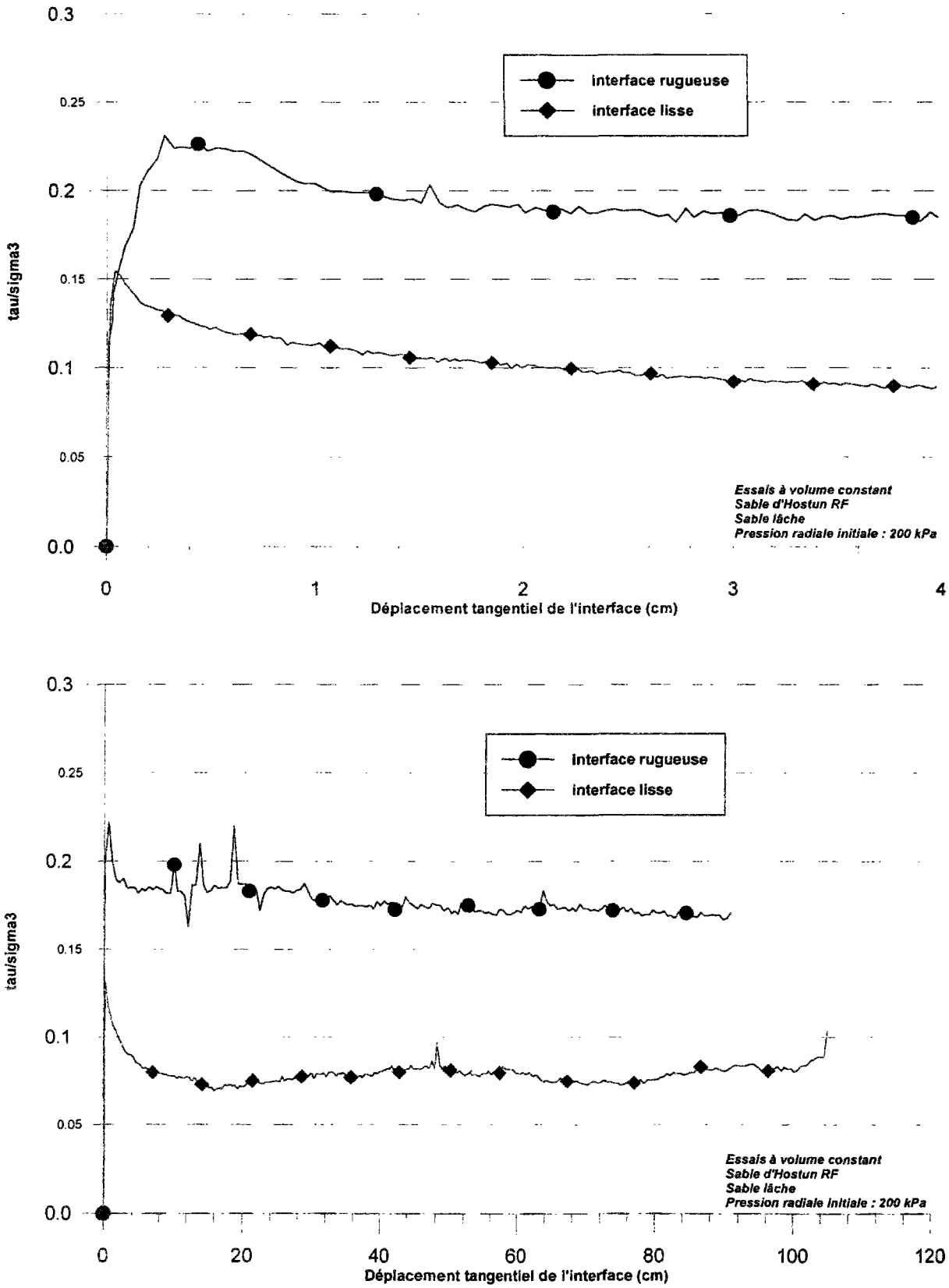


Figure D-6. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, sable d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*

Annexe E ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 : INFLUENCE DE LA DENSITE

Figure E-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-36*

Figure E-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-36*

Figure E-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-37*

Figure E-4. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-38*

Figure E-5. *Variation de volume de l'échantillon en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-39*

Figure E-6. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-40*

Figure E-7. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-41*

Figure E-8. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense* *E-42*

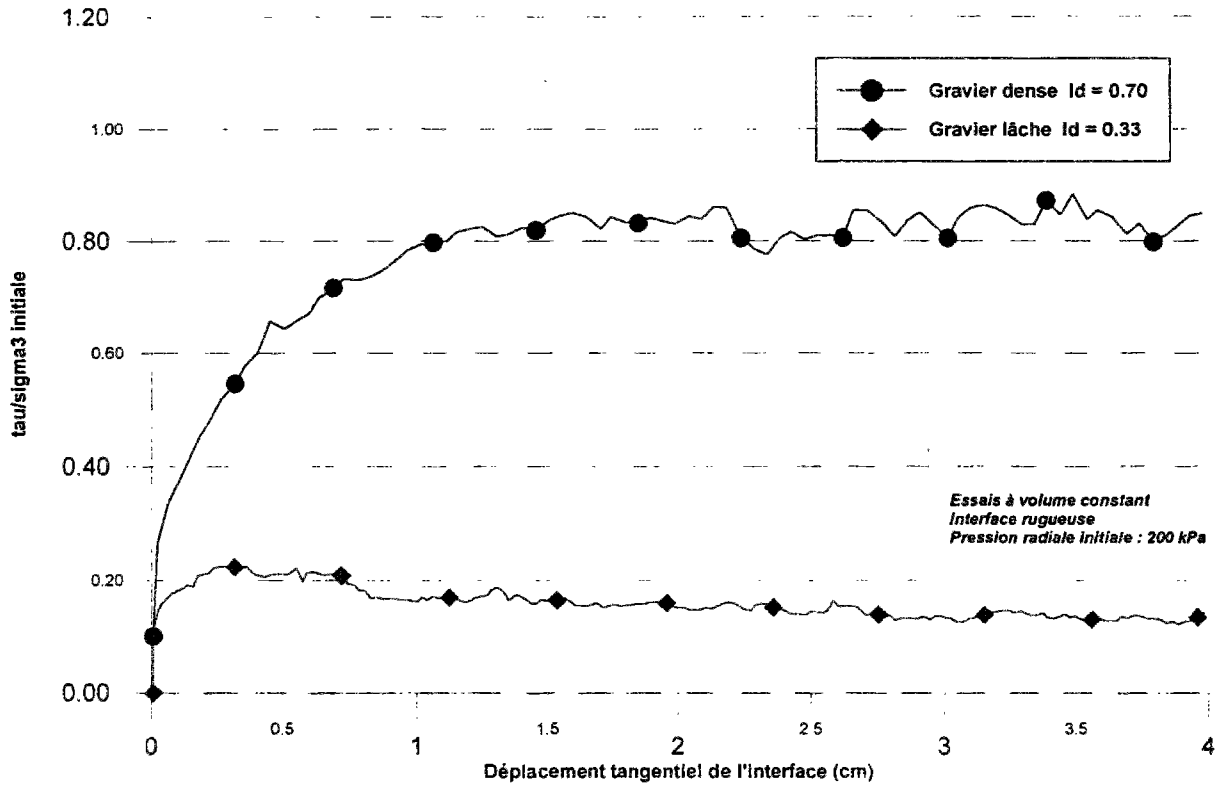


Figure E-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

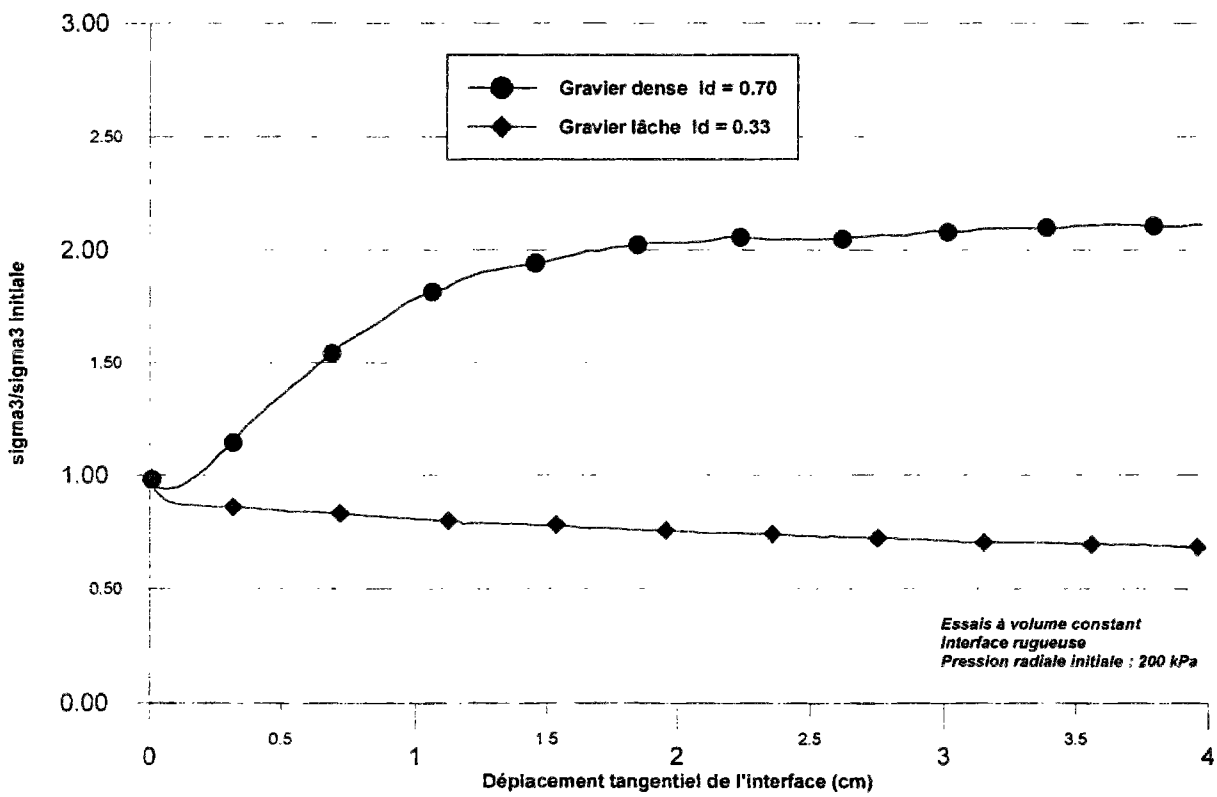


Figure E-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

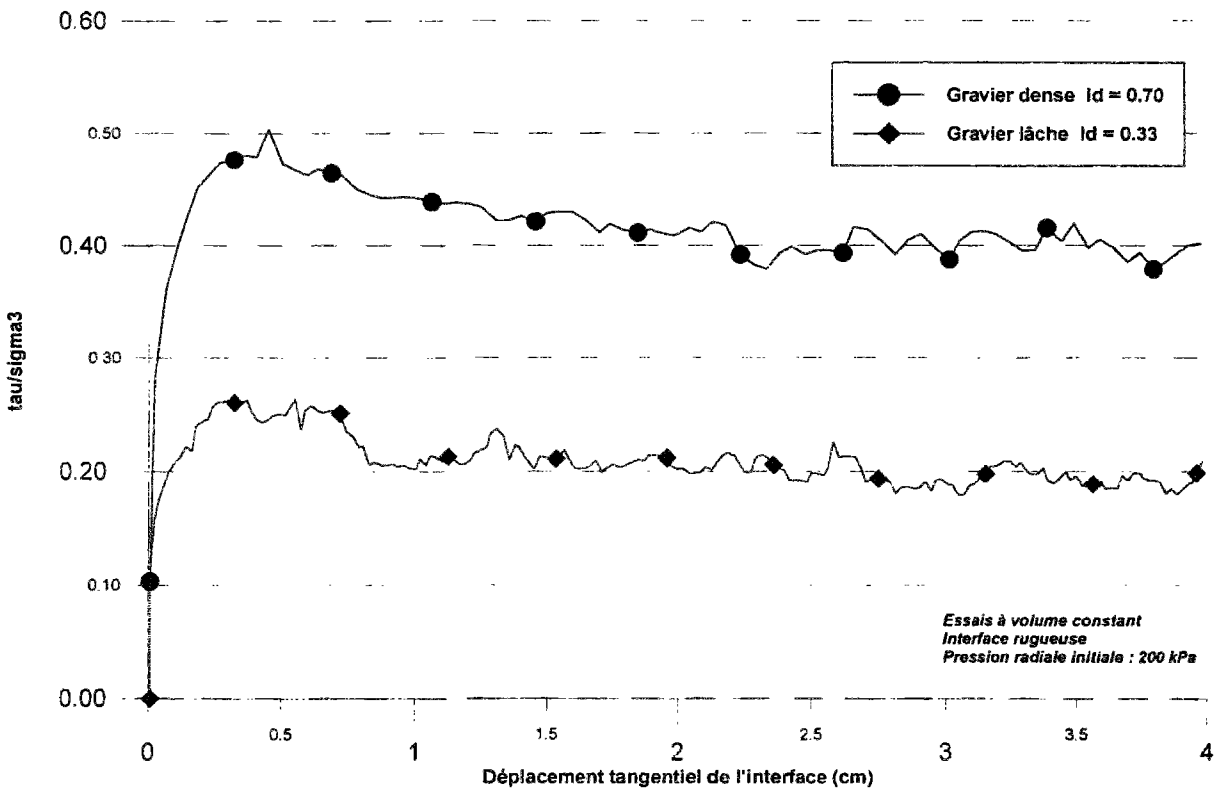


Figure E-3.*Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

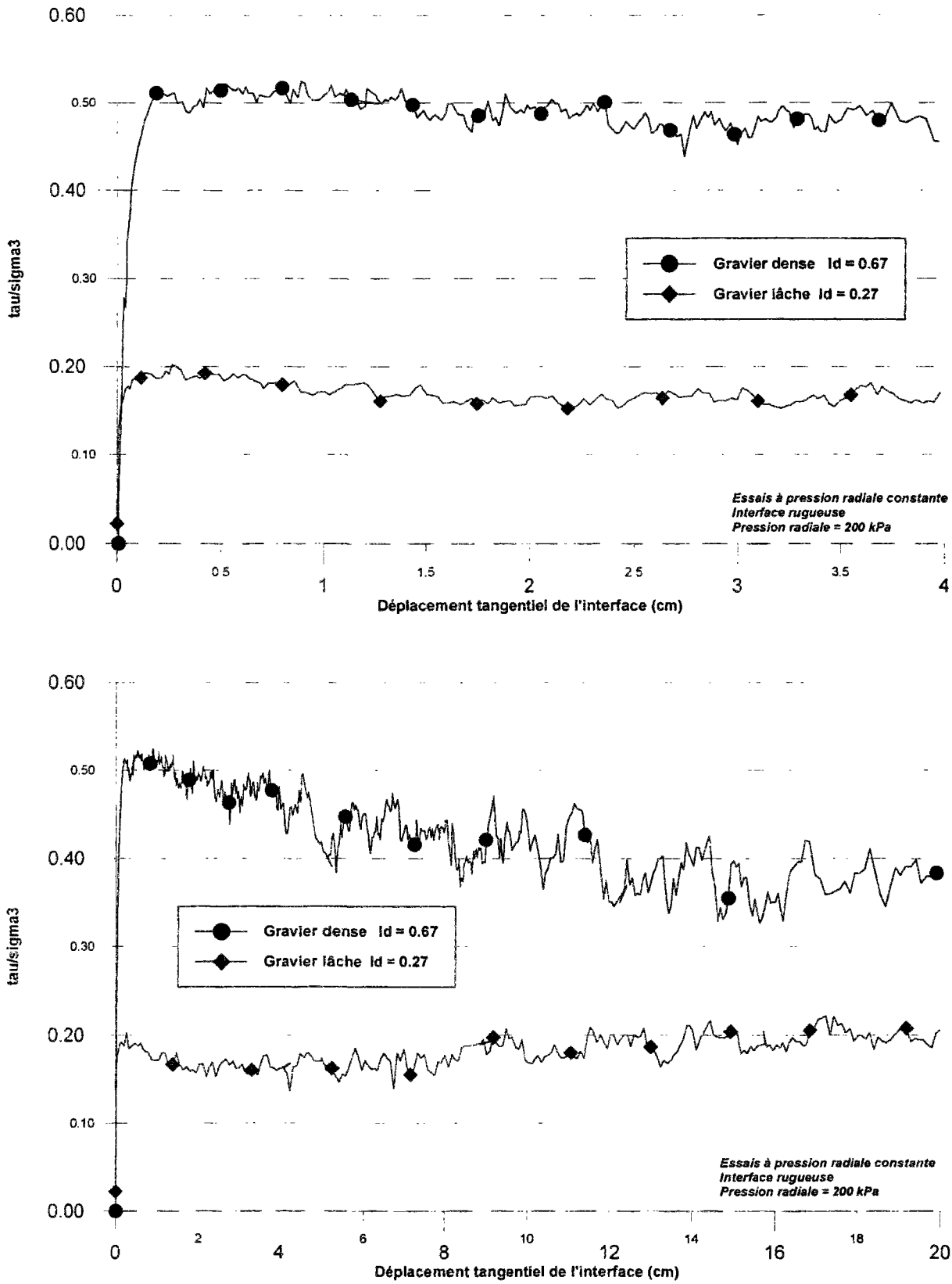


Figure E-4. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

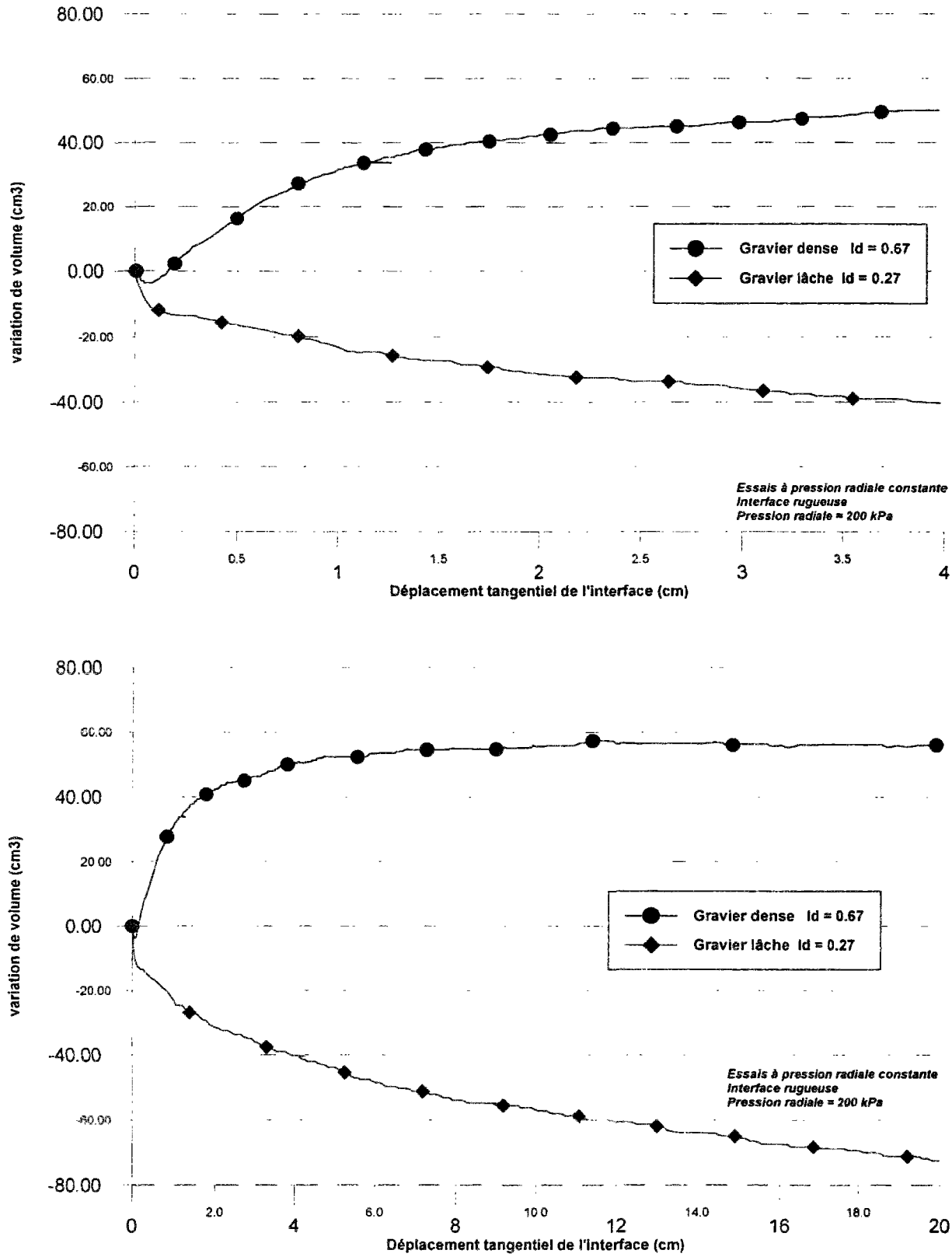


Figure E-5. *Variation de volume de l'échantillon en fonction du déplacement tangentiel, interface rugueuse, pression radiale constante, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

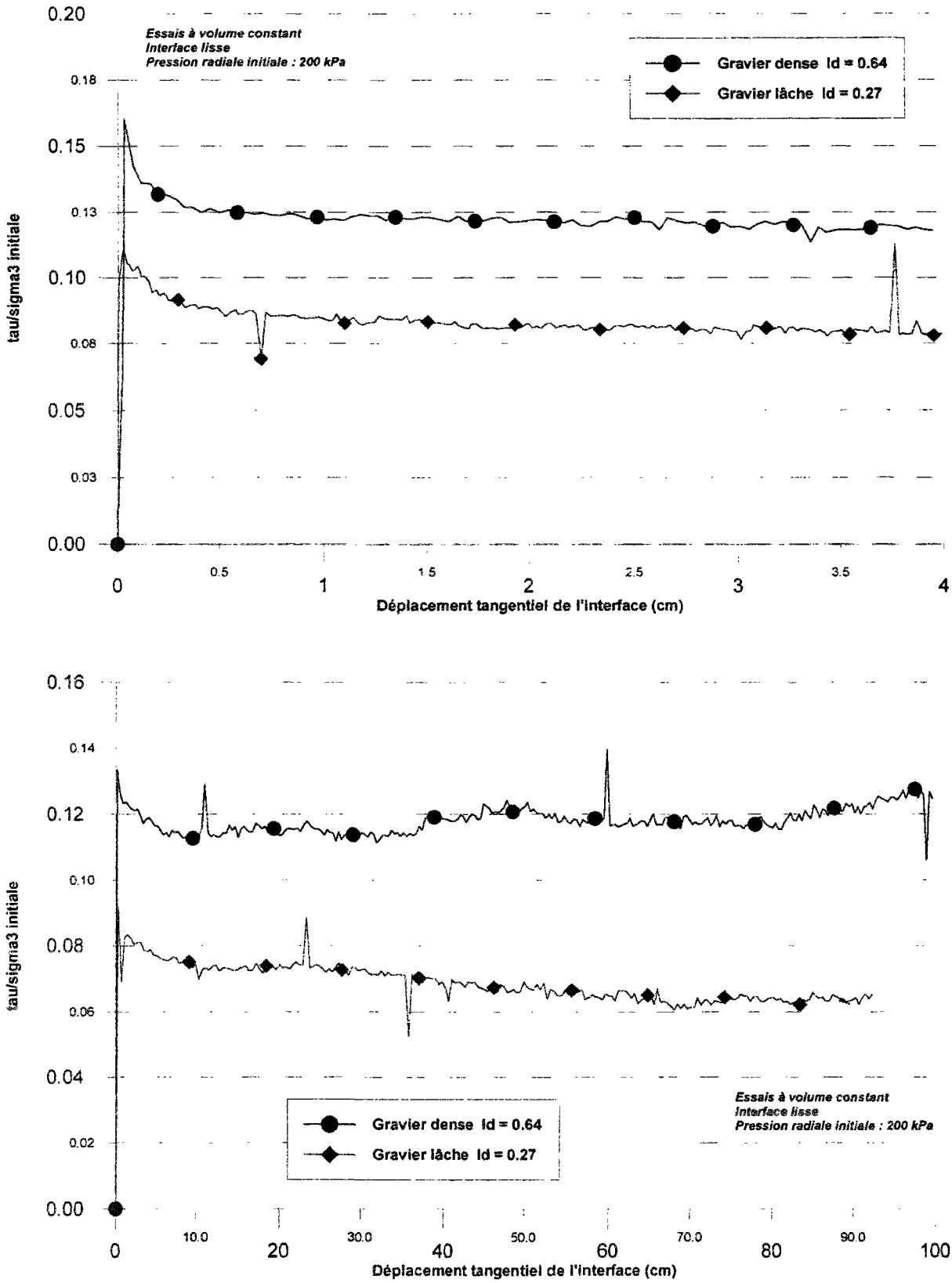


Figure E-6. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

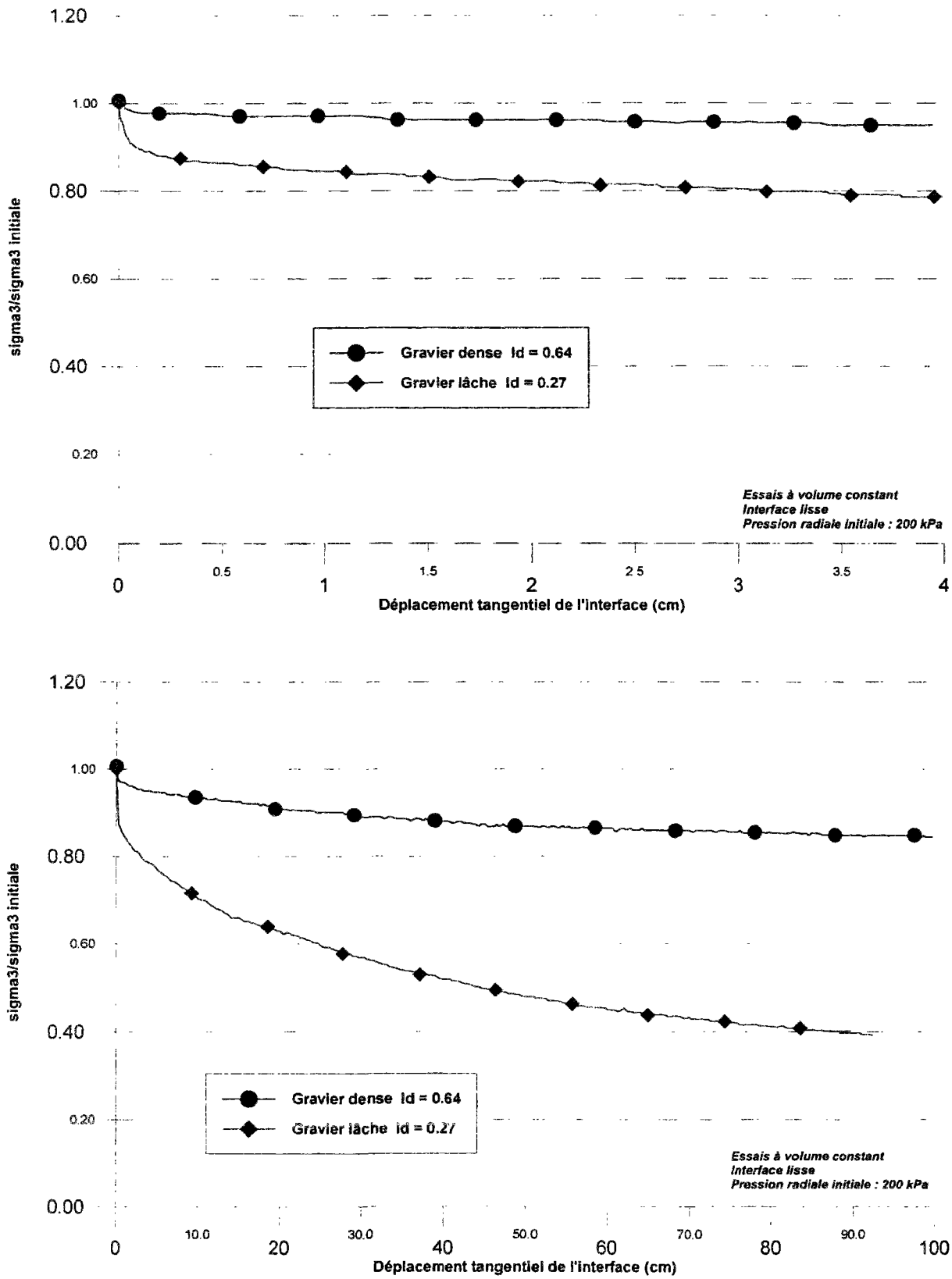


Figure E-7. *Courbes (σ3/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

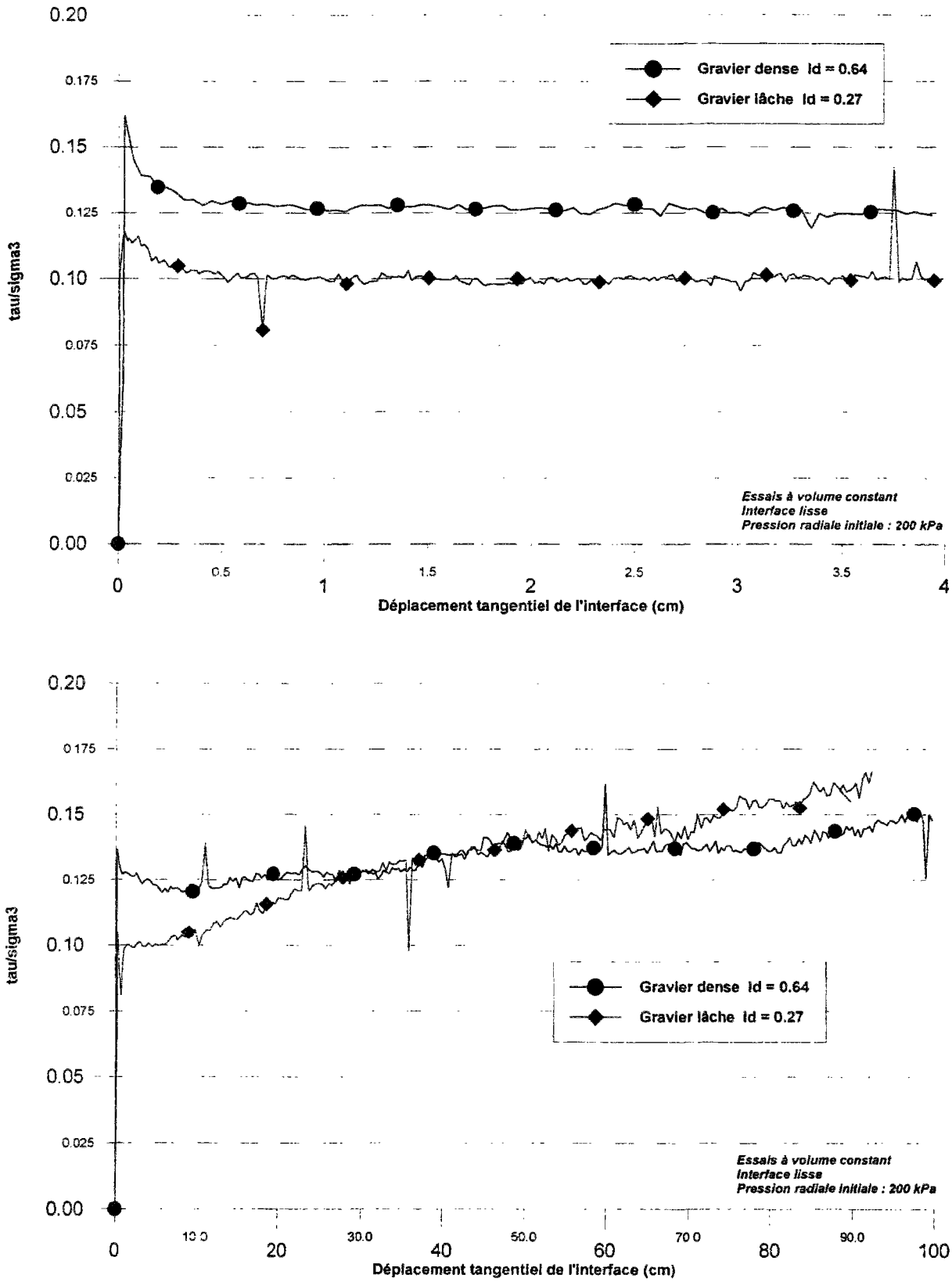


Figure E-8. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, interface lisse, volume constant, gravier d'Hostun 14~10 lâche et dense*

Annexe F ESSAIS DE CISAILLEMENT SIMPLE ANNULAIRE SUR LE GRAVIER D'HOSTUN 14~10 : INFLUENCE DE LA RUGOSITE

Figure F-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-44*

Figure F-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-44*

Figure F-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-45*

Figure F-4. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-46*

Figure F-5. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-47*

Figure F-6. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-48*

Figure F-7. *Chemins de contrainte dans le plan(τ, σ_n) gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant* *F-49*

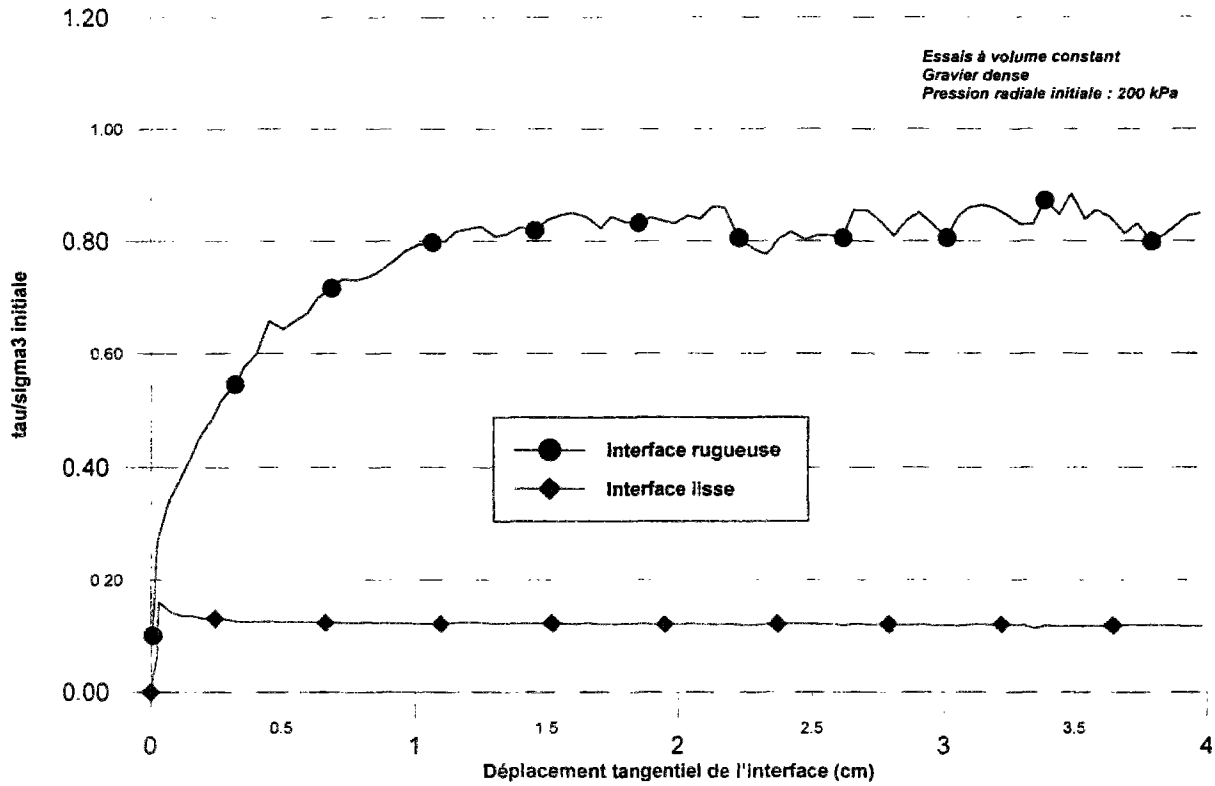


Figure F-1. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

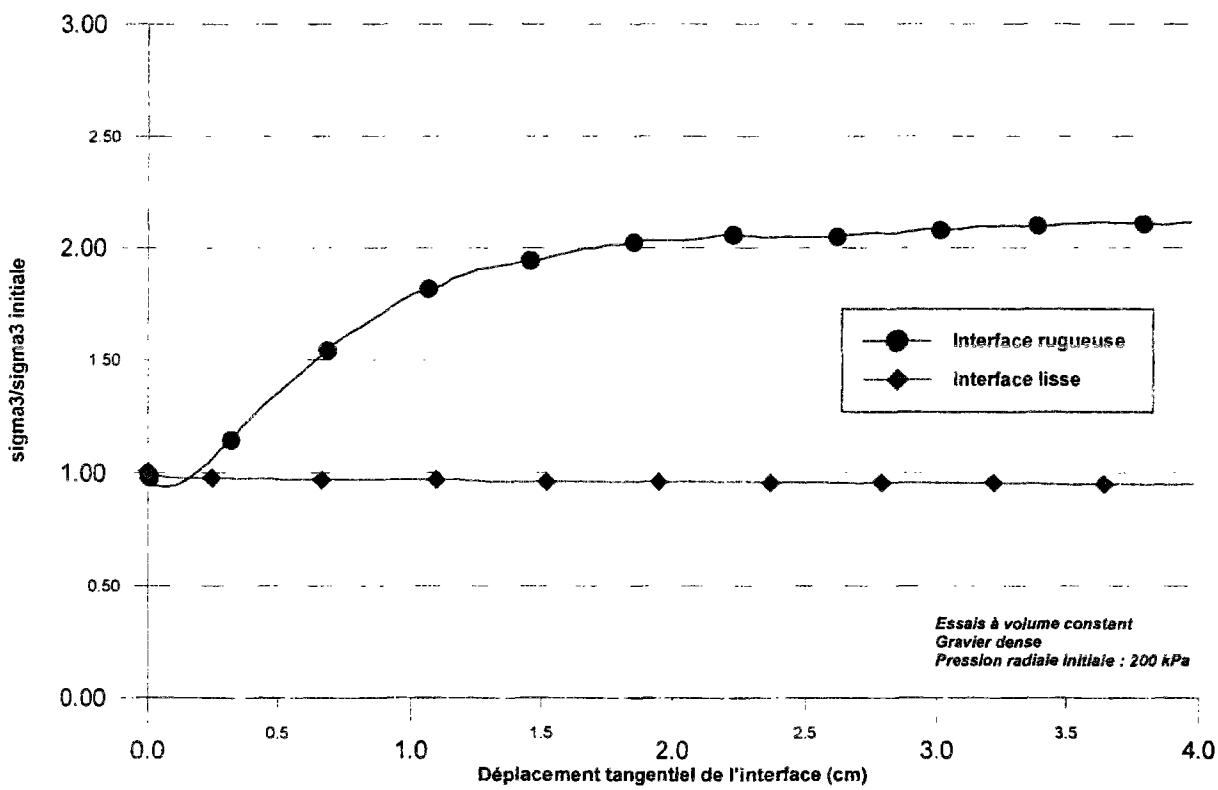


Figure F-2. *Courbes ($\sigma 3/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

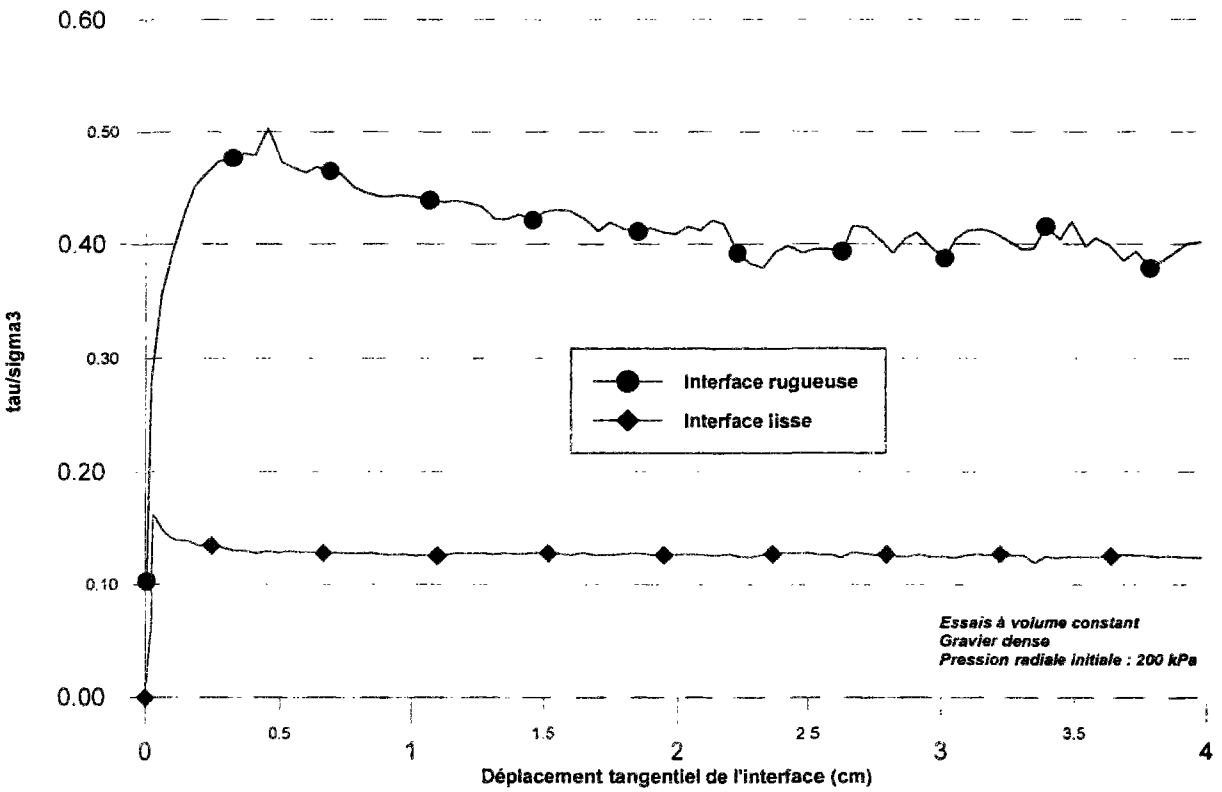


Figure F-3. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun dense, interface lisse et rugueuse, volume constant*

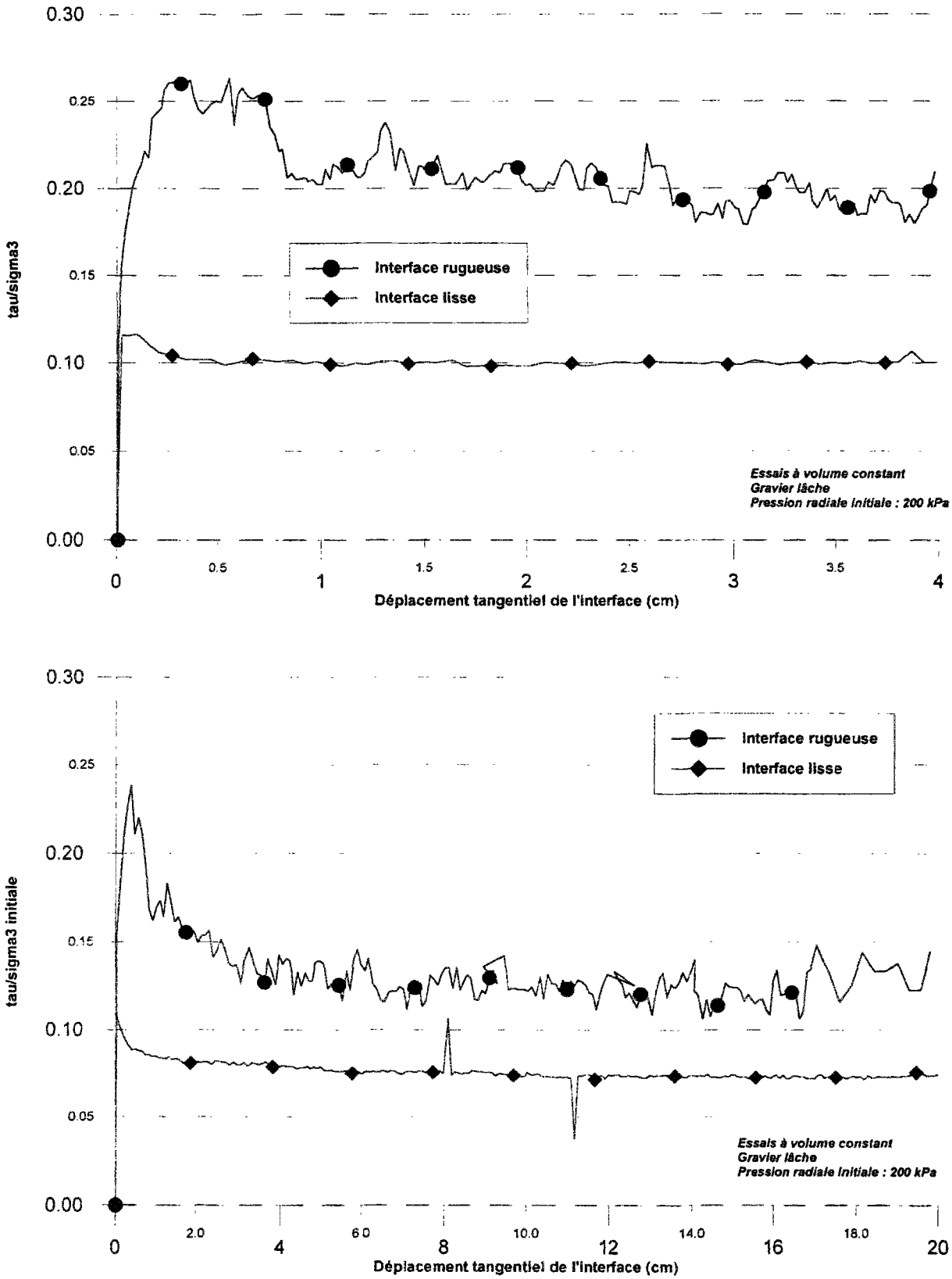


Figure F-4. *Courbes ($\mu^* = \tau/\sigma 3$ initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*

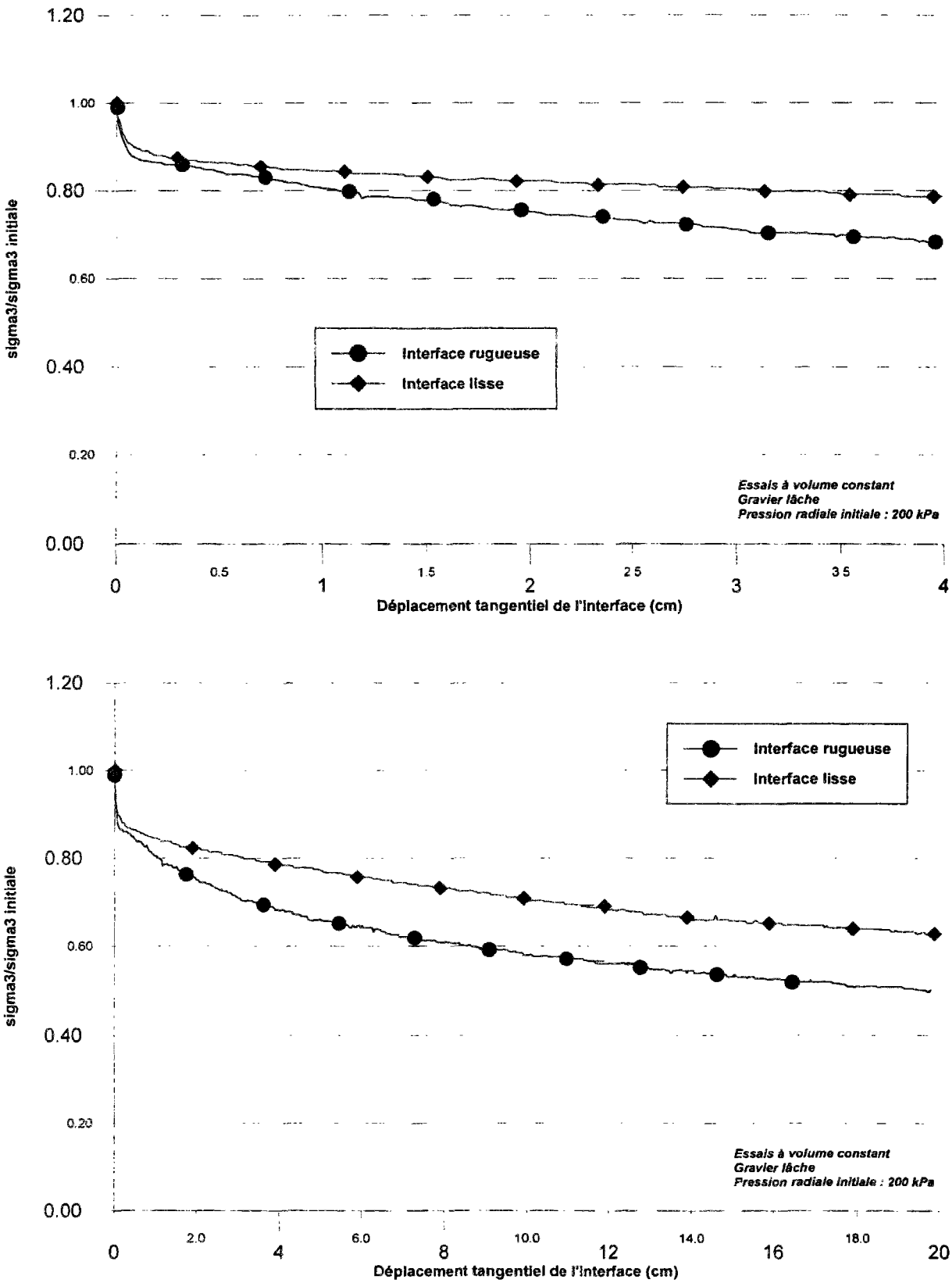


Figure F-5. *Courbes (σ3/σ3 initiale) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*

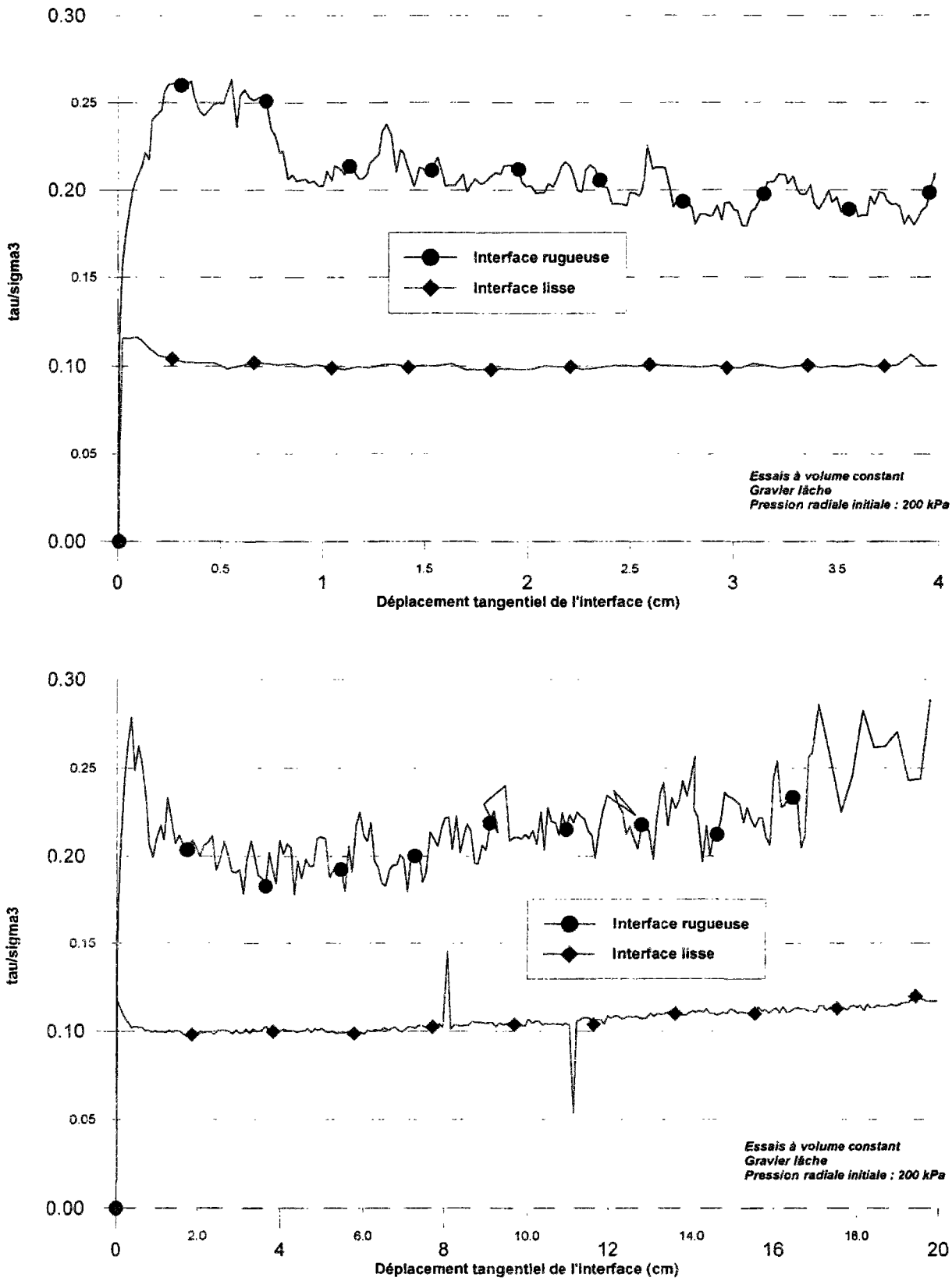


Figure F-6. *Courbes ($\mu = \tau/\sigma 3$) en fonction du déplacement tangentiel, gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*

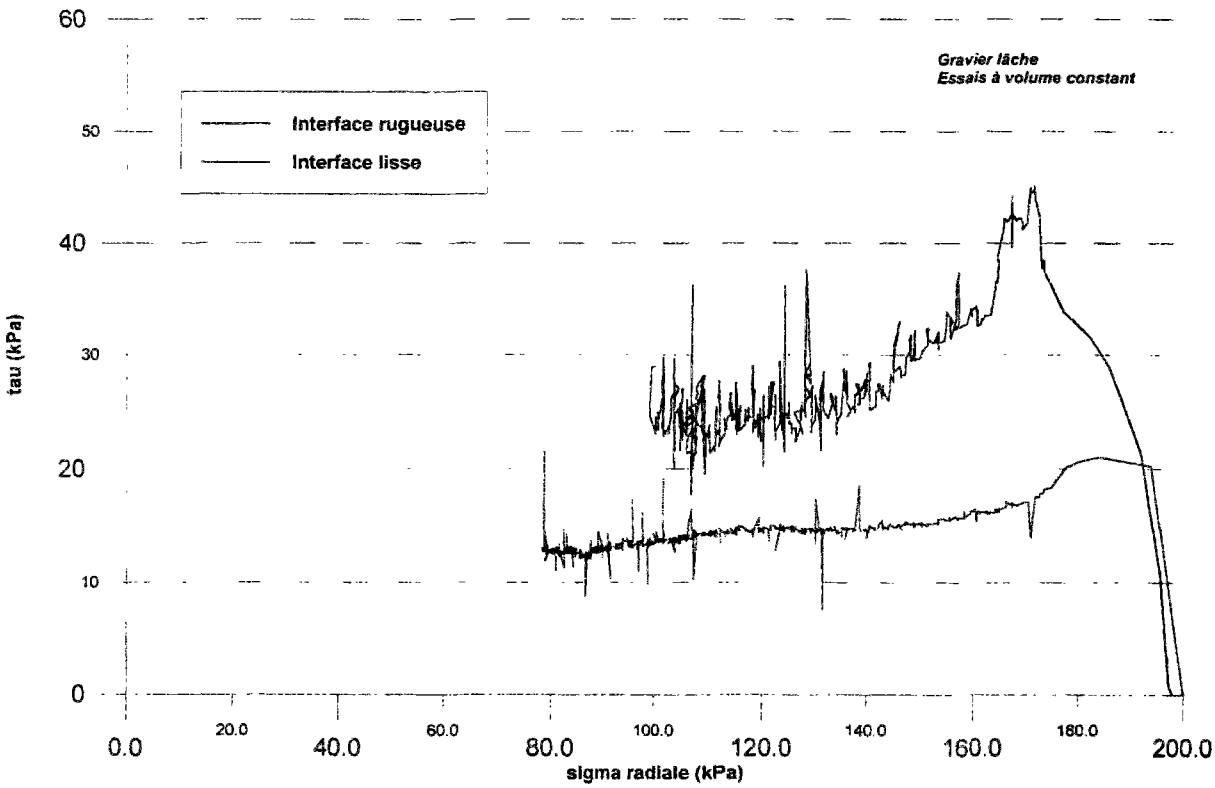


Figure F-7. *Chemins de contrainte dans le plan(τ, σ_n) gravier d'Hostun lâche, interface lisse et rugueuse, volume constant*