

50376
1989
21

50376
1989
21

THÈSE DE DOCTORAT

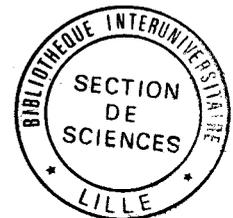
N° d'ordre 319

présentée
à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DE LILLE FLANDRES-ARTOIS

SPECIALITE GENIE CIVIL

par



Rabih CHEHADE

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT DES
GEOMATERIAUX PULVERULENTS SOUS DES
SOLLICITATIONS ROTATIONNELLES
- REALISATION D'UN APPAREILLAGE DE TORSION -**

Soutenu le 30 janvier 1989 devant le jury composé de :

MM. BOISSIER D.
ROBINET J.C.
MEIMON Y.
FLAVIGNY E.
HENRY J.P.
SHAHROUR I.

Université Lille I
ESEM Orléans
I.F.P.
Université Grenoble
Université Lille I
Université Lille I

Président
Rapporteur
Rapporteur

AVANT-PROPOS

Le présent travail a été mené au Laboratoire de Génie Civil de Lille. Il en résulte d'une collaboration entre l'Université des Sciences et Techniques de Lille et l'Institut Industriel du Nord.

Que toutes les personnes qui, par leurs conseils et encouragements, m'ont permis d'arriver au terme de ce travail, trouvent ici l'expression de ma gratitude.

Ce travail n'existerait pas sans l'aide de M. SHAHROUR qui a assuré la direction de la 2ème partie de cette thèse avec grande compétence et parfaite disponibilité.

Mr ROBINET a assuré la direction de la 1ère partie de cette thèse, je lui adresse mes chaleureux remerciements.

Monsieur le Professeur BOISSIER a accepté de présider ce jury qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude.

Messieurs MEIMON et FLAVIGNY ont accepté, au milieu de leurs multiples tâches, de participer au jury. Je leur adresse mes remerciements les plus vifs.

Je tiens également à remercier Monsieur le Professeur HENRY d'avoir accepté de participer au jury et pour ses encouragements.

La dactylographie de ce mémoire a été assurée par Mme HENRY, qu'elle trouve ici mes sincères remerciements.

NOTATIONS ET FORMULES

<p>Re</p> <p>Ri</p> <p>H</p> <p>Fz</p> <p>M_t</p> <p>U</p> <p>ψ</p> <p>$\varepsilon_z = \Delta H / H_0 = \text{EPS } 3$</p> <p>$\varepsilon_r = (\Delta R_e - \Delta R_i) / (R_e - R_i)$</p> <p>$\varepsilon_\theta = (\Delta R_e - \Delta R_i) / (R_e - R_i)$</p> <p>$2\varepsilon_{z\theta} = \gamma = \delta / H = \psi (R_e - R_i) / 2H = \text{GAMA}$</p> <p>$\varepsilon_v = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} + \varepsilon_{III} = \text{EPSV}$</p> <p>$\sigma_z = Fz / \pi(R_e^2 - R_i^2) = \text{Sig } 3$</p> <p>$\sigma_r = \text{Sig } 2$</p> <p>$\sigma_\theta = \text{Sig } 1$</p> <p>$\sigma_{\theta z} = 3M_t / 2\pi(R_e^3 - R_i^3) = \text{Sig } 13$</p> <p>$\sigma_{III} = (\sigma_z + \sigma_\theta) / 2 + ((\sigma_z - \sigma_\theta) / 2)^2 + \sigma_{\theta z}^2$</p> <p>$\sigma_{II} = \sigma_r$</p> <p>$\sigma_I = (\sigma_z + \sigma_\theta) / 2 - ((\sigma_z - \sigma_\theta) / 2)^2 + \sigma_{\theta z}^2$</p> <p>$Q = (\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + 3 \sigma_{\theta z}^2$</p> <p>$\alpha = \alpha_\theta = 0,5 \text{ Arctg } (2 \sigma_{\theta z} / (\sigma_z - \sigma_\theta))$</p>	<p>rayon extérieur</p> <p>rayon intérieur</p> <p>hauteur de l'échantillon</p> <p>force axiale</p> <p>couple de torsion</p> <p>pression interstitielle</p> <p>angle de rotation de l'embase tournante</p> <p>déformation axiale</p> <p>déformation radiale</p> <p>déformation orthoradiale</p> <p>distorsion</p> <p>déformation volumique</p> <p>contrainte axiale</p> <p>contrainte radiale</p> <p>contrainte orthoradiale</p> <p>contrainte de cisaillement (tangentielle)</p> <p>contrainte principale majeure</p> <p>contrainte principale intermédiaire</p> <p>contrainte principale mineure</p> <p>contrainte déviatorique</p> <p>angle de rotation de σ_I et σ_{III}</p>
---	--

$P = (\sigma_I + \sigma_{II} + \sigma_{III})/3$	pression moyenne
$b = (\sigma_{II} - \sigma_I) / (\sigma_{III} - \sigma_I)$	paramètre caractérisant σ_{II}
$S_{ij} = \sigma_{ij} - 1/3 \delta_{ij} \text{ trace } \sigma$	contrainte déviatorique
$J_2 = 1/2 S_{ij} S_{ij}$	2e invariant du tenseur S
$J_3 = 1/2 S_{ij} S_{jk} S_{ki}$	3e invariant du tenseur S
$\theta = 1/3 \text{ Arc sin } (-3 \sqrt{3/2} J_3 / (J_2)^{3/2})$	angle de Lode

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
I DEVELOPPEMENT D'APPAREILLAGES EN MECANIQUE DES SOLS	
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 APPAREILS DE CISAILLEMENT	3
I.3 APPAREIL TRIAXIAL DE REVOLUTION	4
I.4 APPAREIL VERITABLE - TRIAXIAL	5
I.5 APPAREIL DE TORSION	6
1.5.1 Appareil de Lade	9
1.5.2 Appareil d'Ishihara	11
II DEVELOPPEMENT D'UNE MACHINE DE TORSION	
II.1 INTRODUCTION	12
II.2 FORME ET DIMENSIONS DE L'ECHANTILLON	13
II.3 LES EMBASES	14
II.4 LE MOULAGE	15
II.5 LA PRESSE TRIAXIALE	16
II.6 LE SYSTEME MECANIQUE DE TORSION	17
II.7 LE SYSTEME DE SATURATION ET DE CONTRE-PRESSION	20

II.8	INSTRUMENTATION	22
II.8.1	Force axiale	22
II.8.2	Déplacement axial	23
II.8.3	Couple de torsion	23
II.8.4	Distorsion	23
II.8.5	Variation de volume	24
II.8.6	Pression interstitielle	24
II.8.7	Pressions de confinement et de contre-pression	25
II.9	SYSTEME D'ACQUISITION ET DE CONTROLE	25
II.9.1	Introduction	25
II.9.2	Processus d'acquisition et de contrôle	25
II.9.3	Chemins de sollicitation	26
	1. triaxiaux conventionnels	26
	2. torsion à contrainte axiale imposée	27
	3. torsion à déformation axiale imposée	27
	4. b constant	27
II.10	DETERMINATION DES ETATS DE CONTRAINTES ET DES DEFORMATIONS	28
II.10.1	Introduction	28
II.10.2	Etat des contraintes	29
II.10.3	Etat des déformations	30

III MODE OPERATOIRE ET SOURCES D'ERREURS

III.1	INTRODUCTION	31
III.2	MODE OPERATOIRE	31
III.2.1	Préparation du sable	31
III.2.2	Montage de l'échantillon	31
III.2.3	Saturation	32
III.2.4	Démoulage de l'échantillon et montage de la cellule	32
III.2.5	Consolidation	32
III.2.6	Contrôle de la saturation	33
III.2.7	Application du chemin de chargement	33

III.3	SOURCES D'ERREURS	33
III.3.1	Erreurs d'appareillages	33
III.3.2	Erreurs dues au matériau	34
III.4	REPETITION D'UN ESSAI DE TORSION	34

IV PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS

IV.1	INTRODUCTION	37
IV.2	COMPORTEMENT DES SABLES SOUS CHARGEMENTS MONOTONES	37
IV.2.1	Essais triaxiaux conventionnels	37
IV.2.1.1	Résultats obtenus	37
IV.2.1.2	Hétérogénéité de l'échantillon	39
IV.2.1.3	Surface de rupture et état caractéristique	43
IV.2.2	Essais de torsion monotone	44
IV.2.2.1	Introduction	44
IV.2.2.2	Essais de torsion drainés à contrainte axiale imposée	44
IV.2.2.3	Essais de torsion non drainés à contrainte axiale imposée	46
IV.2.2.4	Essais de torsion drainés à déformation axiale imposée	48
IV.2.2.5	Essais de torsion non drainés à déformation axiale imposée	51
IV.2.2.6	Homogénéité de l'échantillon au cours de l'essai	56
IV.2.2.7	Surface de rupture et état caractéristique	57
IV.2.2.8	Existence d'un domaine élastique	58
IV.2.2.9	Essais à b constant	59
IV.2.3	Effet de l'histoire de chargement	64
IV.2.3.1	Introduction	64
IV.2.3.2	Effet du déviateur initial	64
	1. essais à contrainte axiale imposée	65
	2. essais à déformation axiale imposée	67
IV.2.3.3	Effet d'un préchargement cyclique	70
	1. Essai à contrainte axiale imposée - Effet d'un cycle de chargement	71

	2. Essai à déformation axiale imposée - Effet d'un cycle de chargement	71
	3. Essai à déformation axiale imposée - Effet des cinq cycles de chargement	74
	IV.2.3.4 Effet du chemin de sollicitation.....	74
IV.3	ESSAIS CYCLIQUES	77
IV.3.1	Essais triaxiaux conventionnels.....	77
IV.3.1.1	Essai cyclique drainé	77
IV.3.1.2	Essai cyclique non drainé	79
IV.3.1.3	Effet des bornes des cycles sur la liquéfaction ..	81
IV.3.2	Essais cycliques de torsion non drainés.....	85
IV.3.2.1	Introduction	85
IV.3.2.2	Essais de référence	85
	IV.3.2.2.1 Essais de torsion à contrainte axiale imposée	85
	IV.3.2.2.2 Essai de torsion à déformation axiale imposée	88
IV.3.2.3	Effet des bornes des cycles	91
IV.3.2.4	Effet du niveau moyen des cycles	95
IV.3.2.5	Effet du déviateur initial	97
	IV.3.2.5.1 Essai à contrainte axiale imposée ..	97
	IV.3.2.5.2 Essai à déformation axiale imposée.	102

V	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	105
---	-----------------------------------	-----

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le dimensionnement des ouvrages complexes en génie civil comme les centrales nucléaires, les barrages, les plates-formes pétrolières nécessite une modélisation fine du comportement des sols. Or, le comportement des sols est très complexe (non linéaire, irréversible, anisotrope, dépendant de l'histoire de chargement, de la direction et de l'incrément des sollicitations, ...). Sa modélisation ne peut être abordée sans l'observation en laboratoire de la réponse du matériau à divers chemins de sollicitation. En effet, les essais en Laboratoire permettent de :

- Déceler les aspects particuliers du comportement des sols.
- Valider les hypothèses formulées dans les modèles.
- Déterminer les paramètres des modèles proposés.

Par leur constitution, les sols ont un comportement qui dépend de la cinématique de sollicitation ; en effet, les sollicitations qui font intervenir des rotations des axes principaux des contraintes et des déformations dans les sols (forts cisaillements, séismes, zones d'interfaces, ...) peuvent engendrer des désordres dans les ouvrages, et mettre en péril leur tenue.

L'objectif recherché dans ce travail est l'étude en laboratoire du comportement des sols sous divers chemins de sollicitation. Un appareil de torsion a été ainsi développé pour cette étude. Cet appareil permet de reproduire les chemins conventionnels connus (les essais triaxiaux de compression et d'extension en condition drainée et non drainée) et des chemins plus complexes (les essais radiaux dans le plan déviatorique (b constant), les essais de torsion à contrainte ou déformation axiale imposée en conditions drainée et non drainée).

Cet appareillage a été utilisé pour l'étude du comportement du sable fin d'HOSTUN. Un nombre important d'essais a été ainsi réalisé. Ces essais ont permis de mettre en évidence des aspects particuliers du comportement du sable et de constituer une banque d'essais qui peut être utilisée pour le développement et la validation des modèles rhéologiques.

Ce rapport est composé de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous présentons le développement d'appareillages en mécanique des sols, et l'apparition des appareils de torsion.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons la construction d'une machine de torsion qui a servi pour la réalisation des essais sur le sable d'HOSTUN. Dans ce chapitre, nous décrivons les modifications apportées à une presse triaxiale existante puis la partie mécanique de torsion et enfin le système d'instrumentation, d'acquisition et de contrôle.
- Dans le troisième chapitre, nous décrivons le mode opératoire suivi pour la réalisation des essais et les sources d'erreurs commises.
- Enfin, dans le dernier chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés (triaxiaux conventionnels, torsion à contrainte ou déformation axiale imposée monotones et cycliques en conditions drainées et non drainées, b constant). Ce chapitre met en évidence l'effet de l'histoire de chargement sur le comportement des sables et les conditions de liquéfaction sous des chemins cycliques en torsion.

CHAPITRE I

I) DEVELOPPEMENT D'APPAREILLAGES D'ESSAIS EN MECANIQUE DES SOLS

I.1) INTRODUCTION

L'étude des propriétés mécaniques des sols a nécessité la conception d'appareillages spécifiques permettant l'application, sur des petits échantillons des sols, de différents types de chemins de sollicitations.

En effet, par leur constitution, les sols ont un comportement qui dépend sensiblement des chemins de chargements ; il était alors indispensable de développer des appareillages qui permettent de reproduire, en laboratoire, le maximum de chemins que les sols peuvent subir dans les ouvrages.

Les premiers appareillages ont été développés pour la détermination des caractéristiques de résistance et de compressibilité des sols (oedomètres, appareils de cisaillement et triaxiaux de révolution). Ensuite, et grâce aux progrès technologiques et de l'informatique, de nouveaux appareils ont été mis au point pour l'analyse des propriétés mécaniques des sols avant rupture (appareil triaxial de révolution perfectionné, véritable triaxial, et appareil de torsion au cylindre creux).

Nous allons, ci-après, décrire brièvement les principaux appareillages, utilisés actuellement en mécanique des sols.

I.2) APPAREILS DE CISAILLEMENT

Les appareils de cisaillement sont largement employés en géotechnique ; ils permettent la détermination des propriétés de résistance des sols. Ces appareils peuvent être classés en deux catégories : Appareil de cisaillement simple ou direct.

Dans les appareils de cisaillement simple, on applique sur la face supérieure d'un échantillon, à section circulaire (Kjellman (1951)), ou carrée (Roscoe (1953)), un effort normal et un déplacement horizontal. Ce dernier génère des cisaillements dans l'échantillon.

Dans les appareils de cisaillement direct, l'échantillon est entouré de deux demi-boîtes à section carrée (Casagrande (1941-1953)) ou circulaire (Hvorslev (1952)). Pour ce type d'appareils, la rupture se produit selon une surface imposée (horizontale). Les appareils de cisaillement sont bien adaptés pour la détermination des propriétés des sols à la rupture. Mais ils ne peuvent pas être utilisés pour une modélisation fine du comportement des sols. En effet, au cours d'un essai à l'appareil de cisaillement, l'échantillon est soumis à une distribution hétérogène des contraintes (fig. I.1), ce qui rend difficile une interprétation fine des mesures enregistrées.

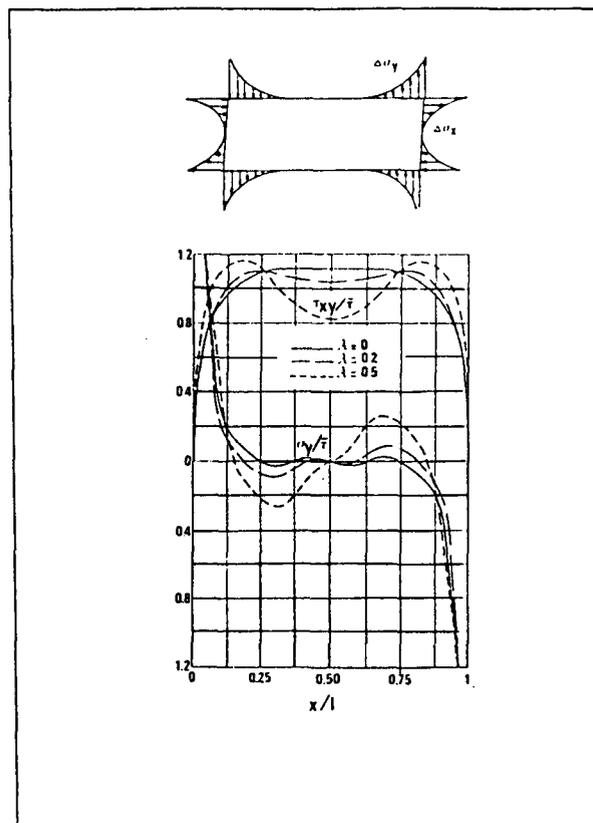


Fig. I.1 : Contraintes sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon suivant le cisaillement simple

I.3) APPAREIL TRIAXIAL DE REVOLUTION

L'appareil triaxial de révolution (Bishop et Henkel (1962)) joue un rôle important en mécanique des sols tant au niveau industriel qu'en recherche. Le principe de cet appareillage est simple, il consiste à appliquer sur un échantillon cylindrique de sol, entouré d'une membrane et placé dans une cellule triaxiale, une pression de confinement et une force verticale tout en contrôlant le drainage (ouvert ou fermé).

De nombreuses améliorations ont été apportées à cet appareillage afin de diminuer l'hétérogénéité de l'échantillon en cours d'essai : Dispositif anti-fretage, (Mohkam (1983)), optimisation de la forme de l'échantillon, introduction des têtes rotulées, ... Avec les progrès technologiques et en matière d'asservissement,

l'appareil triaxial de révolution permet actuellement d'étudier le comportement des sols sur des chemins de sollicitations complexes (cycliques, radiaux, circulaires ...) (Doanh (1984)). Malgré ses performances, l'appareil triaxial de révolution ne permet pas de reproduire des chemins du type véritable triaxial ou comportant des rotations des axes principaux.

1.4) APPAREIL VERITABLE-TRIAXIAL

L'appareil véritable triaxial (Pearce (1971), Lade et Duncan (1973)) a été conçu pour l'étude du comportement des sols sur des chemins dont les trois composantes peuvent être contrôlées indépendamment (chemins radiaux dans le plan déviatorique, chemins particuliers pour l'étude de l'anisotropie induite, ...).

Le principe de cet appareil consiste à appliquer sur les faces d'un échantillon cubique des déplacements ou des forces engendrant ainsi des contraintes et des déformations dont les directions principales sont parallèles aux côtés de l'échantillon. Les appareils véritables-triaxiaux peuvent être classés en trois catégories :

- Appareils à déformations contrôlées,
- Appareils à contraintes contrôlées,
- Appareils mixtes.

Les appareils à déformations contrôlées sont équipés de plateaux rigides dont leurs déplacements relatifs génèrent des déformations dans l'échantillon (fig.1.2). Afin de diminuer le frottement entre les plateaux et l'échantillon, ce dernier est généralement entouré des membranes graissées. Ce type d'appareil a été conçu pour les chemins à déformations imposées, mais grâce à l'asservissement informatique, il peut être utilisé pour réaliser des chemins à contraintes contrôlées.

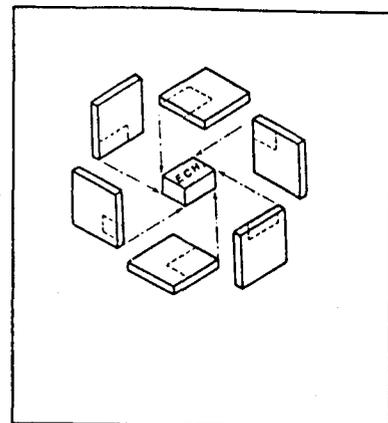


Fig. 1.2 : Disposition des plateaux rigides dans le vrai triaxial

Dans le deuxième type d'appareils, les contraintes sont générées par l'application sur les faces de l'échantillon, de pressions à l'aide de l'air comprimé ou d'un fluide.

Pour les appareils mixtes, les sollicitations en déformations sont appliquées par des déplacements de plateaux rigides, celles en contraintes sont imposées par l'application des pressions sur la face de l'échantillon.

1.5) APPAREILS DE TORSION

Malgré les nombreuses possibilités qu'offrent les appareillages présentés précédemment (cisaillement, triaxial de révolution, véritable triaxial), ils ne permettent pas une étude fine du comportement des sols sur des chemins comportant des rotations des axes principaux. Or, dans la pratique, les sollicitations appliquées aux ouvrages en terre génèrent du cisaillement, qui, à son tour, provoquent des rotations des axes principaux des contraintes. Les figures (I.3.a et I.3.b), (I.4), (I.5) montrent les rotations des axes principaux des contraintes sous une fondation de plate-forme (SHAHROUR et al (1987)), autour d'un tunnel (GUELLEC (1972)) et dans un sol sous-marin (ISHIHARA et al (1983)), on peut constater d'après ces figures, que des rotations des axes principaux, parfois importantes, se produisent dans ces ouvrages et dans des zones qui peuvent être très étendues.

L'impact que peuvent avoir les rotations des axes principaux sur la tenue des ouvrages a poussé des ingénieurs et des chercheurs à développer des appareils de torsion pour l'étude du comportement des sols en cinématique rotationnelle (Lade, (1975), Hardin et Drevich, (1972), Ishihara et al (1972), Robinet et al (1983), Golchech (1986), Kerchafi (1988)).... Le principe de ces appareils consiste à appliquer sur un échantillon de sol en cylindre creux, entouré de deux manchettes, une combinaison des contraintes latérales (de confinement), axiale et du cisaillement. Grâce à l'asservissement informatique, l'appareil de torsion peut reproduire des chemins véritables-triaxiaux, et de nombreux chemins comportant des rotations des axes principaux. Nous allons décrire, ci-après, brièvement deux de ces appareillages .

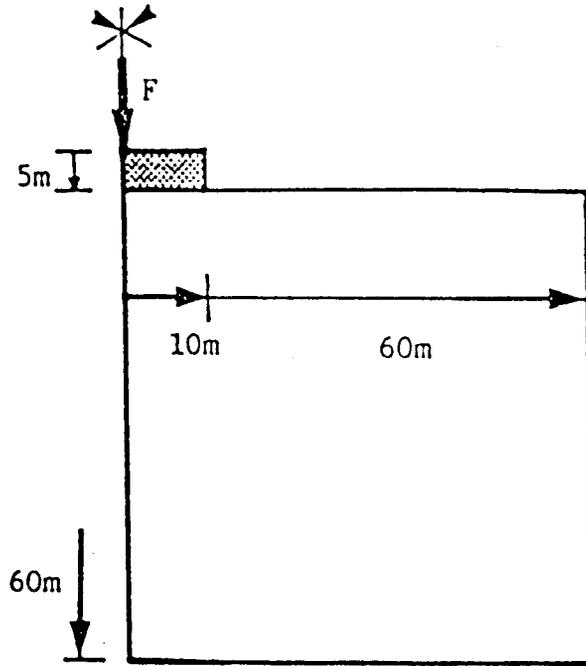


Fig. I.3.a : Caractéristiques de l'ouvrage
Shahrour et al (1986)

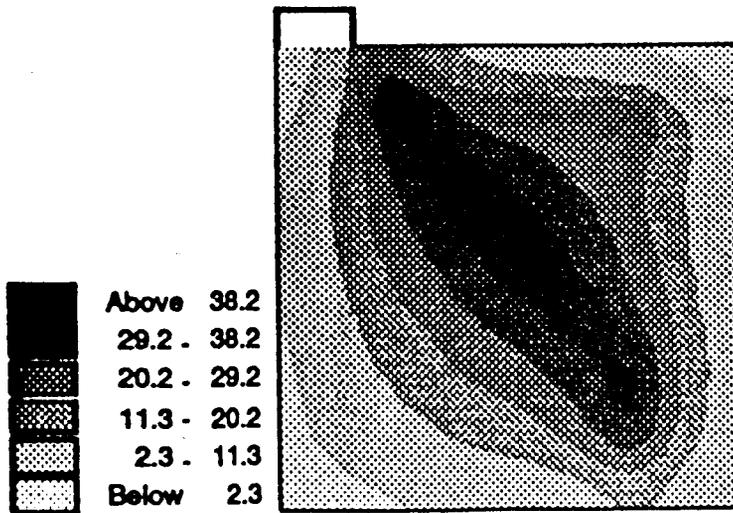


Fig. I.3.b : Niveaux de rotation des axes principaux

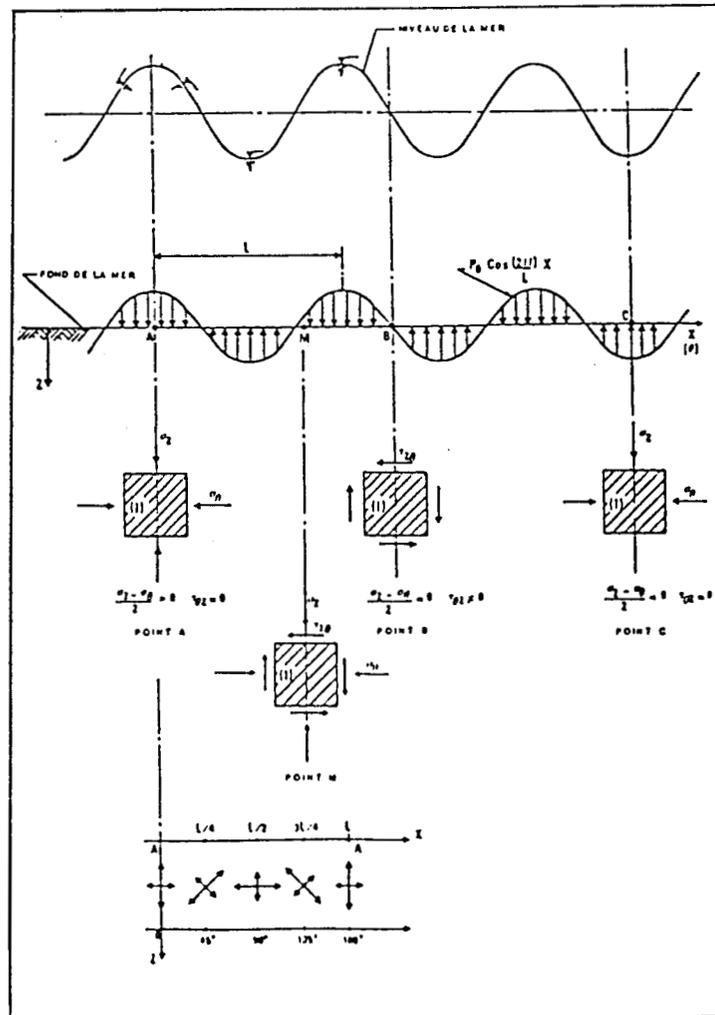
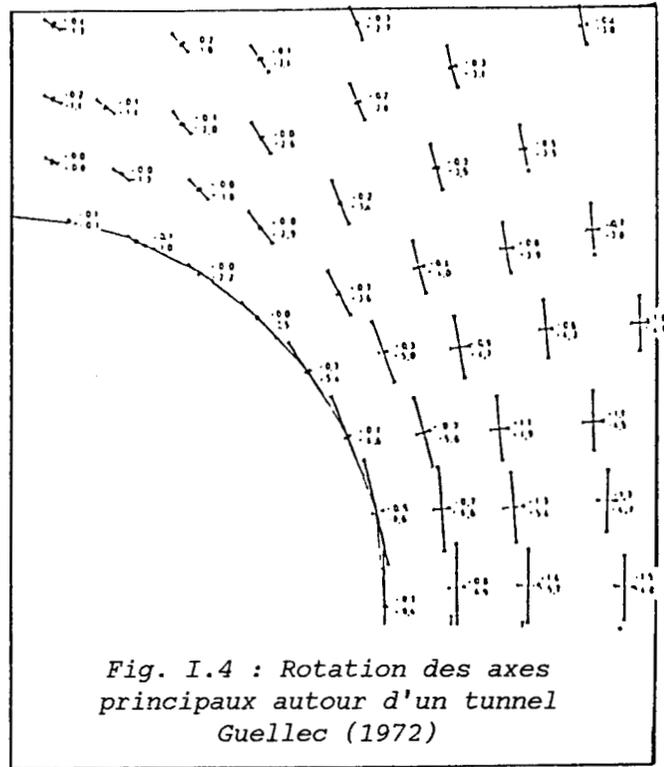


Fig. I.5 : Rotation des axes principaux dans un fond marin
Ishihara et al (1983)

I.5.1) Appareil de torsion de Lade

Lade (1975) a mis au point un appareil de torsion (fig. I.6) afin d'étudier le comportement des sols sous différents chemins de sollicitations.

Le principal défaut de cet appareil réside dans les limites imposées à son angle de rotation maximale.

Les principales caractéristiques de cet appareil sont :

- la pression intérieure peut être différente de la pression extérieure,
- le couple de torsion est appliqué par deux cylindres de pression couplés .
Il est mesuré par quatre jauges de déformation.

Durant l'essai, on mesure :

- la force et le déplacement axial,
- le moment de torsion et la distorsion,
- l'épaisseur de l'échantillon grâce à une pince,
- la variation de volume,
- l'évolution du diamètre extérieur grâce à un collier de mesure.

L'échantillon est un cylindre creux de 5 cm de hauteur, 22 cm de diamètre extérieur et de 18 cm de diamètre intérieur.

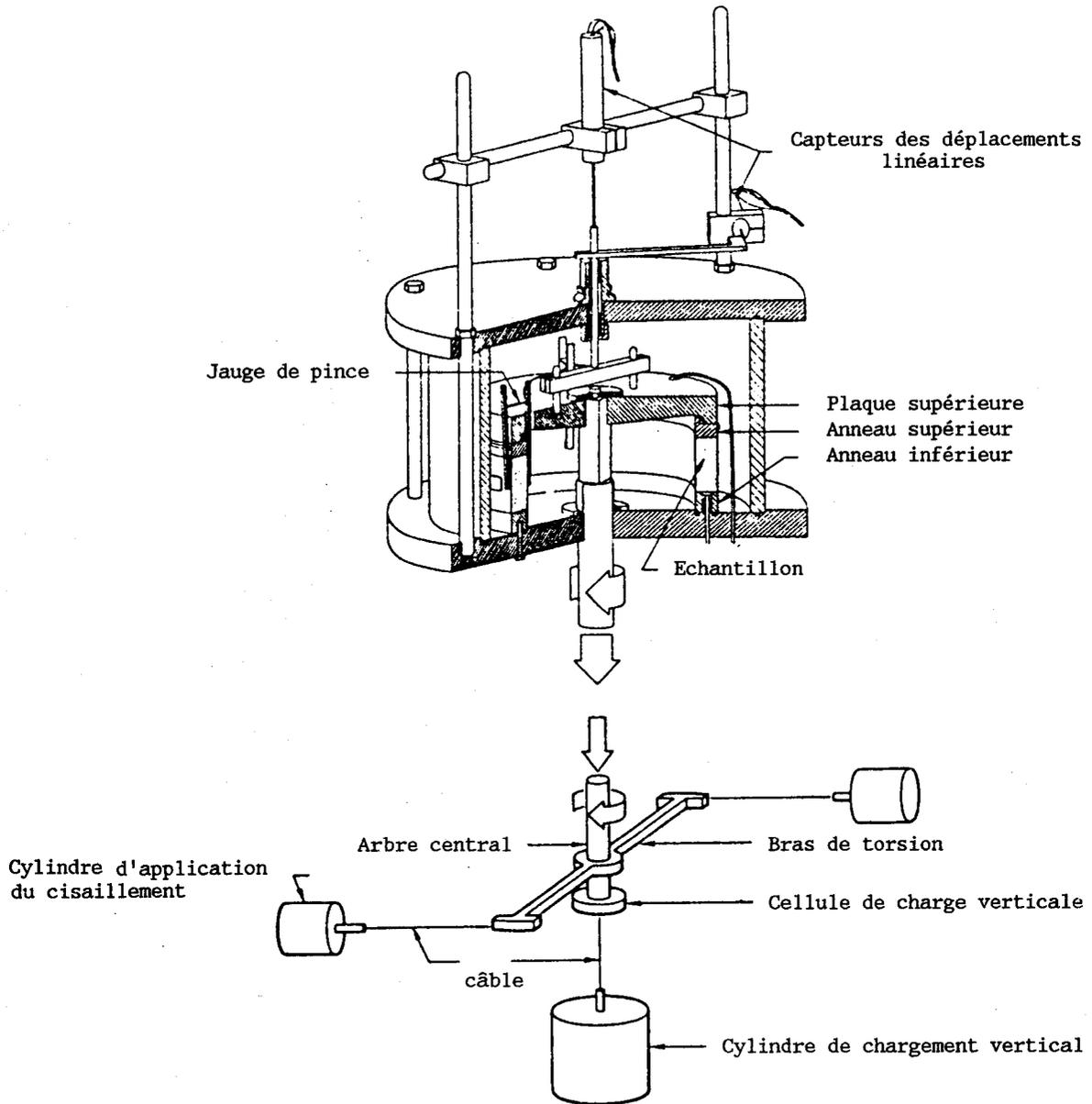


Fig. I.6 : Appareil de torsion.(Lade)

I.5.2 Appareil de torsion de ISHIHARA

ISHIHARA, (1972,1975,1979) a mis au point un appareil de torsion (fig. I.7) pour étudier le comportement des sables sous chargements cycliques en cinématique rotationnelle.

Dans cet appareil, la pression intérieure peut être différente de la pression extérieure, le couple de torsion est appliqué par un système hydraulique installé sur la partie supérieure de la presse, ce qui peut générer des vibrations au cours de l'essai.

L'échantillon est un cylindre creux de 10,4 cm de hauteur, 4 cm d'épaisseur et de 8 cm de diamètre moyen.

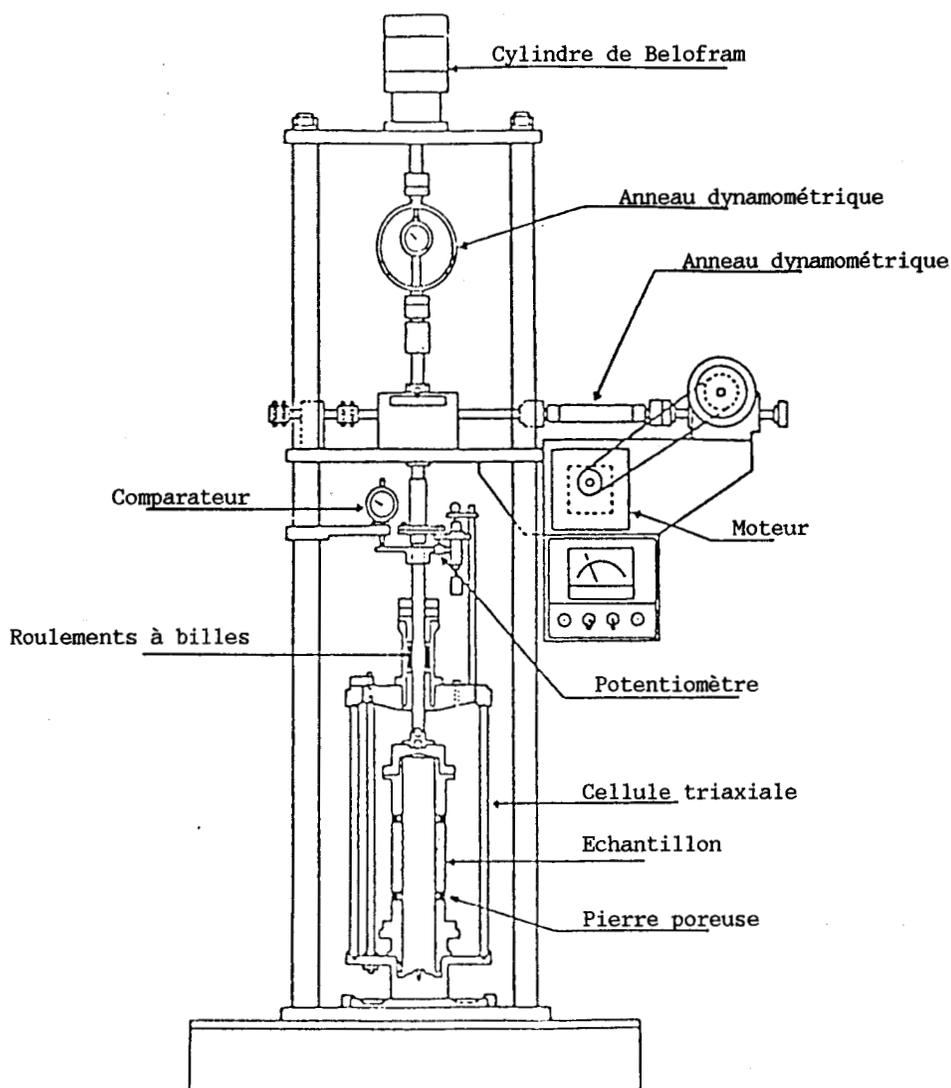


Fig. I.7 : Appareil d'Ishihara

CHAPITRE II

II) DEVELOPPEMENT D'UNE MACHINE DE TORSION

II.1) Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'appareil de torsion, réalisé au Laboratoire de Génie Civil de Lille, en vue de l'étude du comportement des sols sur des chemins en cinématique rotationnelle et irrotationnelle.

Le cahier des charges de cet appareil stipulait la fabrication d'une machine permettant de réaliser, sur des échantillons de sables en cylindre creux, de nombreux chemins de sollicitations, notamment :

- Les chemins triaxiaux conventionnels ;
- Des chemins de torsion à contrainte ou déformation imposée,
- Des chemins de torsion cyclique en vue de l'étude de la liquéfaction en cinématique rotationnelle.

La réalisation de cette machine a nécessité des modifications importantes sur un appareil triaxial existant afin d'introduire la torsion (Leroyer F. (1985)). L'appareil réalisé est composé de trois parties à savoir (fig. II.1) :

- Une partie motrice regroupant une presse triaxiale et un système de torsion.
- Un panneau de saturation et de contrôle de la pression de confinement.
- Un système de contrôle et d'acquisition des données comprenant un micro-ordinateur, une centrale d'acquisition et une armoire électronique.

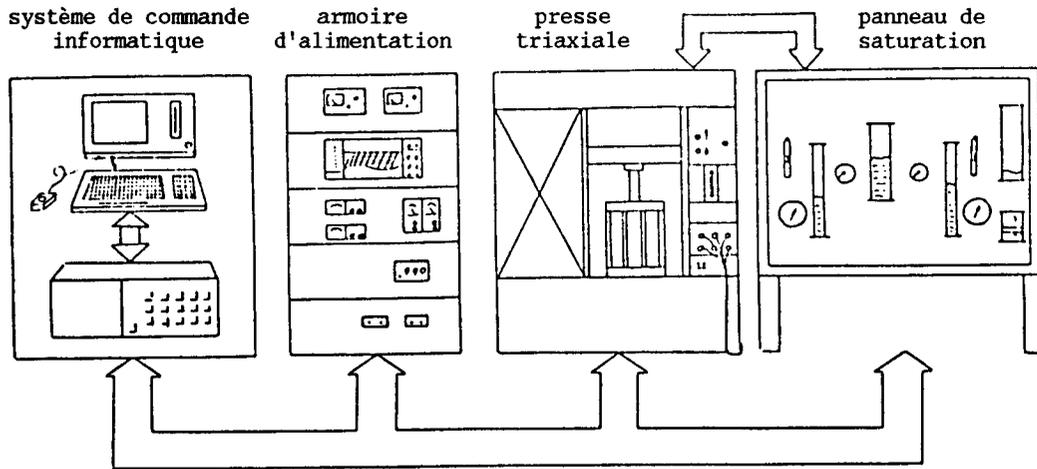


Fig. II.1 : L'INSTALLATION

II.2) Forme et dimension de l'échantillon

Des études ont été réalisées pour l'optimisation des dimensions de l'échantillon afin de diminuer les hétérogénéités créées au cours de l'essai de torsion. Ces études ont montré que l'homogénéité dans l'échantillon s'améliore lorsque :

- l'épaisseur de l'échantillon diminue (fig. II.2)
- le rayon moyen augmente (fig. II.3) (Higt et al (1983))
- la hauteur de l'échantillon est proche de son diamètre (Lade (1976, 1979, 1981), Saada et Townsend (1981)).

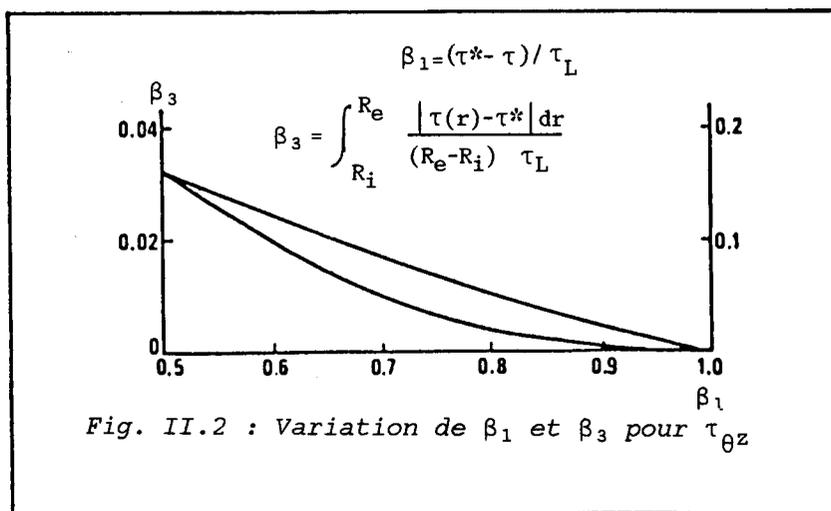
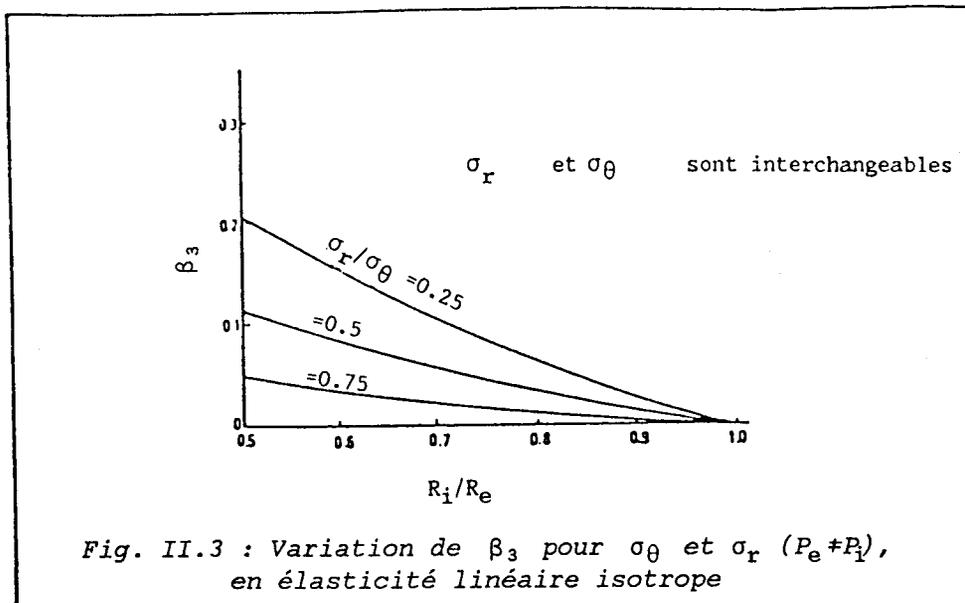


Fig. II.2 : Variation de β_1 et β_3 pour $\tau_{\theta z}$



En tenant compte des recommandations évoquées ci-dessus et des impératifs technologiques, nous avons retenu pour notre échantillon les dimensions suivantes :

- Rayon extérieur $R_e = 9$ cm
- Rayon intérieur $R_i = 7,5$ cm
- Hauteur $H = 18$ cm
- Epaisseur $e = 1,5$ cm

II.3) Les embases :

Dans un essai de torsion, les embases assurent les fonctions du drainage et de transmission des efforts sur l'échantillon.

Le drainage s'effectue à l'aide des plaques de téflon comportant des pastilles de bronze frittées, la circulation d'eau s'effectue à travers ces pastilles de bas en haut. L'effort de torsion est appliqué sur l'embase inférieure, celui-ci est repris au niveau de l'embase supérieure par un couvercle (fig.II.4)

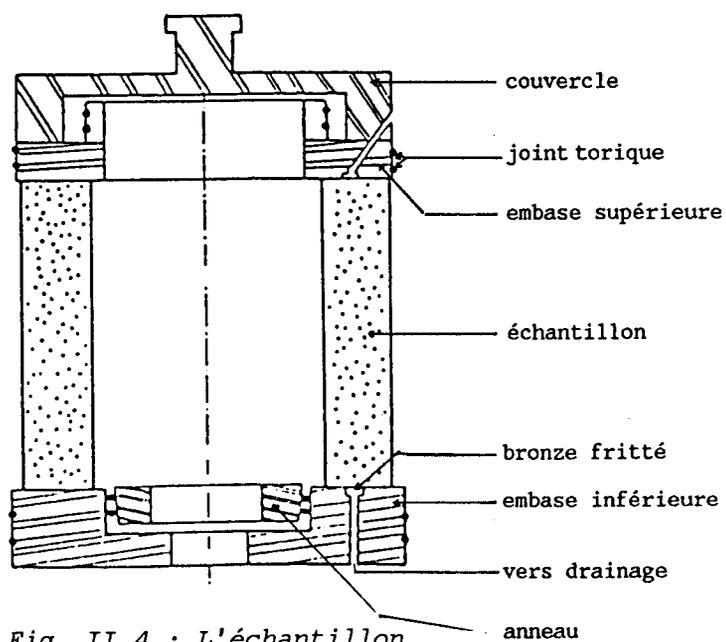


Fig. II.4 : L'échantillon avec ses embases

II.4) Le moulage

Le moulage de l'échantillon s'effectue à l'aide de deux moules :

- Un moule extérieur semblable à celui utilisé dans l'essai triaxial conventionnel par Al Mukhtar, (1986).
- Un moule intérieur composé de quatre parties qui peut être démonté sans détérioration de l'échantillon.

Les deux moules sont emboîtés dans les embases inférieure et supérieure (fig. II.5).

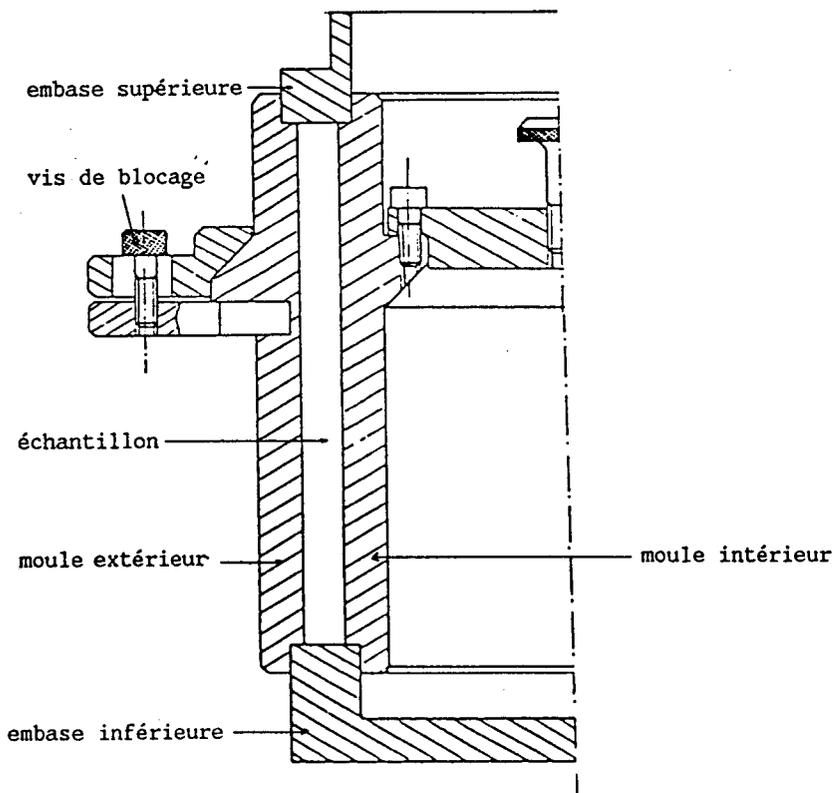


Fig. II.5 : Moule intérieur et extérieur

Afin de tendre au maximum les membranes destinées à recevoir le sable, on impose une dépression à l'intérieur des moules, à l'aide d'une série de petits trous percés sur les parois des moules en contact avec la membrane. Ces trous sont ensuite reliés à une pompe à vide volumétrique.

II.5) La presse triaxiale

L'appareil de torsion a été construit autour d'une presse mécanique INSTRON, modèle 1115 à vitesse de déformation contrôlée qui peut varier entre $5 \cdot 10^{-4}$ et 5 cm/min.

La traverse de la presse a été modifiée pour la réalisation d'un système de fixation de l'arbre qui reprend le moment de torsion au niveau de la partie supérieure de l'échantillon.

L'arbre de la presse a été modifié pour permettre la transmission du moment de torsion. Cet arbre est composé de trois parties (fig. II.6) :

- L'axe inférieur qui est fixé sur le système de torsion et relié à l'embase inférieure,
- L'axe central qui est relié à l'embase supérieure et qui traverse la couverture supérieure de la cellule,
- L'axe supérieur qui est fixé sur la traverse.

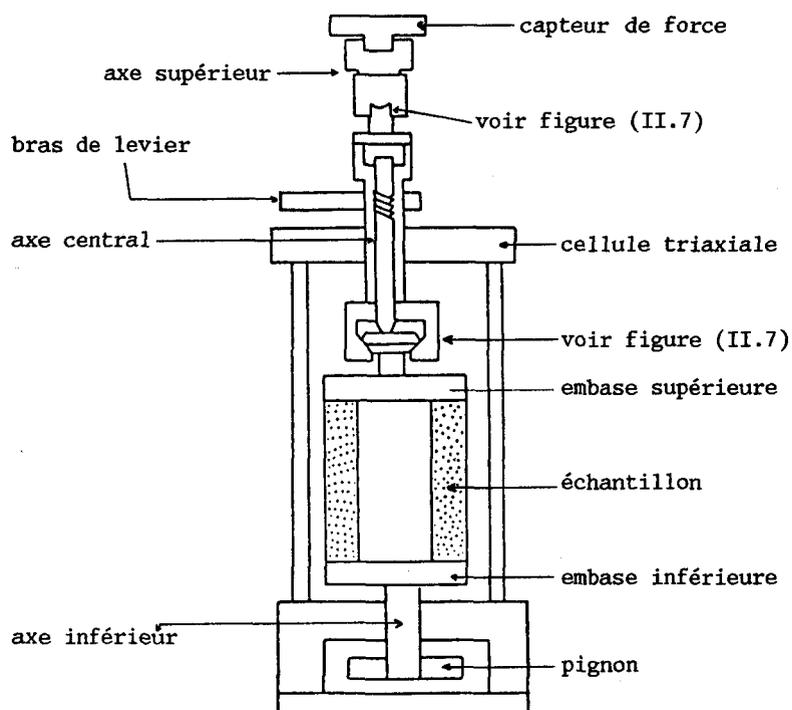


Fig. II.6 : Cellule et arbre de la presse triaxiale

L'axe supérieur est relié à l'axe central à l'aide de trois griffes, vissées sur l'axe supérieur, et qui tient l'axe central par serrage autour d'une bille logée à l'intérieur de l'axe supérieur (fig. II.7). Ce système de contact permet de centrer la charge axiale sans transmettre un couple de torsion à la partie supérieure de l'axe protégeant ainsi le capteur de force placé au-dessus de l'axe supérieur.

Ce système permet également d'effectuer des essais d'extension. Le système de fixation qui permet la transmission de la charge axiale et du moment de torsion entre l'axe central et l'embase supérieure est composé de :

- Trois encoches disposées en arc de cercle au bas de l'axe central.
- Une tige filetée ajustable.
- Un axe fixé sur l'embase supérieure comportant des tenons et des rainures correspondant aux encoches fixées sur l'axe central.

II.6) Le système mécanique de torsion

Le moment de torsion est appliqué par la rotation de l'embase inférieure. Il est mesuré à l'aide d'un capteur de force relié à un bras qui empêche la rotation de l'embase supérieure.

Le système mécanique de torsion est composé de (fig. II.8) :

- Deux vérins mécaniques (A et B)
- Un renvoi d'angle (C)
- Un moto-réducteur (D)

Le moto-réducteur utilisé dans l'appareil de torsion a les caractéristiques suivantes :

- Vitesse angulaire 0,01 à 8 tours/minute
- Couple maximal 900 kg*cm
- Rapport de réduction 1/120
- Stabilité de vitesse 3 %.

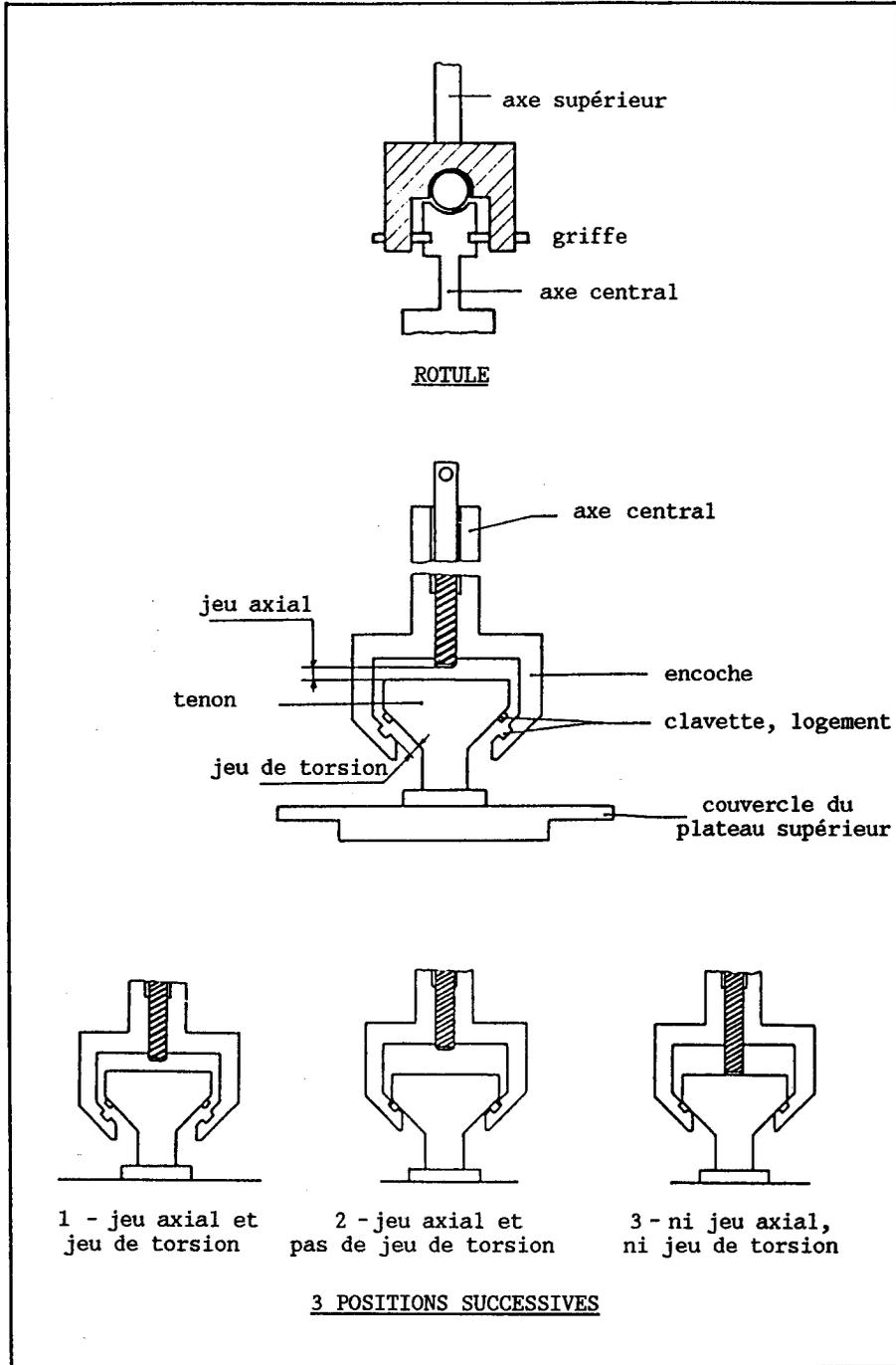


Fig. II.7 : Contact entre l'échantillon et l'arbre de la presse

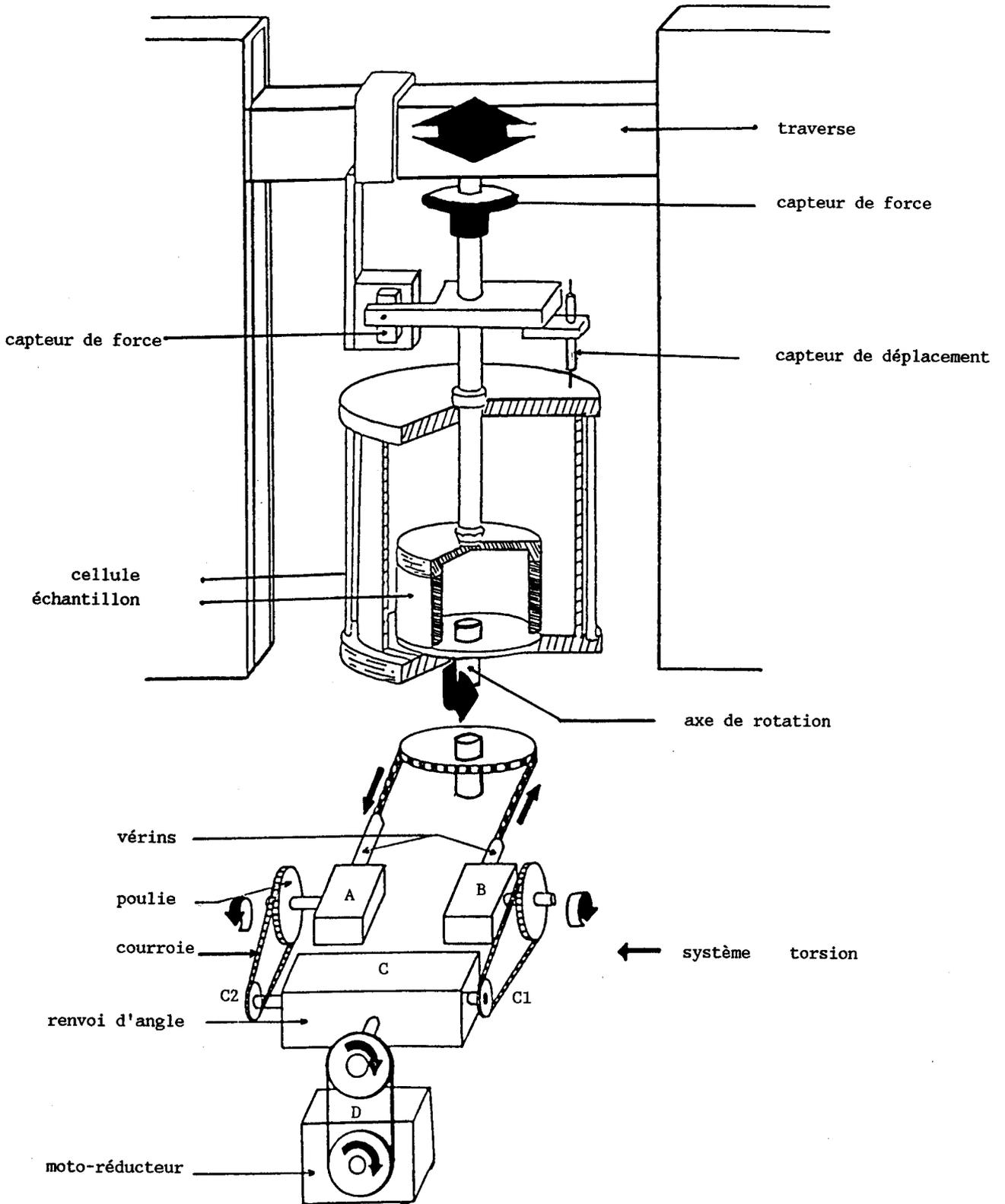


Fig. II.8 : Système mécanique de torsion

Le moteur fonctionne en double sens. Le changement de sens de rotation s'opère instantanément par des relais électriques. La vitesse de rotation est régulée grâce à un variateur électronique et stabilisée à 3 % indépendamment du couple de torsion appliqué.

Pour éviter la vibration dans le système de torsion, la partie motrice a été installée sur une table massive. L'autre partie a été montée sur un bâti en duraluminium fixé sur la presse.

La rotation de l'axe du moteur "D" est transmise au renvoi d'angle "C" mettant en rotation, dans deux sens opposés, les deux arbres coaxiaux C1 et C2.

Deux vérins mécaniques (A et B) reçoivent les mouvements rotatifs des arbres C1 et C2 et les transforment en déplacements linéaires, coplanaires et à vitesses identiques mais de sens opposés.

L'axe inférieur de la presse est relié aux deux arbres de vérins à l'aide d'une chaîne métallique et d'un pignon à moyeu fixe dont le diamètre est égal à la distance entre axe de deux arbres.

L'axe inférieur traverse ensuite la couverture du bas de la cellule triaxiale pour aboutir à l'embase inférieure de l'échantillon.

II.7) Le système de saturation et de contrepression

Le système de saturation et de contrepression a été réalisé au Laboratoire de Génie Civil de Lille (fig. II.9) (Al Mukhtar (1986)). Il comporte deux colonnes cylindriques en plexiglass (C1 et C2) de 150 mm de diamètre et 1 000 mm de hauteur qui servent à saturer l'échantillon. Elles peuvent être mises sous vide ou pression. Le vide différentiel dans l'échantillon est contrôlé à l'aide de deux vacuètres (V1 et V2) qui sont reliés aux colonnes (C3 et C4).

La pression de confinement est appliquée au moyen d'un détendeur (D1) qui reçoit et transmet l'air à un régulateur de pression R1 type RPIN de LN Industrie (pression d'entrée maximale de 12.10^2 KPa et pression de sortie maximale 4.10^2 KPa avec une grande stabilité et précision). La pression de sortie est mesurée à l'aide d'un manomètre.

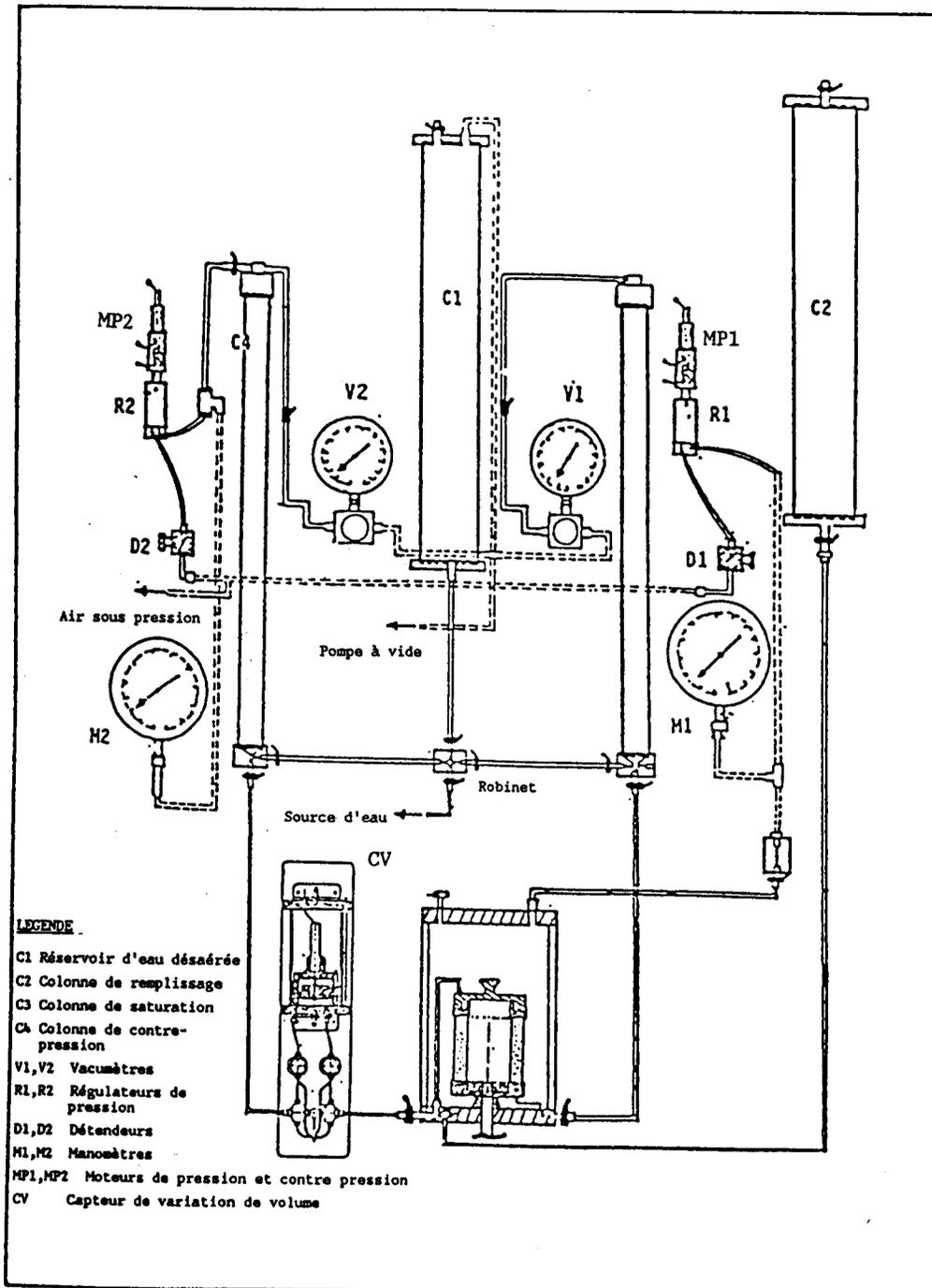


Fig. II.9 : Panneau de saturation et de contre-pression

Un système identique composé d'un détendeur (D2), d'un régulateur de pression (R2) et d'un manomètre M2 et relié à la colonne (C4), permet de générer la contrepression.

La montée en pression ou contrepression s'effectue à l'aide de deux moteurs (MP1 et MP2).

II.8) Instrumentation

Au cours d'un essai de torsion, on effectue l'acquisition et le contrôle de nombreux paramètres, notamment :

- La force et le déplacement axiaux,
- Le moment de torsion et la distorsion,
- La variation de volume ou la pression interstitielle,
- La pression de confinement.

Un essai de torsion cyclique peut durer quelques heures, une acquisition et une commande correcte de ces paramètres ne peuvent être effectuées sans asservissement électronique. Nous allons, ci-après, décrire les moyens et les instruments utilisés pour la mesure des paramètres évoqués ci-dessus.

II.8.1) La force axiale

La force axiale est mesurée à l'extérieur de la cellule à l'aide d'un capteur de force de $5 \cdot 10^3$ daN fabriqué par F.G.P. Instrumentation.

Les caractéristiques de ce capteur sont :

- il travaille en compression et extension
- étendue de mesure (E.M.) : 50 000 N
- surcharge admissible : 150 % de l'E.M.)
- sensibilité : 2,883 mV/V
- alimentation : 10 V
- linéarité et hystérésis : 0,1 % de l'E.M.

II.8.2) Le déplacement axial

Le déplacement axial est mesuré à l'extérieur de la cellule à l'aide d'un capteur de déplacement rectiligne à transformateur différentiel LVDT. Il est du type L50 fabriqué par L.N.C. Ses caractéristiques sont :

- linéarité : 0,2 % de la pleine échelle
- course : 50 mm
- tige guidée

II.8.3) Le couple de torsion

Le couple de torsion est mesuré à l'extérieur de la cellule à l'aide d'un capteur de force de 500 daN qui est semblable à celui utilisé pour la mesure de la force axiale. Ce capteur est fixé sur un bras de levier de 16.5 cm, solidaire de l'axe central de la presse, et qui a pour rôle de reprendre le moment de torsion au niveau de l'embase supérieure (fig. II.8).

II.8.4) La distorsion

La distorsion γ est déterminée à partir de l'angle de rotation ψ de l'embase inférieure de l'échantillon (fig. II.10).

La rotation ψ est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement type L 100, solidaire du bâti inférieur, et dont le noyau est fixé sur la partie mobile entraînant la rotation de l'embase inférieure.

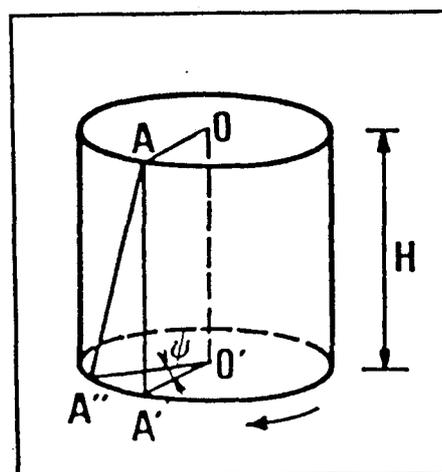


Fig. II.10 : Distorsion d'un cylindre

II.8.5 La variation de volume

La variation de volume est mesurée à l'aide d'un appareil type WYKHAM FARRANCE reconnu par sa bonne précision. Cet appareil est bien adapté à l'acquisition automatisée. Il comporte un capteur de déplacement immergeable qui mesure le déplacement d'un piston dans une chambre étalonnée. Un jeu de robinets bi-directionnels assure un sens uniforme de fonctionnement de cet appareil (fig. II.11).

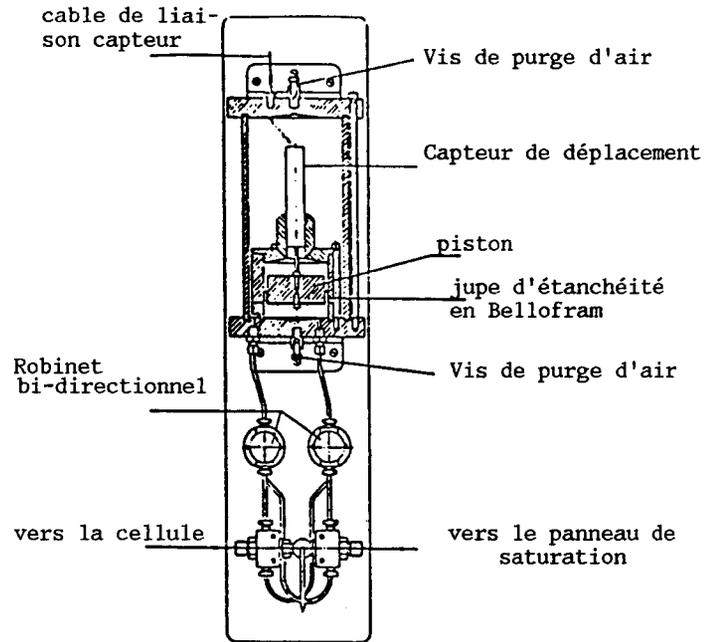


Fig. II.11 : Appareil de mesure de la variation de volume

II.8.6 La pression interstitielle

La pression interstitielle est mesurée à l'aide d'un capteur de fabrication F.G.P. Instrumentation. Un cube en aluminium a été spécialement conçu pour relier le capteur de pression interstitielle à la cellule triaxiale. Il comporte une vanne de contrôle et un robinet de purge (fig. II.12).

Le capteur de pression interstitielle a les caractéristiques suivantes :

- Etendue de mesure (E.M.) : 700 KPa
- Surcharge admissible : 150 % de l'E.M.
- Sensibilité : 0-5 V
- Alimentation : 15 V
- Linéarité et hystérésis : 0,15 % de l'E.M.

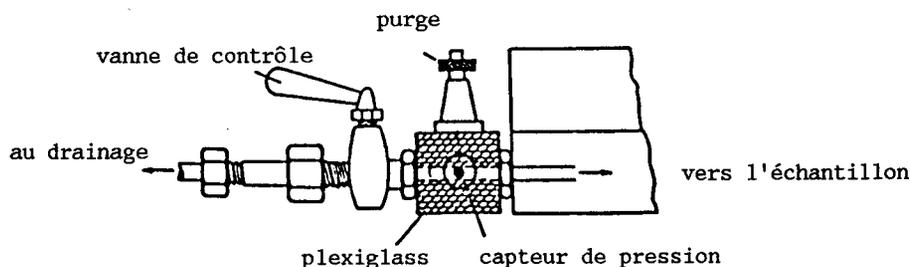


Fig. II.12 : Appareil de mesure de la pression interstitielle

II.8.7) Les pressions de confinement et de contre-pression

Le système de pression et contre-pression comporte :

- Une source d'air comprimé,
- Deux détendeurs de fabrication LN Industrie,
- Deux régulateurs de pression prévus pour une étendue de mesure de 0 à 400 KPa,
- Deux moteurs, pour la montée en pression, alimentés en 10 V-CC pour une puissance de 10 W.

II.9) Système d'acquisition et de contrôle

II.9.1) Introduction

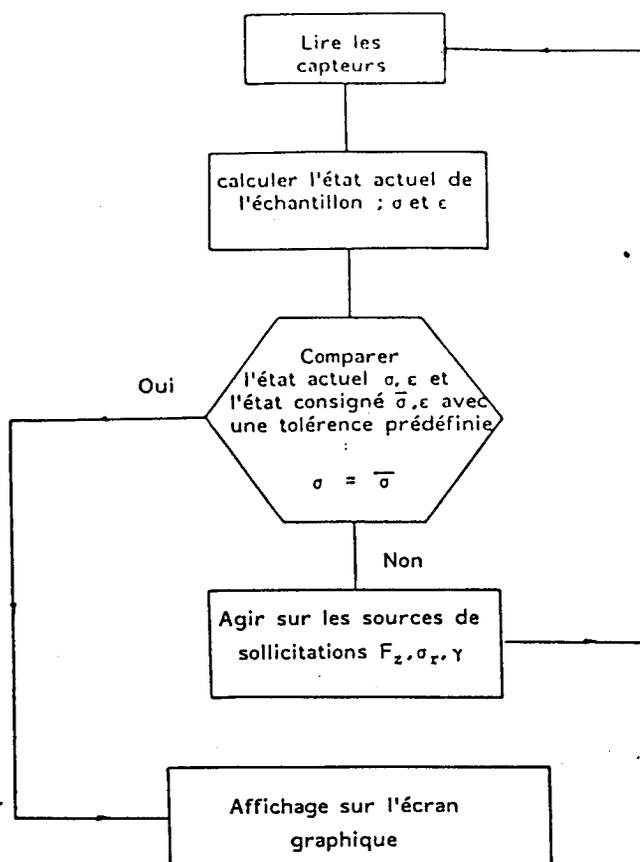
Les essais à chemins complexes type $b = \text{cst}$, torsion cyclique à contrainte ou déformation axiale imposée, torsion circulaire, ne peuvent pas être réalisés manuellement. En effet, ils nécessitent l'emploi d'un système d'acquisition et de contrôle automatique. Conscient de cette nécessité, nous avons réalisé, dans le cadre du Laboratoire de Génie Civil de Lille (Cousin et al, (1987)) un système d'acquisition et de commande de l'appareil de torsion. Ce système est composé de (fig. II.1) :

- Une centrale d'acquisition HP 34 97 A.
- Un micro-ordinateur HP Intégral P.C.
- Un logiciel d'acquisition, de traitement et de commande.

II.9.2) Processus d'acquisition et de contrôle

Le processus d'asservissement se déroule de la manière suivante (fig.II.13):

- La centrale d'acquisition lit les signaux de capteurs et les transmet au micro-ordinateur.
- Le micro-ordinateur transforme les signaux reçus en grandeurs d'état (σ, ϵ, \dots).
- Selon les grandeurs trouvées et celles consignées, le micro-ordinateur envoie des signaux de commande aux sources de sollicitations ($F_z, \sigma_r, \gamma, \dots$). Ce processus se répète jusqu'à la fin de l'essai.



La lecture de données s'effectue avec le format Packed BCD qui contient 6 mesures. Pour éviter la manipulation des grands fichiers de données, nous procédons au stockage sélectif; au cours d'un essai cyclique, tous les points proches des sommets sont stockés, mais loin des sommets 25 % de mesures prélevées sont sauvegardés.

II.9.3 Chemins de sollicitation

Le système de commande et d'acquisition permet la réalisation automatique de divers chemins de sollicitation, notamment :

1 - Les chemins triaxiaux conventionnels (I)

Au cours de ces chemins, le système contrôle :

- La force ou la déformation axiale.
- La pression de confinement.
- La pression interstitielle ou la variation de volume.

On peut ainsi réaliser des essais triaxiaux monotones ou cycliques en conditions drainée ou non drainée à pression moyenne constante ou variable.

2 - Chemins de torsion à contrainte axiale imposée (II)

Au cours de ces chemins, la contrainte axiale est imposée constante, et on effectue la torsion monotone ou cyclique en condition drainée ou non drainée (fig.II.14).

Pour ce type de chemin, la vitesse de rotation a été fixée à $0,3^\circ/\text{mn}$. Pour maintenir la contrainte axiale constante, la vitesse axiale doit être $> 0,1 \text{ mm}/\text{mn}$.

3 - Chemin de torsion à déformation axiale imposée (III)

Au cours de ces chemins (fig. II.14), la déformation axiale est bloquée (pas de déplacement axial), la torsion monotone ou cyclique est effectuée en condition drainée ou non drainée. La vitesse de rotation est fixée à $0,3^\circ/\text{mn}$.

4 - Chemin à b constant (IV)

Au cours de ce chemin (fig. II.14), la pression moyenne est maintenue constante, les incréments des contraintes axiale (σ_z) et du cisaillement ($\sigma_{\theta z}$) sont imposés pour que l'état de contrainte décrive une droite dans le plan $(\sigma_z - \sigma_\theta/2, \sigma_{\theta z})$.

Ce chemin est décrit en escalier : un pas en $\sigma_{\theta z}$ suivi d'un autre en σ_z .

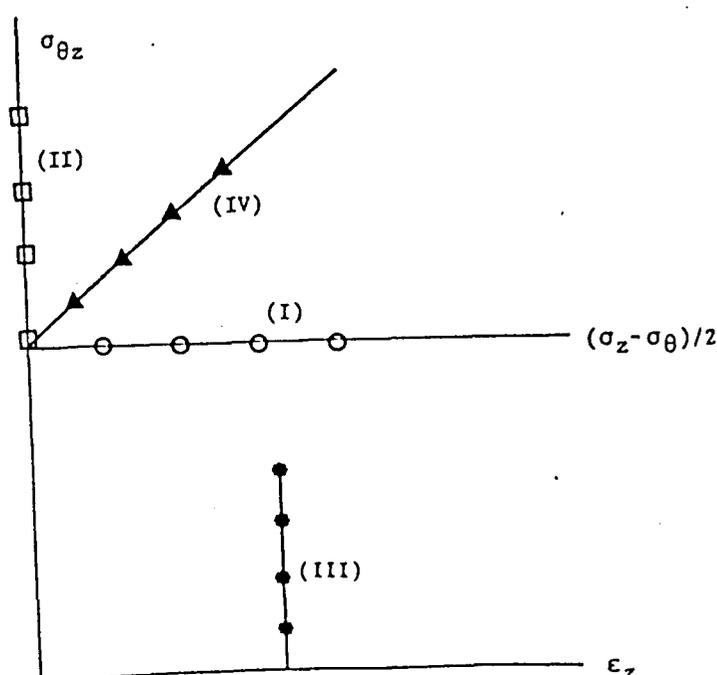


Fig. II.14 : Chemins de sollicitation

II.10) Détermination des états de contraintes et des déformations

II.10.1) Introduction

L'objet de ce chapitre est d'analyser l'état des contraintes et des déformations dans un cylindre creux (fig. II.15) soumis simultanément à un effort normal et à un moment de torsion.

L'échantillon est supposé soumis à :

- une force axiale F_z
- une pression extérieure P_e
- une pression intérieure P_i
- un couple de torsion M_t

Dans notre cas, la pression extérieure (P_e) = la pression intérieure (P_i)

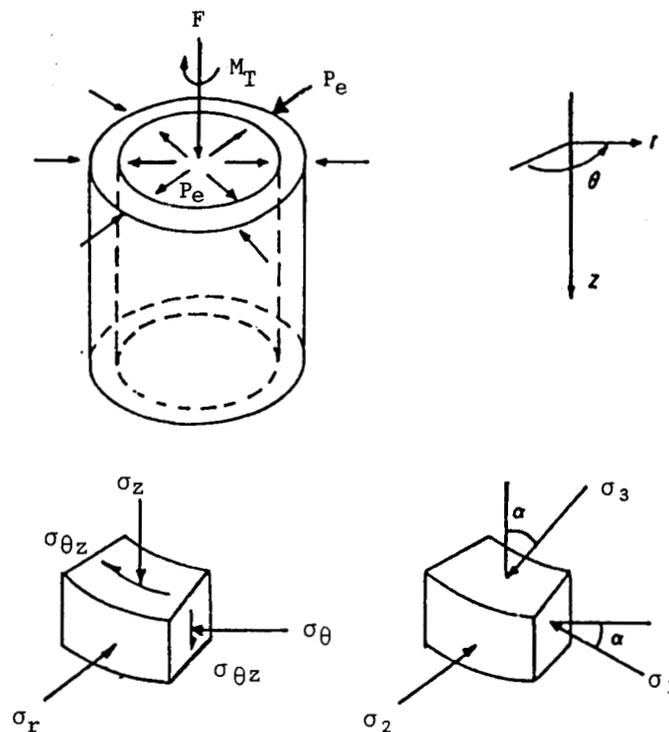


Fig. II.15 :

*Etat des contraintes
dans un cylindre creux*

II.10.2) Etat des contraintes

Le tenseur des contraintes, du fait de l'existence d'une contrainte tangentielle, a la configuration suivante :

$$\begin{pmatrix} \sigma_r & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta & \sigma_{\theta z} \\ 0 & \sigma_{\theta z} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Contrainte axiale σ_z

Elle s'exprime en fonction de la force axiale F .

$$\sigma_z = F/\pi (R_e^2 - R_i^2) ;$$

avec $F = F_z + P_e \cdot \pi (R_e^2 - R_i^2)$

Contrainte σ_θ et σ_r :

On peut montrer qu'elles sont données par :

$$\sigma_r = P_e$$

$$\sigma_\theta = P_e$$

Contrainte tangentielle $\sigma_{\theta z}$:

La répartition des contraintes du cisaillement dans une section horizontale de l'échantillon dépend de la loi du comportement du sable :

- Elle est linéaire si le comportement des sols est linéaire élastique

$$\sigma_{\theta z} = 2M_{t,r}/2\pi (R_e^4 - R_i^4)$$

- Elle est constante si le sol a un comportement du type élastique parfaitement plastique et toute la section est plastifiée

$$\sigma_{\theta z} = 3M_t/\pi (R_e^3 - R_i^3)$$

pour des valeurs de $R_i/R_e > 0.65$, les deux formulations données, ci-dessus, donnent des résultats très proches (dans notre cas $R_i/R_e = 0.83$).

II.10.3) Etat des déformations :

Le tenseur des déformations s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{array}{ccc} \varepsilon_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\theta\theta} & \varepsilon_{\theta z} \\ 0 & \varepsilon_{\theta z} & \varepsilon_{zz} \end{array}$$

Déformation axiale ε_{zz}

$$\varepsilon_{zz} = \Delta H/H \times 100$$

ΔH est la variation de la hauteur de l'échantillon

Déformation orthoradiale $\varepsilon_{\theta\theta}$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = (\Delta R_e + \Delta R_i)/(R_e + R_i) \times 100$$

ΔR_e est la variation du rayon extérieur

ΔR_i est la variation du rayon intérieur

Déformation radiale ε_{rr}

$$\varepsilon_{rr} = (\Delta R_e - \Delta R_i)/(R_e - R_i) \times 100$$

ε_{rr} est la variation de l'épaisseur du cylindre creux

Distorsion $\varepsilon_{\theta z} = \gamma_{\theta z}/2$

On peut montrer que la valeur moyenne de la distorsion est donné par :

$$2\varepsilon_{\theta z} = \gamma_{\theta z} = \psi (R_e + R_i)/2H$$

ψ est la variation de l'angle de torsion.

CHAPITRE III

III) MODE OPERATOIRE ET SOURCES D'ERREURS

III.1) INTRODUCTION

Avant de présenter les essais réalisés au cours de ce travail, nous allons décrire le mode opératoire suivi pour effectuer les essais et les erreurs commises lors de leur réalisation.

III.2) MODE OPERATOIRE

III.2.1) Préparation du sable

Le sable est préchauffé, dans une cocotte remplie d'eau pendant trois heures, pour chasser les bulles d'air entre les grains de sable et améliorer ainsi la saturation de l'échantillon.

III.2.2) Montage de l'échantillon

On commence par monter les manchettes internes et externes et leurs moules. La manchette interne est plaquée automatiquement contre son moule du fait que son diamètre est légèrement inférieur à celui du moule. La manchette externe est plaquée contre le moule externe grâce au vide créé entre eux à l'aide d'une pompe à vide. Les manchettes sont fixées sur les embases par des joints toriques.

Pour éviter tout contact entre les grains de sable et l'air pendant le remplissage, on prend les précautions suivantes :

- L'échantillon est rempli avec de l'eau dégazée.
- Une petite cuillère hémisphérique est utilisée pour garder une couche d'eau entre le sable et l'air.
- La cuillère est introduite entre les deux manchettes pour que la hauteur du déversement soit constante.

III.2.3 Saturation

Avant le démoulage de l'échantillon, on crée, à l'aide d'une pompe à vide, une dépression de l'ordre de 30 kPa entre le bas et le haut de l'échantillon. Il est recommandé que la dépression du haut soit supérieure à celle du bas pour faciliter l'évacuation des bulles d'air restant dans la partie supérieure. Afin d'obtenir une bonne saturation, cette opération dure environ une heure.

III.2.4 Démoulage de l'échantillon et montage de la cellule

Au cours de la saturation, on procède à l'enlèvement des deux moules de l'échantillon qui reste intact grâce au vide différentiel.

Après le démoulage, on monte la cellule triaxiale, et on règle la coaxialité entre l'axe central de la presse et l'embase supérieure de l'échantillon.

La cellule est ensuite remplie d'eau jusqu'au niveau du couvercle supérieur pour réduire la pénétration de l'air dans l'échantillon.

III.2.5 Confinement de l'échantillon

La consolidation s'opère par l'application d'une pression de confinement et d'une contrepression en laissant libre le drainage de l'échantillon.

La contrepression est fixée par des impératifs technologiques. En effet, une bonne saturation de l'échantillon nécessite une forte contrepression, mais le régulateur dont nous disposons limite la pression appliquée à 400 kPa.

Ainsi, nous avons imposé une contrepression de 200 kPa pour les essais à faible pression de confinement (100 et 200 kPa) et de 100 kPa pour les essais à une pression de confinement de 300 kPa. La fin de la consolidation est indiquée par la stabilisation de la déformation volumique dans le circuit du drainage. Cette phase dure généralement 90 minutes.

III.2.6) Contrôle de la saturation

La saturation de l'échantillon est contrôlée par la détermination, à la fin de la consolidation, du coefficient de Skempton. Généralement, nous avons obtenu un coefficient de 95 % pour une contrepression de 200 kPa et 85 % pour une contrepression de 100 kPa.

III.2.7) Application du chemin de chargement

Si la saturation de l'échantillon est satisfaisante, nous appliquons à l'aide du système d'asservissement le chemin de chargement choisi. Au cours de l'essai, l'acquisition des données, et le contrôle de la machine sont complètement automatisés.

III.3) SOURCES D'ERREURS

Il est important de connaître les erreurs commises lors de réalisation d'un essai de torsion. Ces erreurs sont de deux types :

- les erreurs dues à l'appareillage,
- les erreurs dues au matériau utilisé.

III.3.1) Erreurs d'appareillage

Les erreurs dues à l'appareillage proviennent essentiellement de l'estimation des forces appliquées sur l'échantillon et de ses déformations. En effet, les instruments de mesure (capteurs de force et de déplacement) sont placés en dehors de la cellule triaxiale. Ils sont liés à l'échantillon par l'intermédiaire des différentes pièces (piston, arbres, chaînes ...) qui peuvent se déformer et générer des frottements au cours de l'essai. L'estimation de ce type d'erreurs pose un problème délicat. En effet, il est difficile de les reproduire séparément. A ces sources d'erreurs, il faut ajouter celles qui proviennent des instruments de mesure (résolution, non linéarité, dérive de zéro...) et de l'asservissement de certains chemins de sollicitation qui s'obtiennent par des oscillations autour des valeurs moyennes.

III.3.2) Erreurs dues au matériau

Les erreurs dues au matériau proviennent de la fabrication de l'échantillon et des hétérogénéités générées au cours de l'essai.

Pour diminuer les erreurs de fabrication de l'échantillon, nous avons utilisé une procédure de fabrication de l'échantillon qui permet de reproduire le plus fidèlement possible sa densité initiale.

Les hétérogénéités dans un essai de torsion sont très importantes ; en effet, la transmission du couple de torsion entre l'échantillon et les embases nécessite un fretage parfait qui a pour effet d'amplifier les hétérogénéités entre les différentes sections, et de rendre difficile l'estimation d'un "état" moyen de contrainte et de déformation dans l'échantillon.

III.4) REPETITION D'UN ESSAI DE TORSION

Afin de tester le bon fonctionnement du dispositif expérimental, et nous assurer de la bonne reproductivité des essais, nous avons réalisé plusieurs essais, nous nous limitons à la présentation de deux d'entre elles.

Dans la première, nous avons effectué deux essais drainés à $b = 0.25$ à une pression de confinement de 200 kPa, figures (III.1.a à III.1.d). On observe une bonne reproductivité des essais réalisés, ce qui montre la fiabilité du mode opératoire et du système de torsion.

Dans la deuxième série, nous avons réalisé deux essais de torsion à déformation axiale imposée en partant respectivement d'un déviateur initial nul ou de 10 kPa. Les figures (III.2.a à III.2.c) montrent les résultats de ces deux essais. On peut constater qu'une légère perturbation de l'état initial ne génère qu'une légère variation dans l'évolution des contraintes du cisaillement, de la déformation volumique et du déviateur.

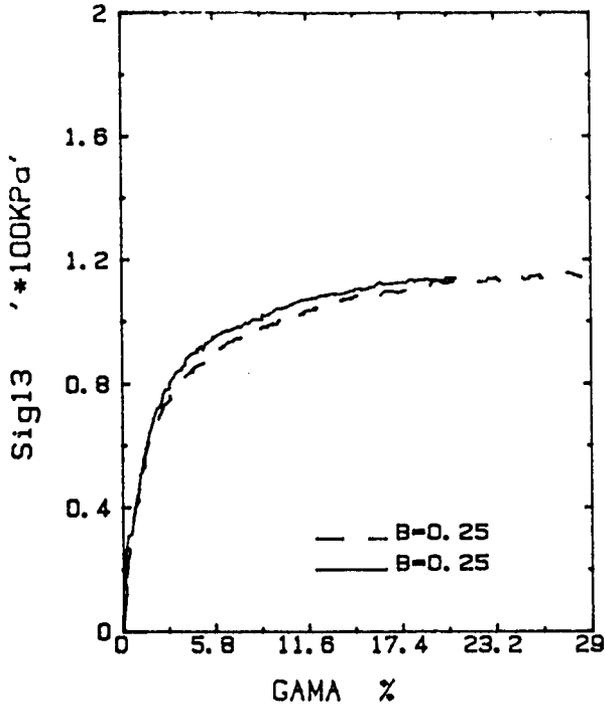


Fig.III.1.a : Evolution
du cisaillement

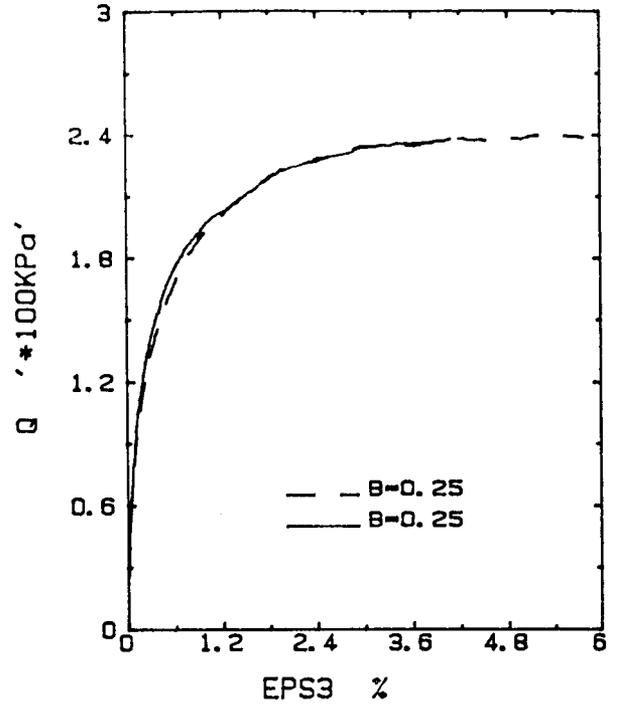


Fig. III.1.b : Evolution
du déviateur

REPETITION DES ESSAIS A b = 0.25

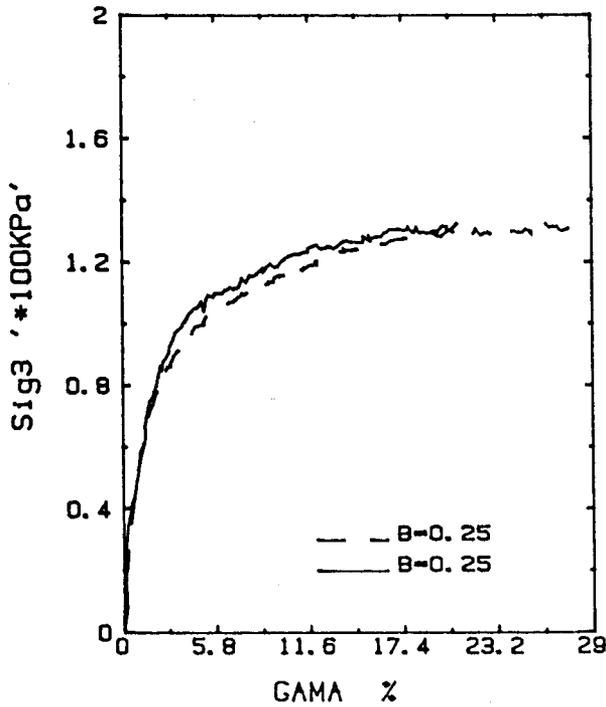


Fig.III.1.c : Evolution
de la contrainte axiale

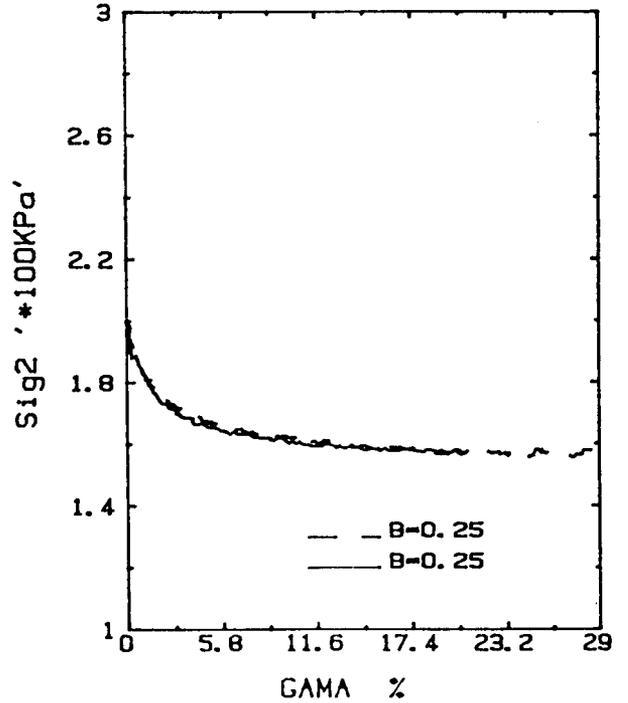


Fig.III.1.d : Evolution
de la pression de confinement

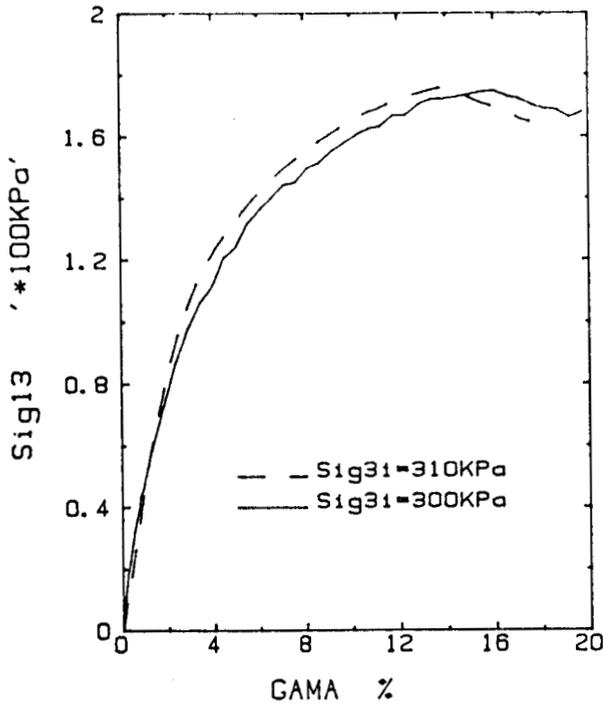


Fig.III.2.a : Evolution du cisaillement

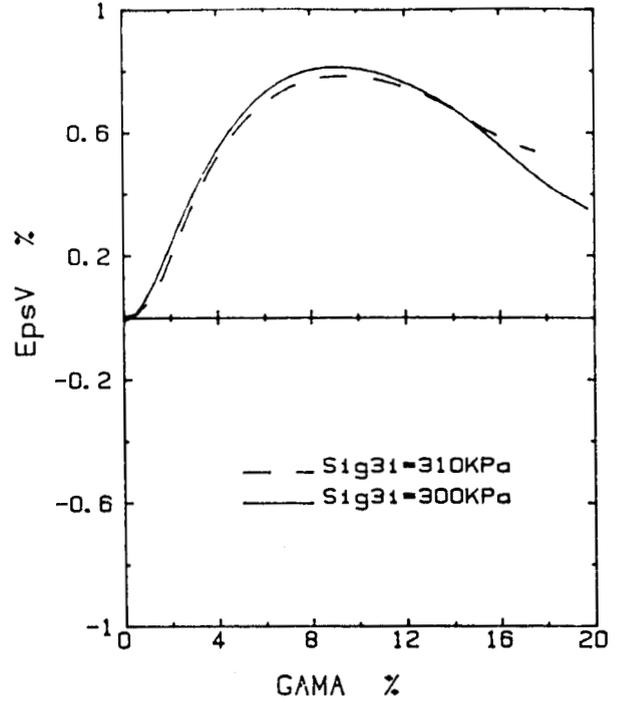


Fig.III.2.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAI DE TORSION DRAINE A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE

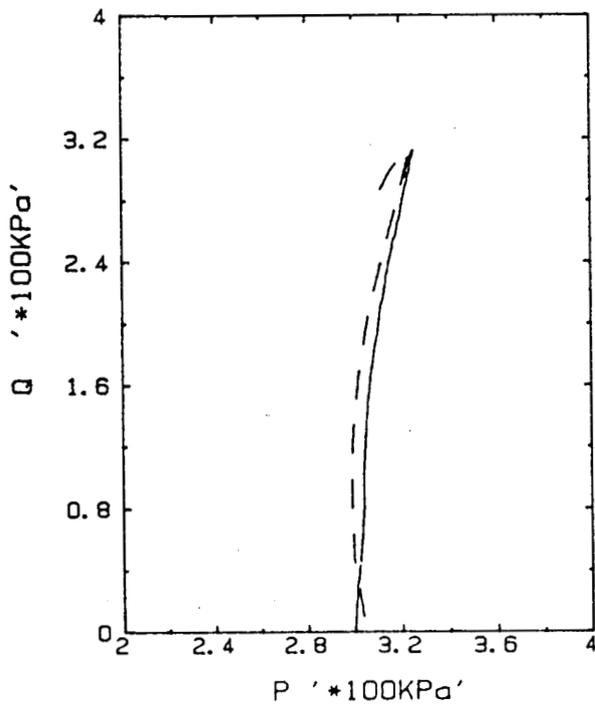


Fig.III.2.c : Evolution du déviateur

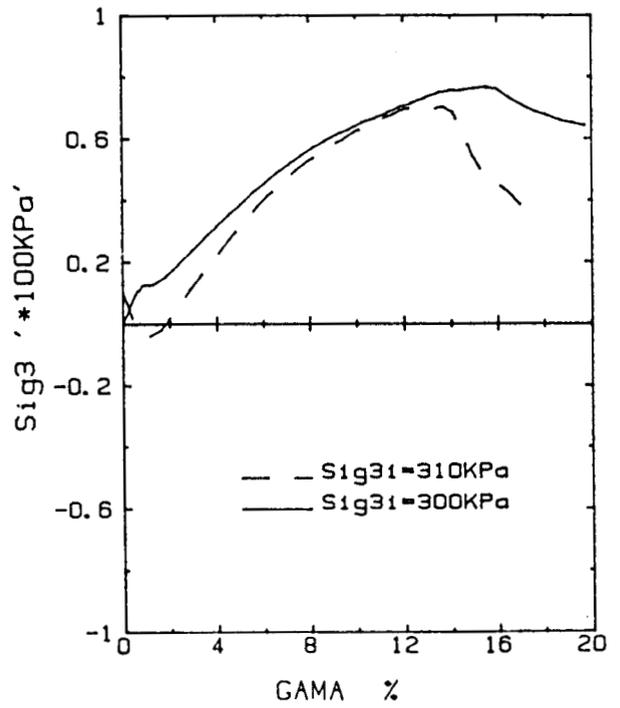


Fig.III.2.d : Evolution de la contrainte axiale

CHAPITRE IV

IV) PRESENTATION DES RESULTATS OBTENUS

IV.1) INTRODUCTION

Les essais à l'appareil de torsion ont été réalisés sur le sable fin d'HOSTUN (voir courbe granulométrique) à un indice de vide initial élevé $e_0 = 0,82$ (état lâche). Parmi les objectifs recherchés dans la réalisation de ces essais, on peut citer:

- L'étude du comportement des sables sous chargements monotones à axes principaux fixes ou rotatifs,
- L'étude de l'effet de l'histoire de chargement sur le comportement de ce matériau,
- L'analyse du comportement des sables sous chargements cycliques non drainés en vue de l'étude de la liquéfaction en torsion.

Nous allons, ci-après, décrire les résultats obtenus pour les objectifs cités ci-dessus.

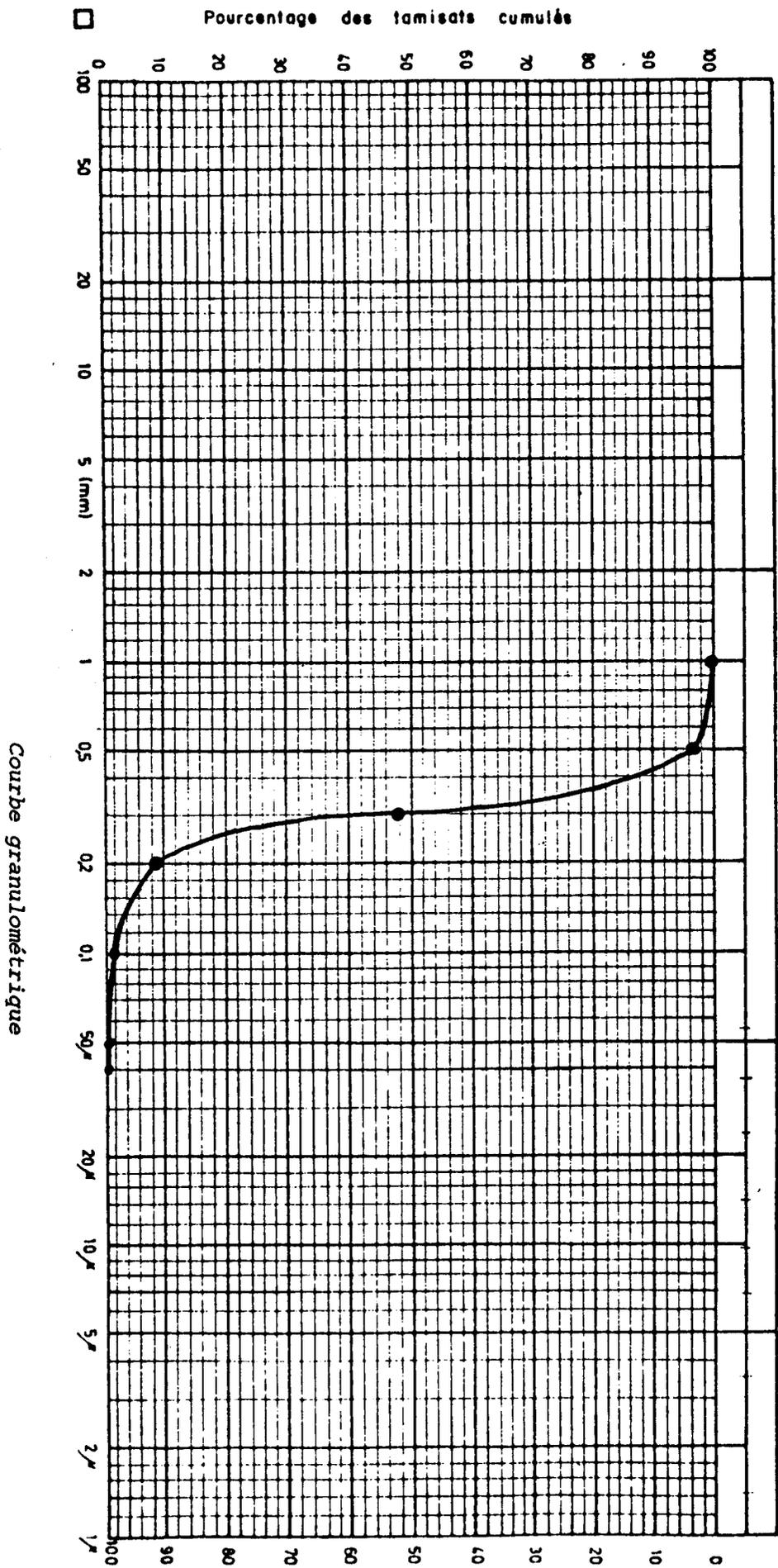
IV.2) COMPORTEMENT DES SABLES SOUS CHARGEMENTS MONOTONES

IV.2.1) Essais triaxiaux conventionnels

IV.2.1.1) Résultats obtenus

Des essais triaxiaux de compression drainés, non drainés et d'extension drainés ont été réalisés à des pressions de confinement de 100, 200 et 300 kPa, figures (IV.1.a) à (IV.3.c). Les résultats obtenus montrent que :

- Lors des essais drainés de compression , le déviateur de contrainte augmente rapidement. Il atteint un palier ou un léger pic pour une déformation axiale de l'ordre de 5 %, figure (IV.1.a). Ce pic peut



être dû aux hétérogénéités de l'échantillon en grandes déformations. La déformation volumique est contractante au début du chargement, puis elle devient dilatante jusqu'à la rupture. La phase de contractance augmente avec la pression de confinement (fig. IV.1.b).

- Lors des essais d'extension drainés, le déviateur de contrainte augmente rapidement au début d'essai pour atteindre un palier pour une déformation axiale de 1 à 2,5 % (fig. IV.2.a). La déformation volumique est dilatante au début du chargement, puis elle devient contractante, ensuite elle redevient dilatante jusqu'à la rupture (fig. IV.2.b).
- Lors des essais de compression non drainés, le déviateur de contrainte augmente rapidement au début du chargement, puis il se stabilise avec éventuellement un léger pic pour une déformation axiale de l'ordre de 10 à 15 % (fig. IV.3.a). La pression interstitielle augmente au début du chargement, puis elle diminue dans la suite de l'essai (fig. IV.3.b). Ceci est en accord avec la phase de contractance et de dilatance lors des essais de compression drainés. Dans le plan (P' , q'), on observe que le déviateur de contrainte augmente rapidement pour atteindre la courbe de rupture. Après un parcours de cette courbe, il s'en éloigne (fig. IV.3.c). Ceci est dû, comme nous l'avons indiqué, ci-dessus, à l'hétérogénéité de l'échantillon en grandes déformations.

IV.2.1.2) Hétérogénéité de l'échantillon au cours d'essai

La transmission du moment de torsion entre l'échantillon et l'embase supérieure nécessite un frottement parfait qui a pour conséquence de bloquer la déformation radiale au voisinage des embases.

Au début du chemin triaxial conventionnel, on observe que l'échantillon se déforme avec une relative homogénéité, mais à partir d'une certaine déformation axiale (de l'ordre de 6 %), on note que l'échantillon se déforme avec un tonneau important pour les essais de compression ou avec un rétrécissement au centre pour les essais en extension (fig. IV.4.a et IV.4.b).

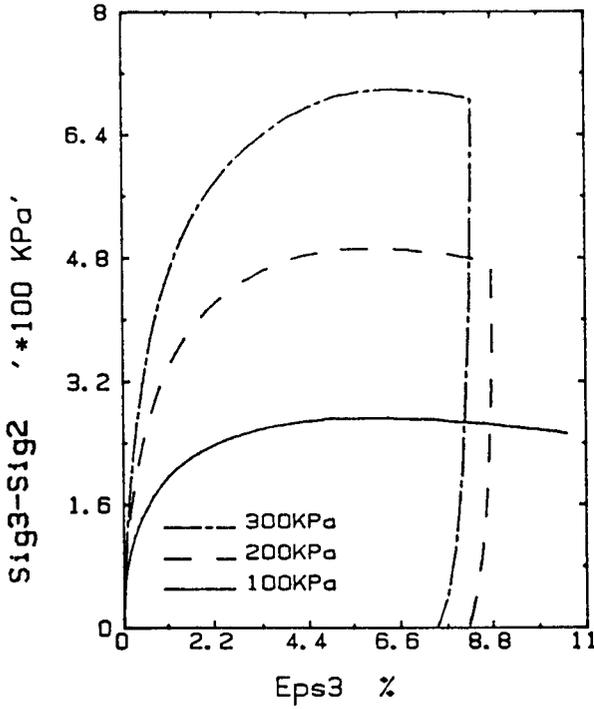


Fig.IV.1.a : Evolution du déviateur

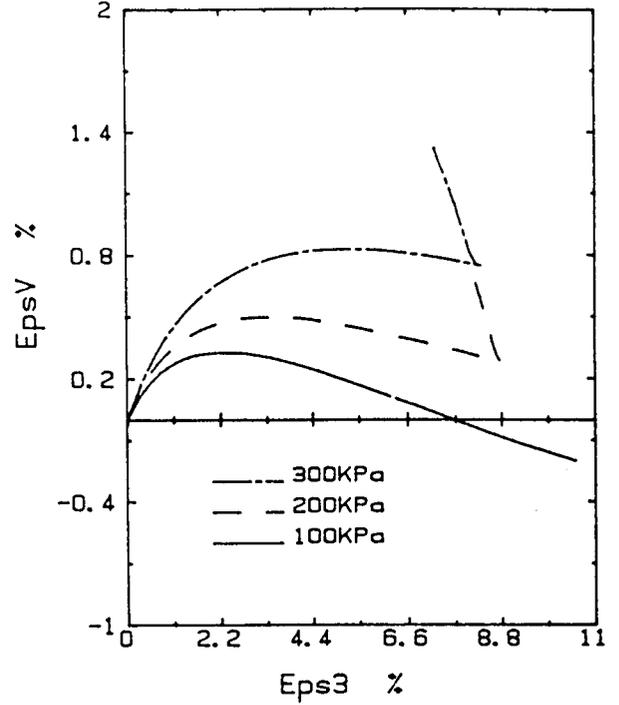


Fig.IV.1.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS DRAINÉS DE COMPRESSION

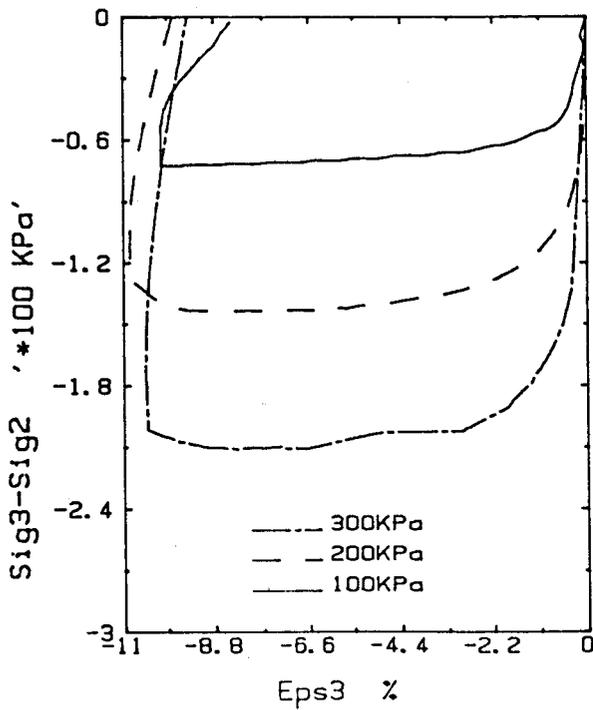


Fig. IV.2.a : Evolution du déviateur

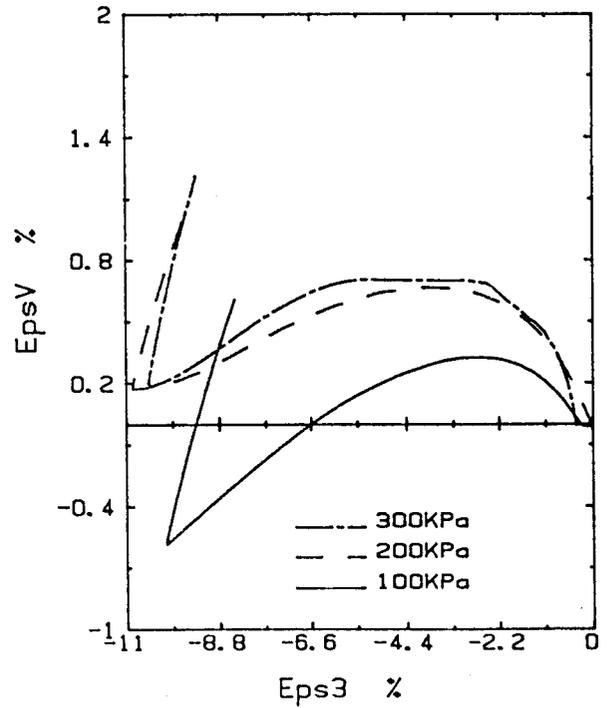


Fig. IV.2.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS DRAINÉS D'EXTENSION

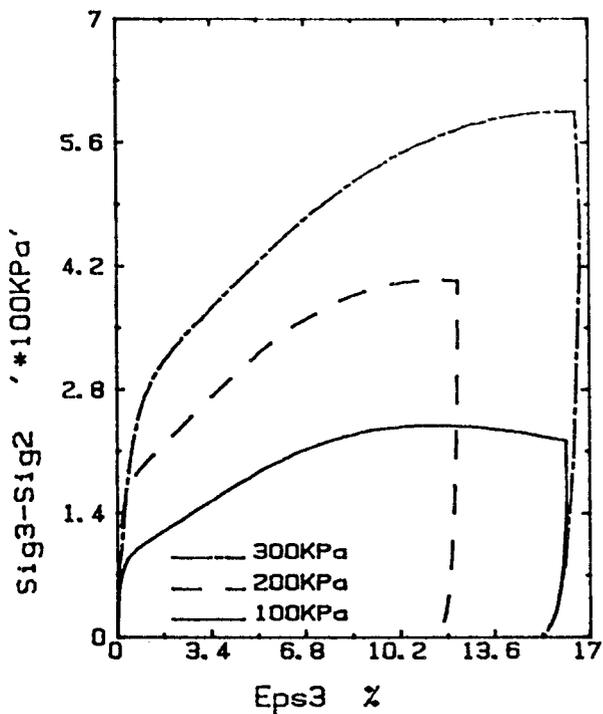


Fig. IV.3.a : Evolution du déviateur

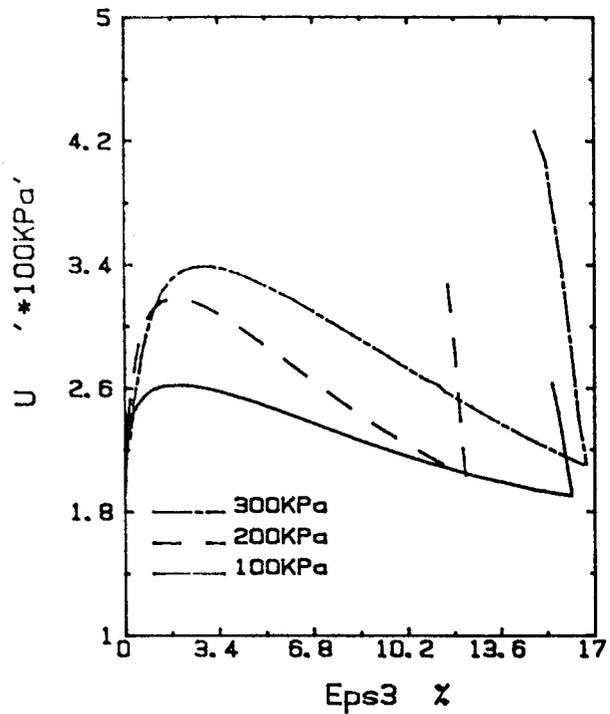


Fig. IV.3.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAIS NON DRAINES DE
COMPRESSION

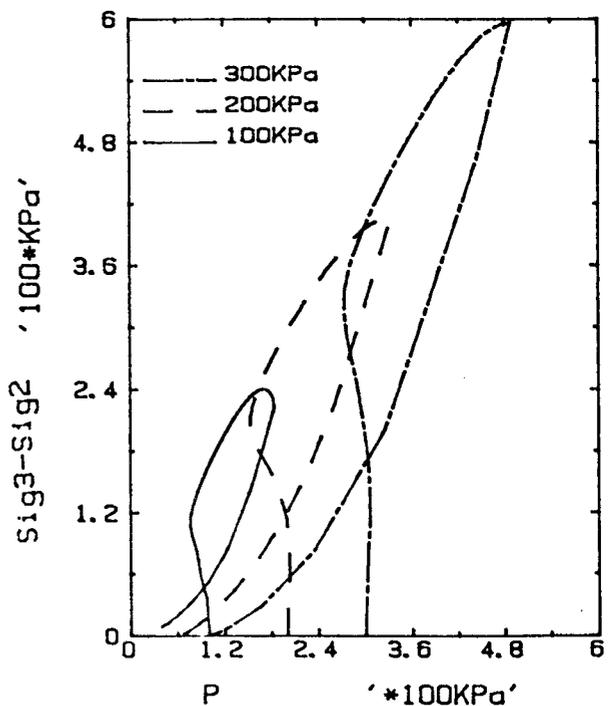
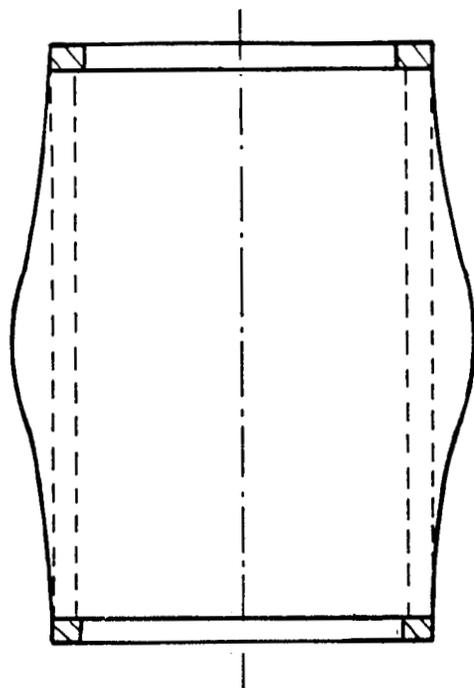
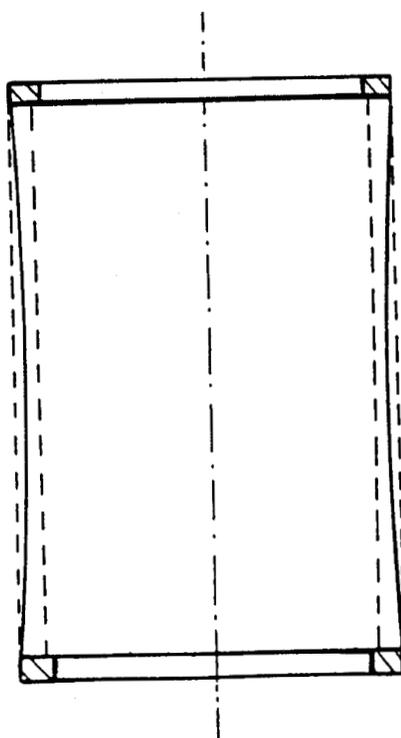


Fig. IV.3.c : Plan (q' , p')



*Fig. IV.4.a : Déformation
en tonneau à la rupture*



*Fig. IV.4.b : Rétrécissement
au centre à la rupture*

Ceci montre que le cylindre creux est mal adapté pour la réalisation des essais triaxiaux conventionnels. En effet, les hétérogénéités de l'échantillon en grandes déformations peuvent influencer sensiblement la réponse du sable.

IV.2.1.3) Surface de rupture et état caractéristique

La figure (IV.5.a) illustre dans le plan (P' , q') les états de contraintes à la rupture et au changement de phase ($d\varepsilon_v = 0$) pour l'ensemble des essais triaxiaux monotones. On peut constater que :

- Les états de contraintes au pic se situent sur une courbe qui est légèrement inclinée vers l'axe de la pression moyenne. Ceci signifie que l'angle de frottement diminue lorsque la pression de confinement augmente.
- Les états de contrainte correspondant aux changements de phase se situent également sur une courbe (courbe d'état caractéristique, Ishihara (1975), Luong et al (1978)) qui est légèrement inclinée vers l'axe de la pression moyenne.
- L'écart entre les surfaces de rupture et d'état caractéristiques est important en compression, mais très faible en extension.

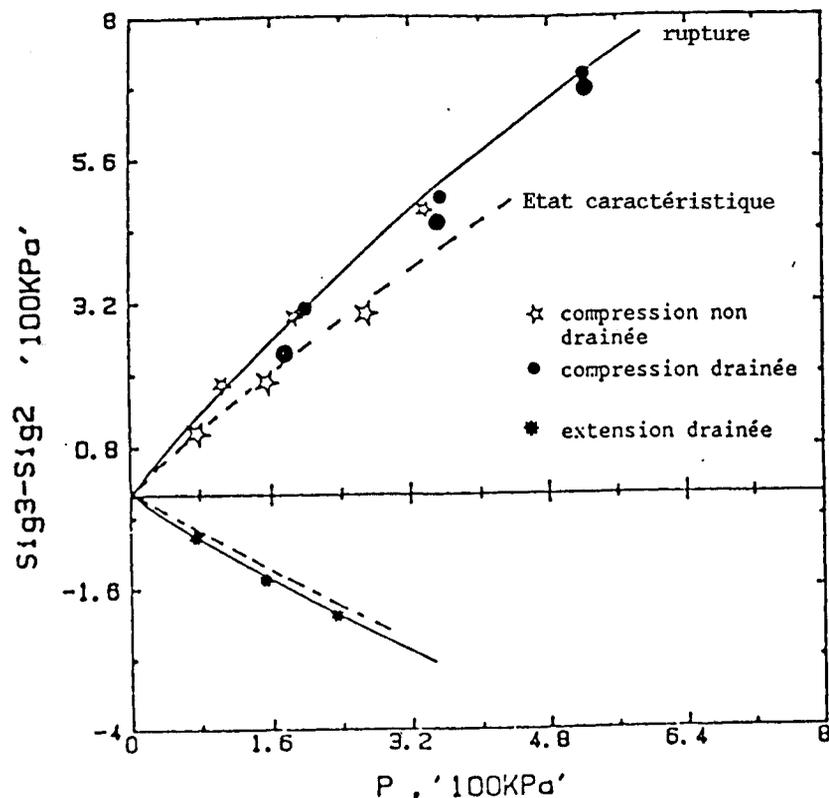


Fig. IV.5.a : Courbes de rupture et d'état caractéristique (Essais triaxiaux conventionnels)

IV.2.2) Essais de torsion monotone

IV.2.2.1) Introduction

Des essais de torsion ont été effectués selon deux procédures :

Au cours de la torsion, on maintient constante, soit la contrainte axiale (torsion à contrainte axiale imposée), soit la déformation axiale (torsion à déformation axiale imposée).

IV.2.2.2) Essais de torsion drainés à contrainte axiale imposée

Les figures (IV.6.a) à (IV.6.c) montrent les résultats des essais de torsion drainés à contrainte axiale imposée réalisés à des pressions de confinement de 100, 200 et 300 kPa en partant d'un état initial isotrope. On peut constater qu'au cours de la torsion :

- La contrainte de cisaillement augmente rapidement au début du chargement, puis elle atteint un palier. La distorsion correspondant à ce palier augmente avec la pression de confinement (fig. IV.6.a).
- La déformation volumique est contractante au début du chargement, ensuite elle devient dilatante ; la phase de contractance augmente avec la pression de confinement (fig. IV.6.b).
- La déformation axiale croît légèrement au début du chargement (en compression), puis elle décroît jusqu'à la fin de l'essai (fig. IV.6.c).

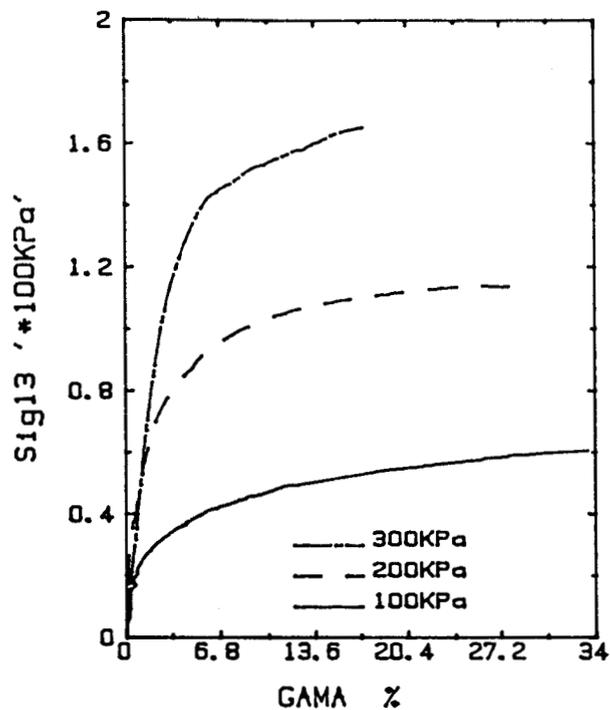


Fig. IV.6.a : Evolution du cisaillement

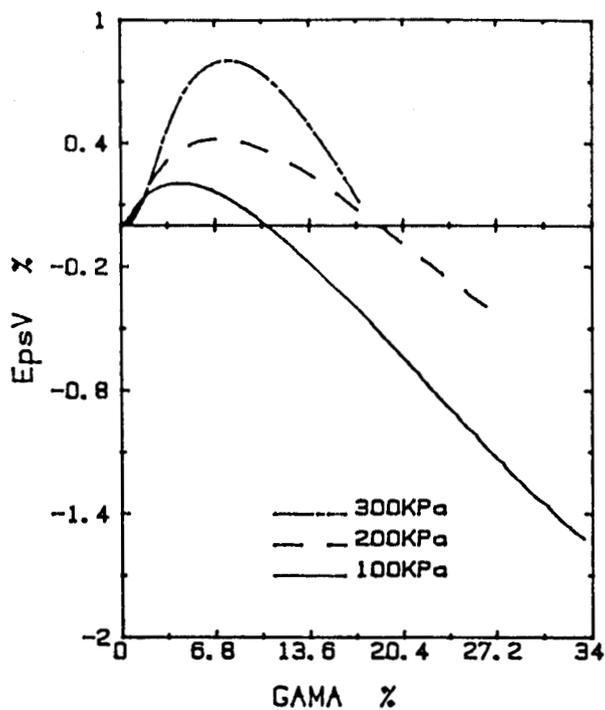


Fig.6.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS DE TORSION DRAINES
A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE

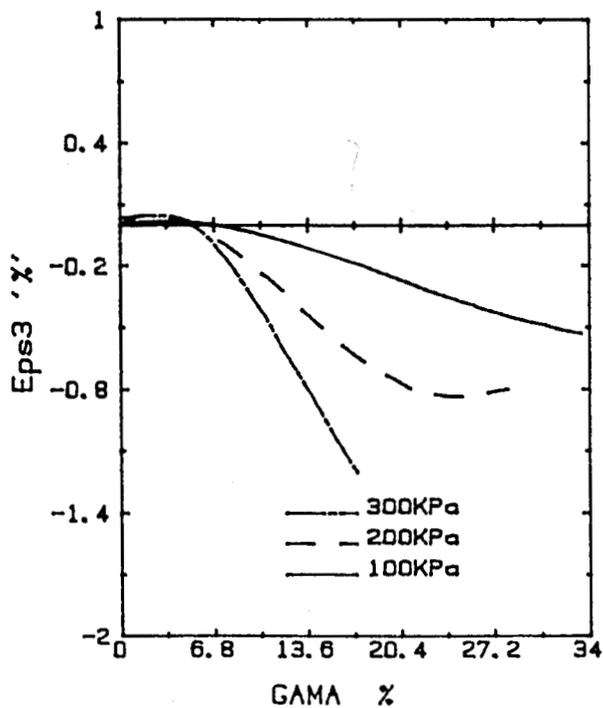


Fig.IV.6.c : Evolution de la déformation axiale

IV.2.2.3) Essais de torsion non drainés à contrainte axiale imposée

Les figures (IV.7.a) à (IV.7.d) illustrent les résultats des essais de torsion non drainés à contrainte axiale imposée réalisés à des pressions de confinement de 100, 200 et 300 kPa en partant d'un état initial isotrope. On peut constater qu'au cours de ce chemin :

- La contrainte de cisaillement croît jusqu'à la rupture (fig. IV.7.a).

- La pression interstitielle augmente au début du chargement, ensuite elle diminue jusqu'à la fin de l'essai. Sa variation est faible à l'origine (fig. IV.7.b).

- La déformation axiale croît légèrement au début du chargement jusqu'à une distorsion de l'ordre de 5 %, puis elle décroît jusqu'à la rupture (fig. IV.7.c).

- Dans le plan (P' , q'), la pression moyenne diminue, puis elle augmente jusqu'à la rupture (fig. IV.7.d).

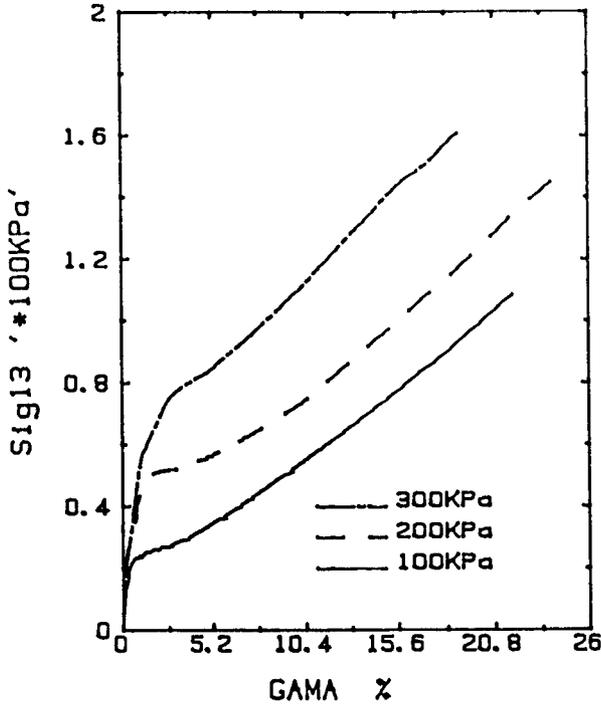


Fig.IV.7.a : Evolution du cisaillement

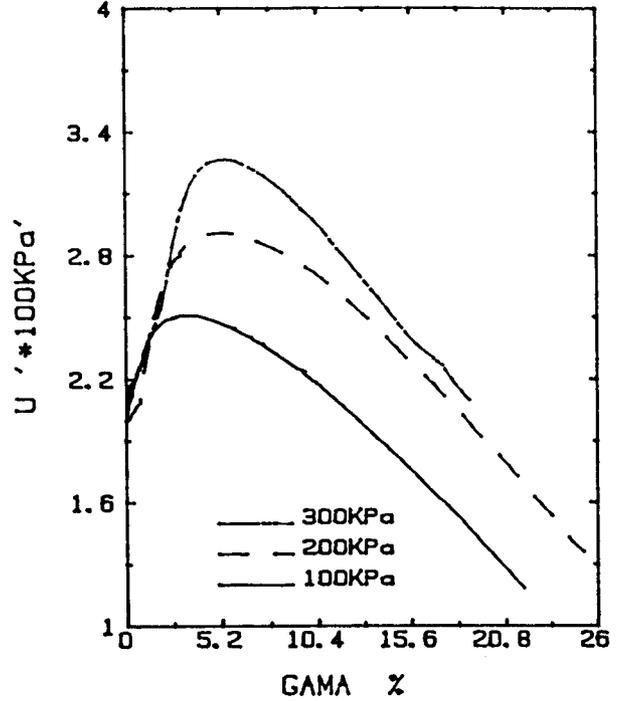


Fig. 7.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAIS DE TORSION NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE

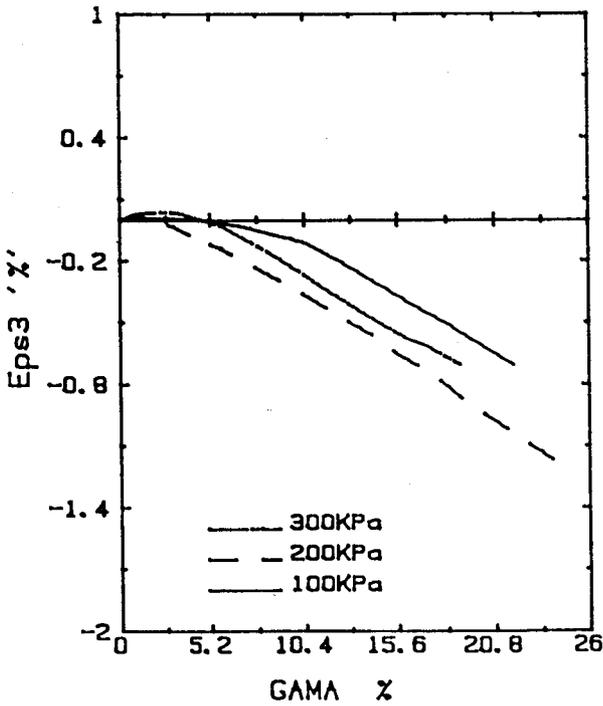


Fig. IV.7.c : Evolution de la déformation axiale

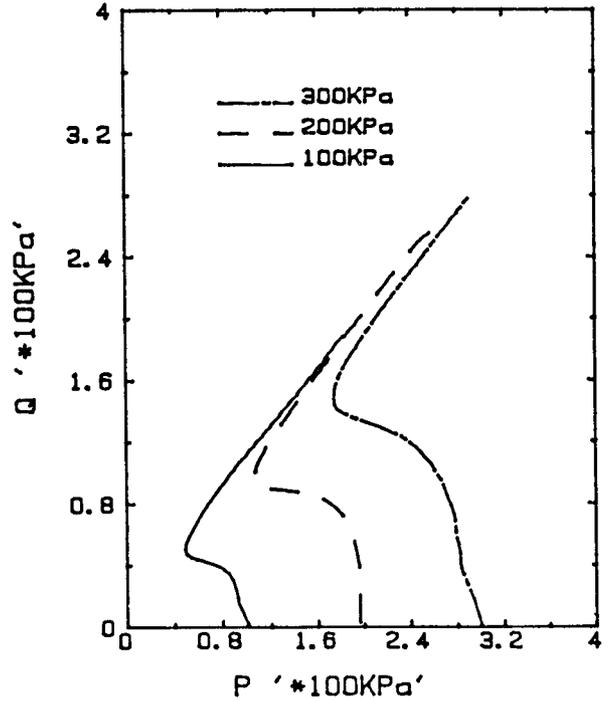


Fig. IV.7.d : Evolution du déviateur

IV.2.2.4) Essais de torsion drainés à déformation axiale imposée

Les figures (IV.8.a) à (IV.8.c) montrent les résultats de deux essais de torsion drainés à déformation axiale imposée, réalisés à des pressions de confinement de 200 et 300 kPa en partant d'un état initial isotrope. Ces figures montrent qu'au cours de ce chemin :

- La contrainte de cisaillement croît et atteint un palier, avec éventuellement un pic, pour une distorsion de l'ordre de 15 % (fig.IV.8.a).
- La déformation volumique est contractante au début du chargement, ensuite elle devient dilatante. La phase de contractance augmente avec la pression de confinement (fig. IV.8.b).
- La contrainte axiale croît tout au long de l'essai ; elle subit une légère diminution sur un petit intervalle au voisinage de l'origine (fig. IV.8.c).
- Dans le plan déviateur, l'angle de Lode reste constant au début du chargement, puis il subit des faibles variations (fig. IV.8.d).
- La rotation des axes principaux de contraintes (ALPHA) passe directement de 0° à 45° , puis elle diminue, ensuite elle augmente (fig. IV.8.e).
- La contrainte principale majeure croît au début du chargement et atteint un palier, avec éventuellement un léger pic, pour une distorsion de l'ordre de 15 % (fig. IV.8.f).
- La contrainte principale mineure diminue rapidement au début du chargement ensuite elle tend à se stabiliser (fig. IV.8.g).

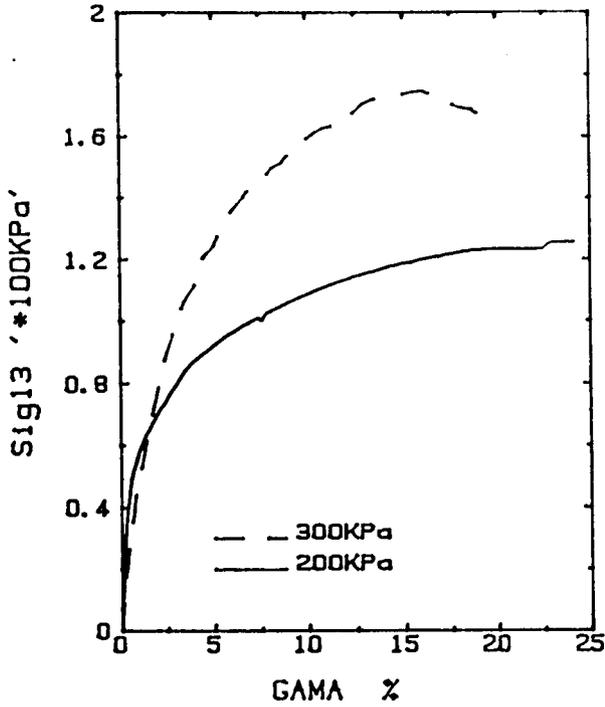


Fig. IV.8.a : Evolution du cisaillement

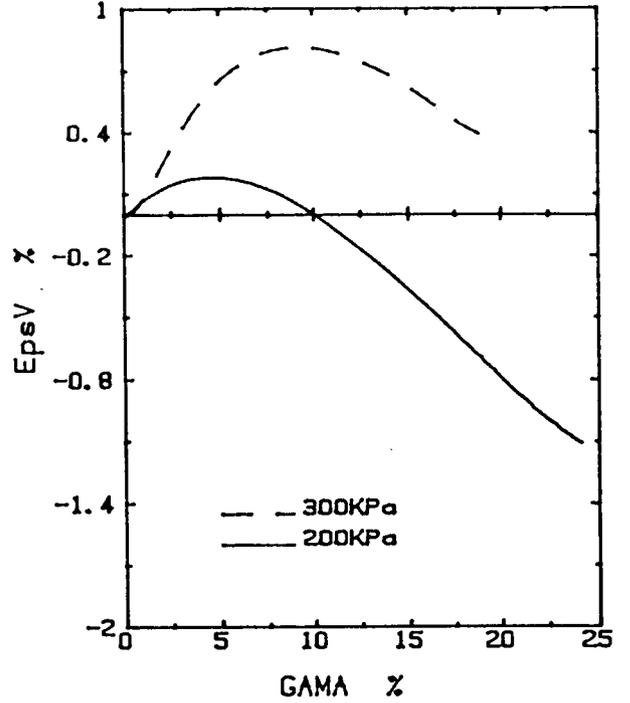


Fig. IV.8.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAI DE TORSION DRAINE
A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE

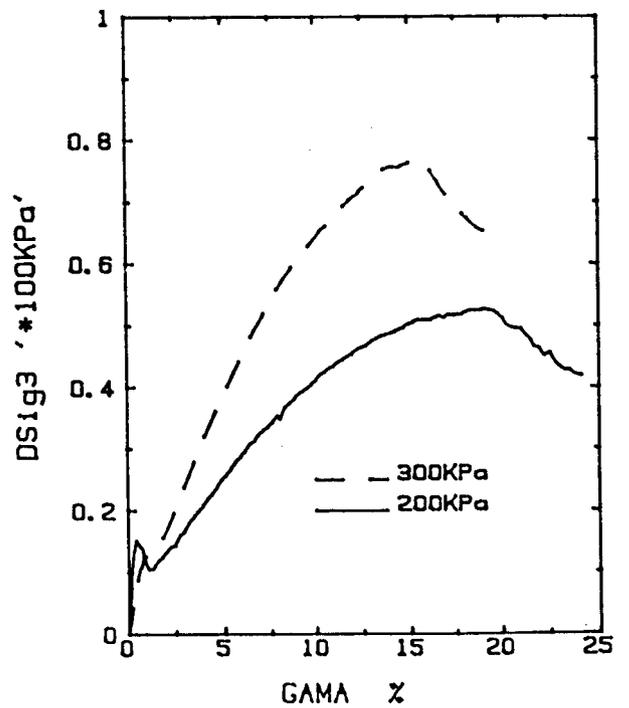


Fig. IV.8.c : Evolution de la contrainte axiale

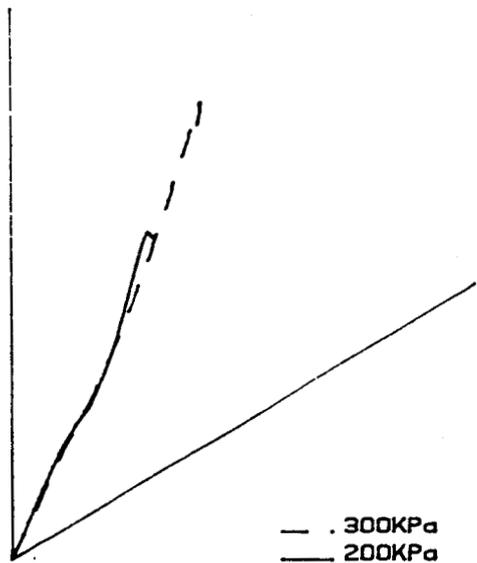


Fig. IV.8.d : Plan déviateur

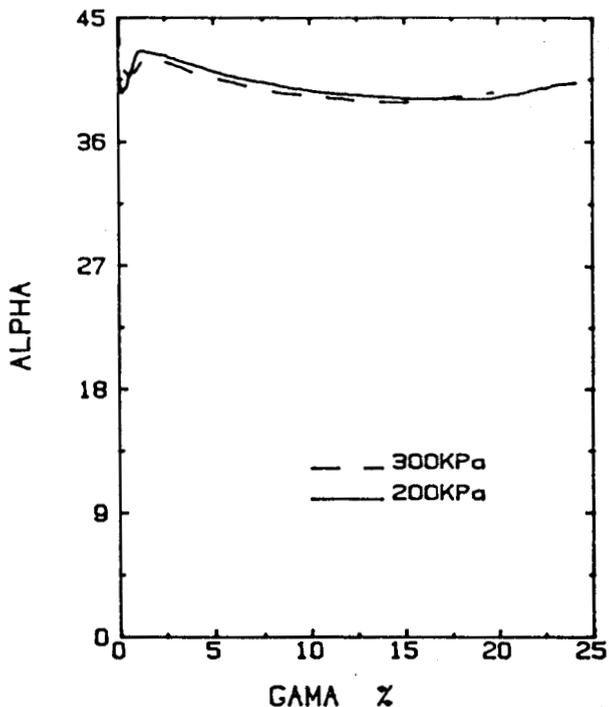


Fig. IV.8.e : Evolution de la rotation des axes principaux

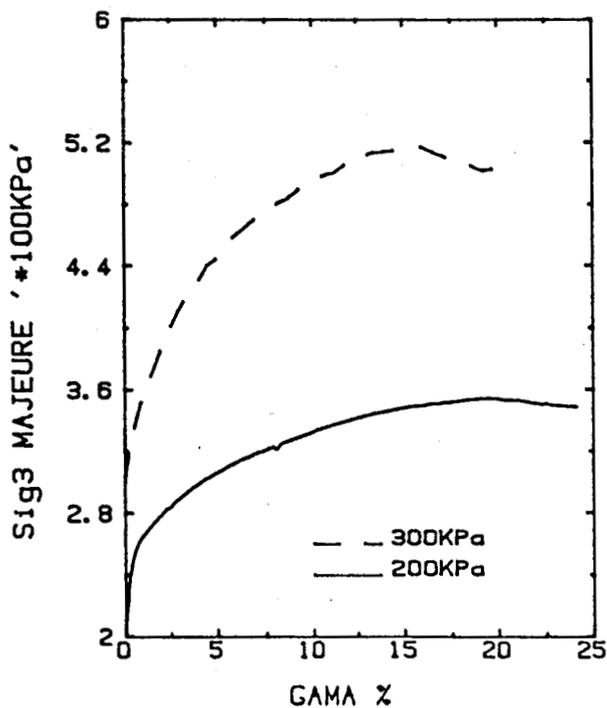


Fig. IV.8.f : Evolution de la contrainte principale majeure

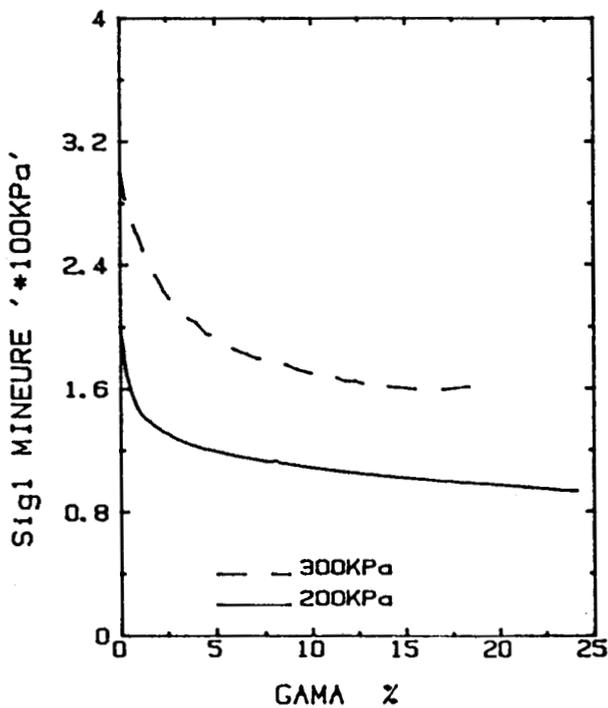


Fig. IV.8.g : Evolution de la contrainte principale mineure

IV.2.2.5) Essais de torsion non drainés à déformation axiale imposée

Les figures (IV.9.a) à (IV.9.h) illustrent les résultats des essais de torsion non drainés à déformation axiale imposée réalisés à des pressions de confinement de 200 et 300 kPa en partant d'un état initial isotrope. On peut constater qu'au cours de la torsion :

- La contrainte de cisaillement croît rapidement au début du chargement. La rupture est atteinte pour une distorsion de l'ordre de 16 % (fig. IV.9.a).
 - La pression interstitielle augmente au début de l'essai, ensuite elle diminue jusqu'à la rupture. Sa variation est faible au voisinage de l'origine (fig. IV.9.b).
 - La contrainte axiale croît rapidement au début de l'essai, ensuite elle se stabilise avant de se remettre à croître (fig. IV.9.c).
 - Dans le plan déviateur (fig. IV.9.e), l'angle de Lode est constant au début du chargement, puis il subit des faibles variations.
 - La rotation des axes principaux des contraintes passe directement de 0° à 45° . Elle diminue rapidement au début du chargement, ensuite, elle subit des faibles variations jusqu'à la fin de l'essai (fig. IV.9.f).
 - La contrainte principale majeure augmente au début du chargement. Puis elle diminue avant de se remettre à croître jusqu'à la rupture (fig. IV.9.g).
 - La contrainte principale mineure diminue au début du chargement, ensuite elle croît jusqu'à la fin de l'essai (fig. IV.9.h).
- * Lors de ce chemin, on observe que l'évolution de la contrainte axiale n'est pas en accord avec celle de la déformation axiale, lors des essais de torsion à contrainte axiale imposée (figures IV.6.c et IV.8.c). Ceci peut être expliqué par l'anisotropie créée par la variation de la contrainte axiale au cours de la torsion à déformation axiale imposée.

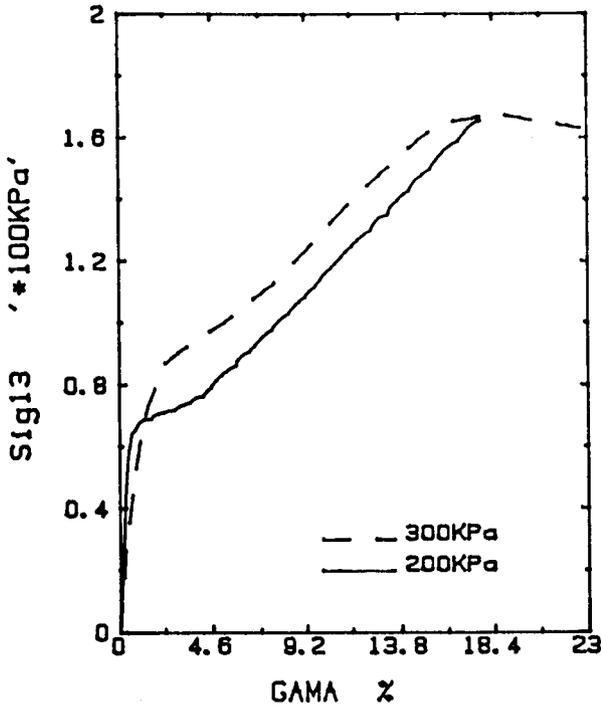


Fig. IV.9.a : Evolution du cisaillement

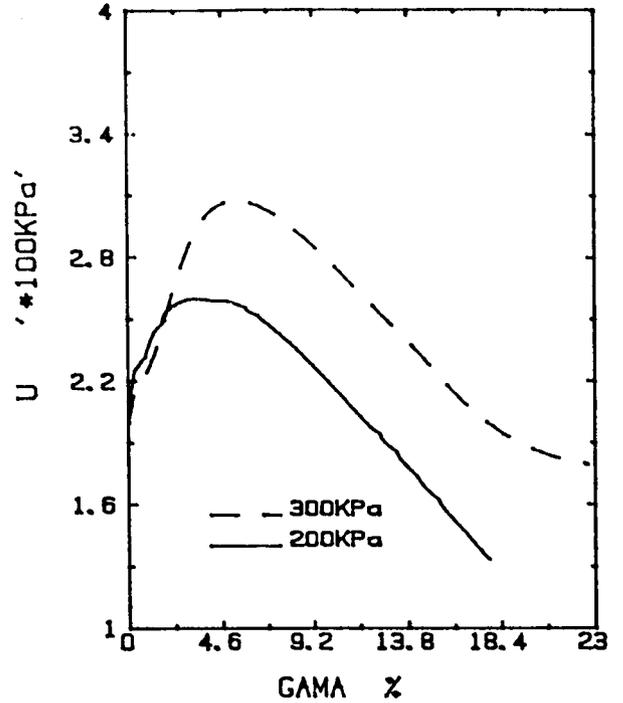


Fig. IV.9.f : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION NON DRAINE A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE

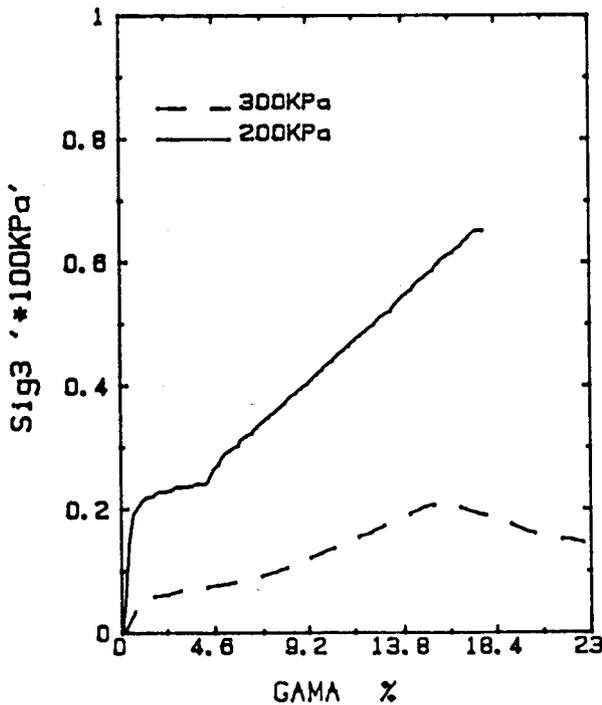


Fig. IV.9.c : Evolution de la contrainte axiale

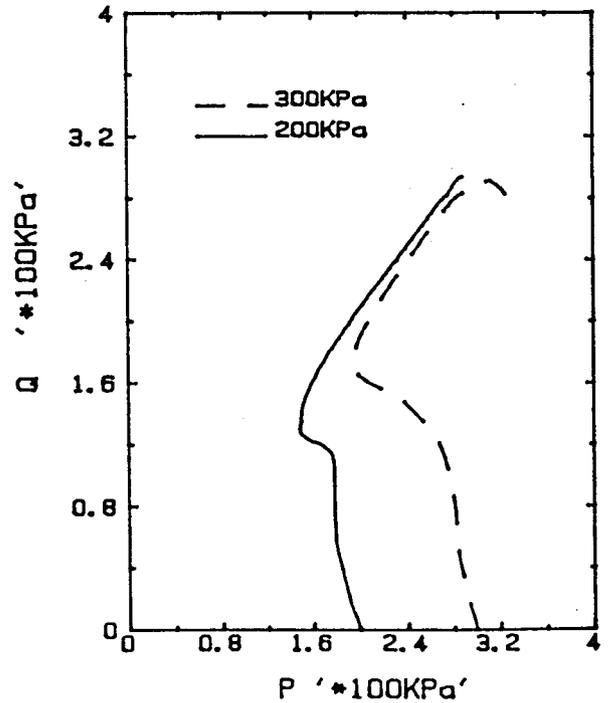


Fig. IV.9.d : Evolution du déviateur

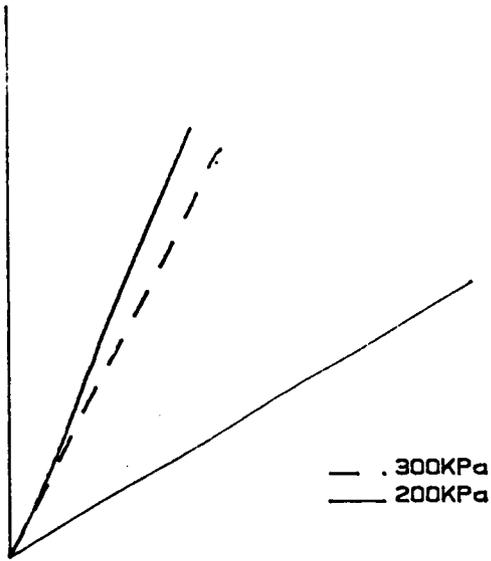


Fig. IV.9.e : Plan déviateur

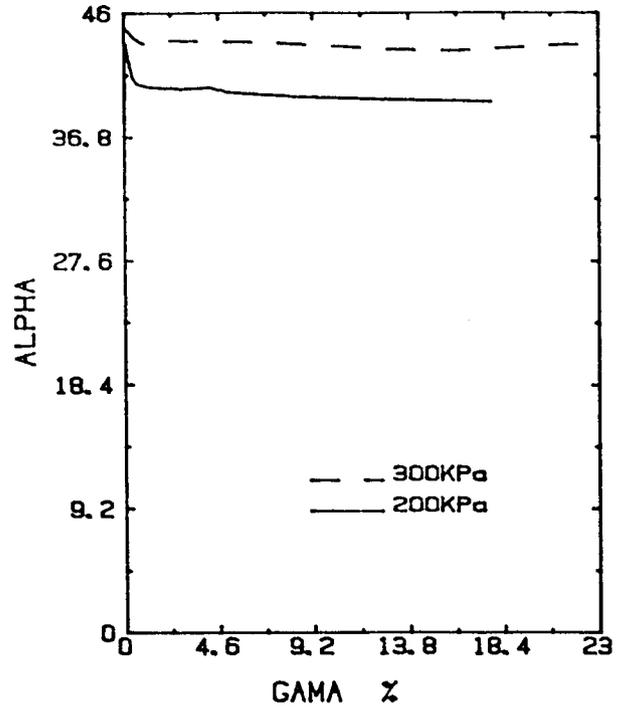


Fig. IV.9.f : Evolution de la rotation des axes principaux

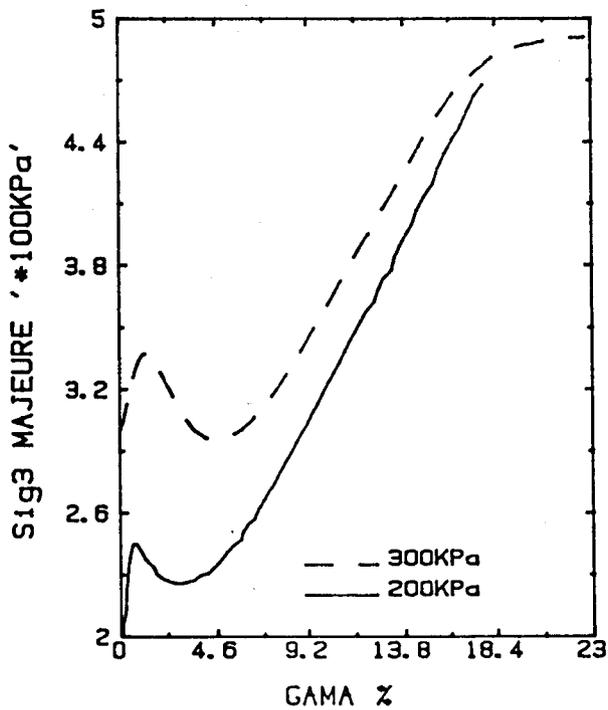


Fig. IV.9.g : Evolution de la contrainte principale majeure

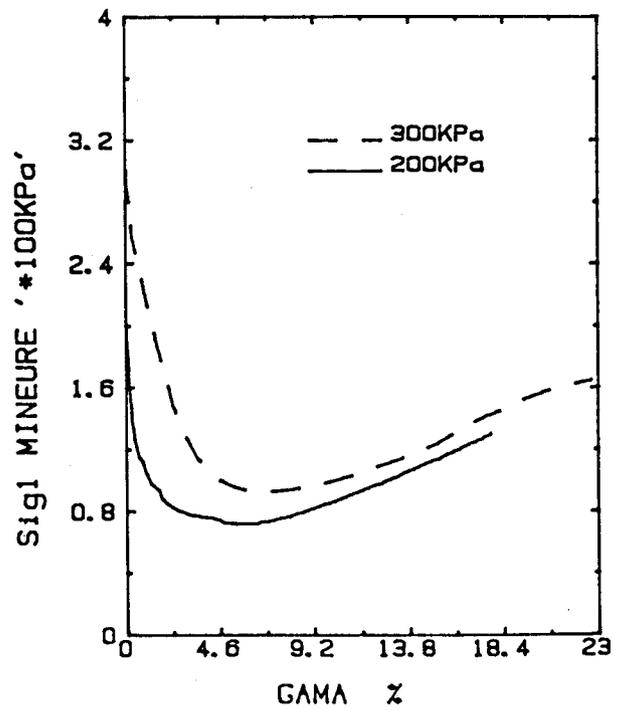


Fig. IV.9.h : Evolution de la contrainte principale mineure

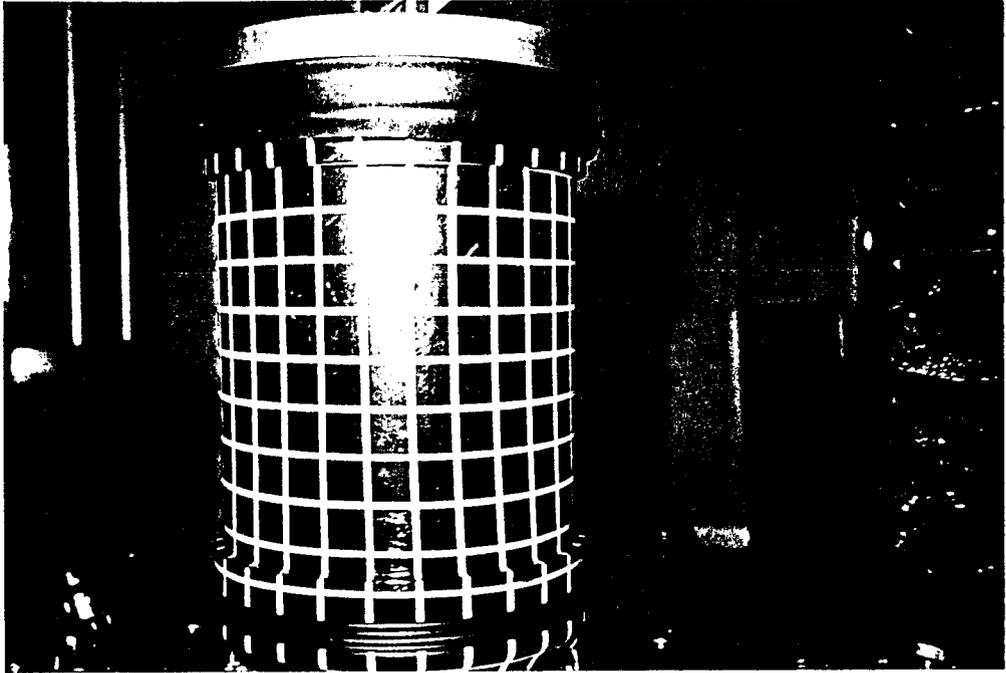


Fig. IV.10 : L'échantillon avant l'essai de torsion

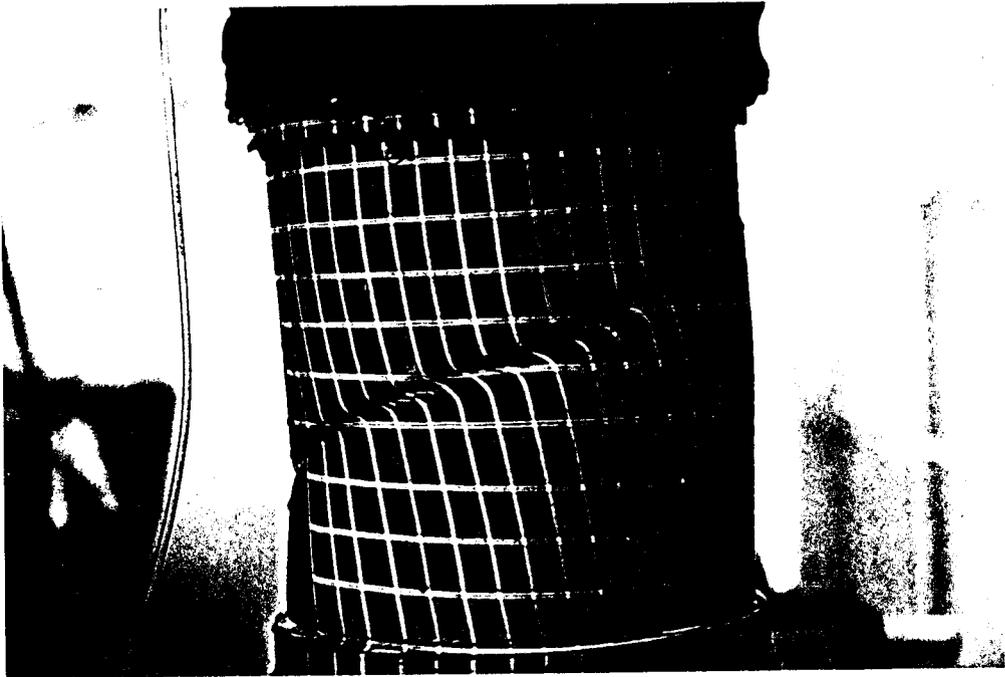
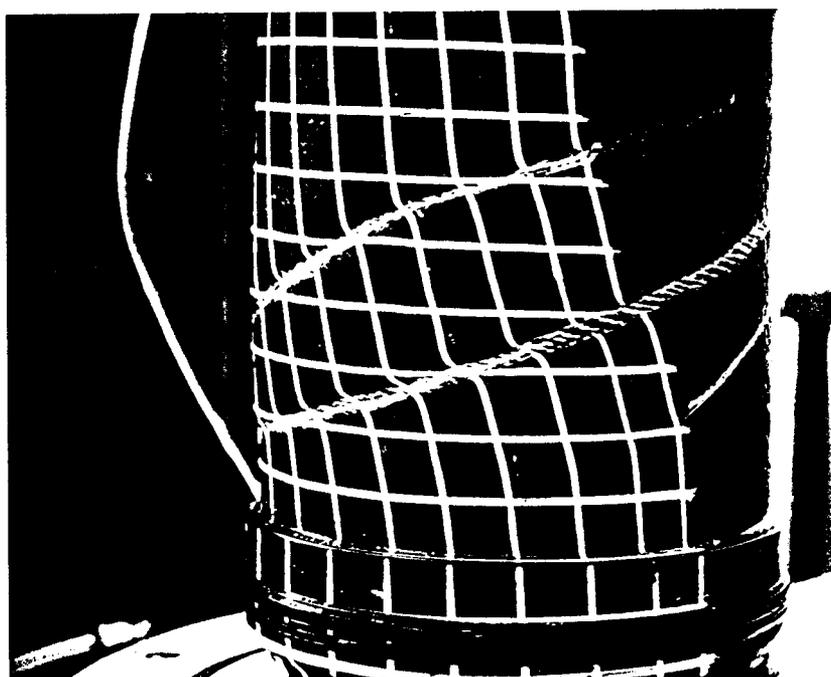
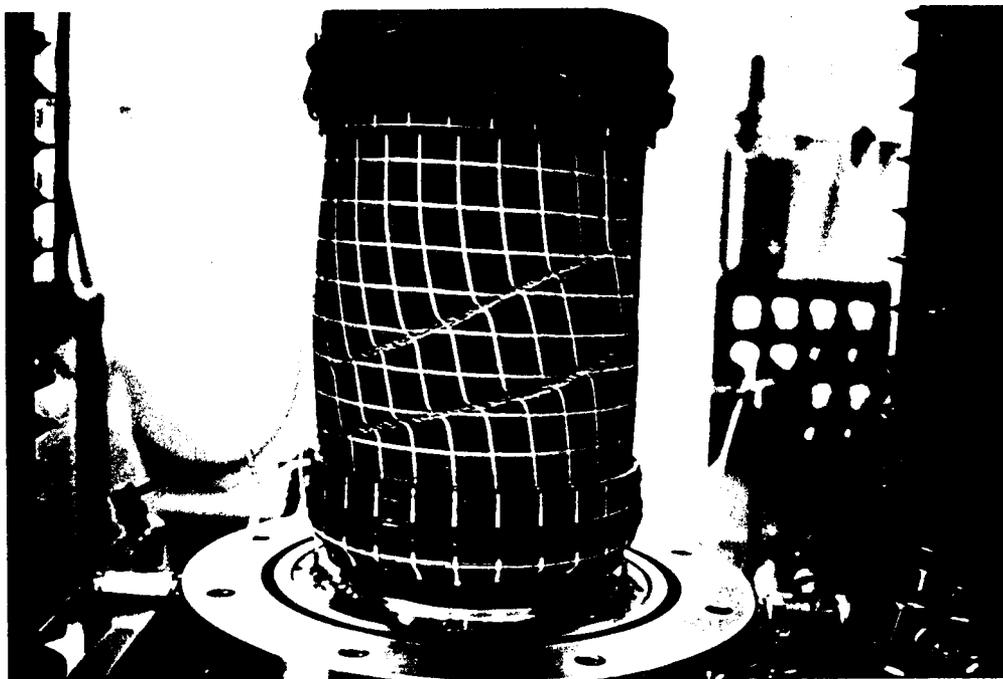


Fig. IV.10.a : L'échantillon après l'essai de torsion



*Fig. IV.10.b : Bande de rupture
(Essais à déformation axiale imposée)*

IV.2.2.6) Homogénéité de l'échantillon au cours de l'essai de torsion

La transmission du moment de torsion entre l'échantillon et les deux embases inférieure et supérieure nécessite un frettage parfait qui a pour conséquence de bloquer la déformation radiale au voisinage de deux embases.

Au cours des essais de torsion, on observe que l'échantillon se déforme avec une bonne homogénéité (garde sa forme d'origine). Ceci n'est pas le cas de l'essai triaxial où l'échantillon se déforme en tonneau important à partir d'une déformation axiale de l'ordre de 6 %. Cette bonne homogénéité montre que le cylindre creux est bien adapté pour la réalisation des essais de torsion où les hétérogénéités de l'échantillon ne sont pas très importantes même en grandes déformations.

Les essais réalisés ont montré que la rupture de l'échantillon se produit selon deux schémas :

- Dans le cas des essais de torsion à contrainte axiale imposée, la rupture se produit sous forme d'une ligne qui entoure l'échantillon et le traverse de l'embase inférieure à l'embase supérieure. Cette ligne est d'autant plus marquée que la pression de confinement est élevée (fig.IV.10.a).

- Dans le cas des essais de torsion à déformation axiale imposée, la rupture se produit sous forme d'une bande qui entoure l'échantillon et le traverse de l'embase inférieure à l'embase supérieure. Cette bande est d'autant plus marquée que la pression de confinement est élevée (fig. IV.10.b).

IV.2.2.7) Surface de rupture et état caractéristique

La figure (IV.11.a) illustre dans le plan (p',q) les états de contraintes à la rupture et au changement de phase pour les essais de torsion. On peut constater que :

- Les états de contraintes à la rupture se situent sur une courbe qui est légèrement inclinée vers l'axe de la pression moyenne. Ceci signifie que l'angle de frottement diminue lorsque la pression de confinement augmente.
- Les états de contraintes correspondant aux changements de phase se situent également sur une courbe (courbe d'état caractéristique) qui est légèrement inclinée vers l'axe de la pression moyenne. Nos essais de torsion confirment donc le concept d'état caractéristique observé à l'appareil triaxial conventionnel par Luong, (1978).

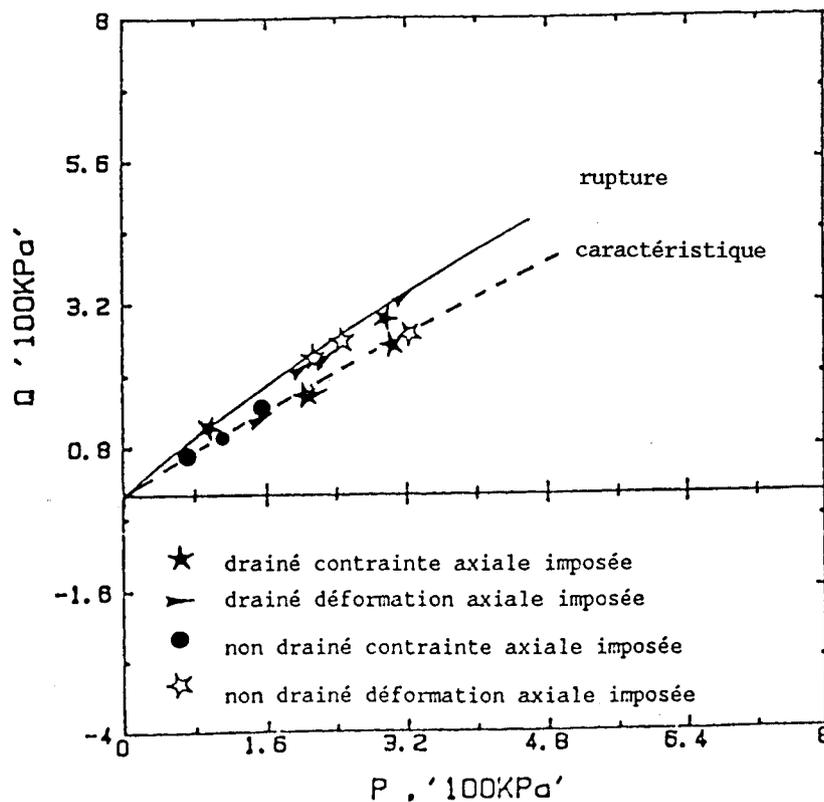


Fig. IV.11.a : Courbes de rupture et d'état caractéristique (Essais de torsion)

IV.2.2.8) Existence d'un domaine élastique ?

Au cours des essais de torsion à contrainte axiale imposée, nous avons observé une variation de volume très faible au voisinage de l'origine (fig. IV.12.b). Ceci peut être dû à l'existence au voisinage de l'origine d'un petit domaine élastique. La figure (IV.12.a) montre dans le plan (P, q) les états de contraintes correspondant à la limite de ce domaine. On constate que ce domaine est limité par une droite de pente = 7°.

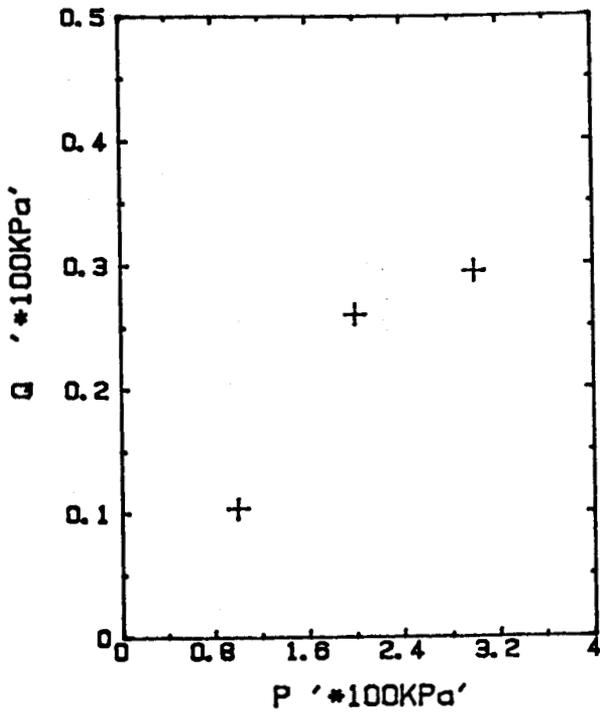


Fig. IV.12.a : Limite du domaine élastique

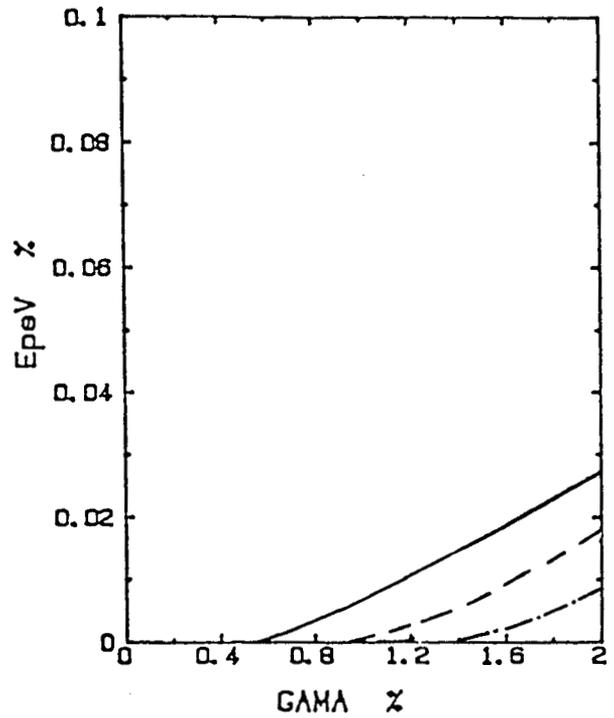


Fig. IV.12.b : Evolution de la déformation volumique à l'origine

IV.2.2.9) Essais monotones à b constant (radiaux dans le plan déviatorique)

Une modélisation fine du comportement des sables nécessite la prise en compte de l'effet de la contrainte intermédiaire. Afin d'illustrer cet effet, nous avons réalisé cinq essais radiaux dans le plan déviatorique pour différentes valeurs de b (b = 0 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1). Au cours de ces chemins, on impose constante la pression moyenne (P = 200 kPa) et le rapport $b = \frac{\sigma_{II} - \sigma_I}{\sigma_{III} - \sigma_I}$, σ_I , σ_{II} , σ_{III} sont les contraintes principales ($\sigma_{III} > \sigma_{II} > \sigma_I$).

La contrainte intermédiaire est donnée par :

$$\sigma_{II} = (1-b) \sigma_I + b \sigma_{III}$$

D'après cette relation, la contrainte intermédiaire augmente lorsque la valeur de b diminue, elle passe de la contrainte mineure à la contrainte majeure lorsque b varie entre 0 et 1.

On remarque que cet essai correspond à un essai véritable triaxial sur un échantillon cubique (fig. IV.13).

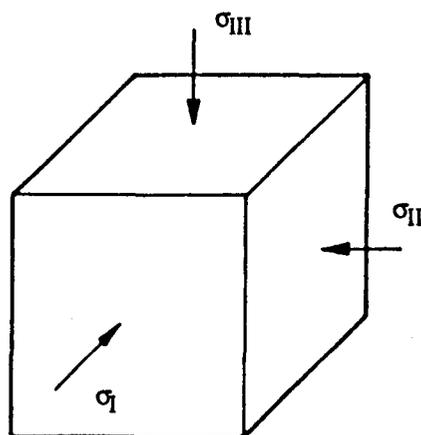


Fig. IV.13 : Echantillon cubique

Etant donné les difficultés rencontrées pour mesurer la déformation radiale (problème d'encombrement dans la cellule), nous n'avons pas pu déterminer avec bonne précision les déformations principales. Les résultats obtenus sont illustrés en fonction de la déformation axiale (fig. IV.13.a à IV.13.g) . On peut constater qu'au cours de ces essais :

- Le déviateur de contrainte augmente au début du chargement et atteint un palier pour des déformations axiales de l'ordre de 4 % (fig. IV.13.a). Pour des essais avec cisaillement ($b = 0.25 ; 0.5 ; 0.75$), la distorsion atteint des valeurs de l'ordre de 29 %, (fig. IV.13.c).
- La déformation volumique est généralement contractante au début du chargement, ensuite elle devient dilatante. Pour l'essai à $b = 0$, on observe au début du chargement une petite phase de dilatance qui peut être générée par la décharge opérée dans la direction latérale. La phase de contractance dépend de la valeur de b , elle augmente lorsque b croît (fig. IV.13.b).
- Le signe de la déformation axiale dépend de la valeur de b . En effet, la déformation axiale est en extension pour les fortes valeurs de b (0.75 et 1), et en compression pour les faibles valeurs de b (0 et 0.25). Tandis que pour $b = 0.5$, elle est en compression jusqu'à une distorsion de l'ordre de 5 %, ensuite elle est en extension jusqu'à la rupture (fig. IV.13.d).
- La contrainte principale majeure croît rapidement au début du chargement ensuite, elle atteint un palier avec le niveau de contrainte qui augmente lorsque la valeur de b diminue (fig. IV.13.f).
- La contrainte principale mineure décroît au début du chargement, puis elle atteint un palier avec un niveau de contrainte qui croît lorsque la valeur de b diminue (fig. IV.13.g).

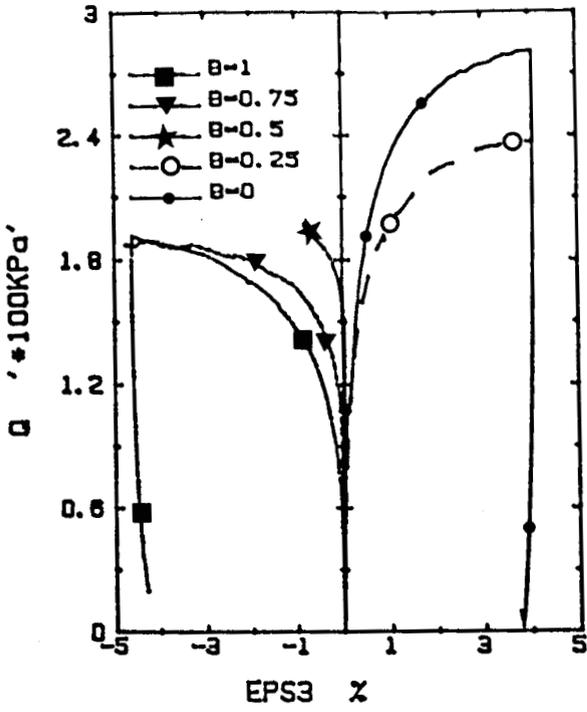


Fig. IV.13.a : Evolution du déviateur

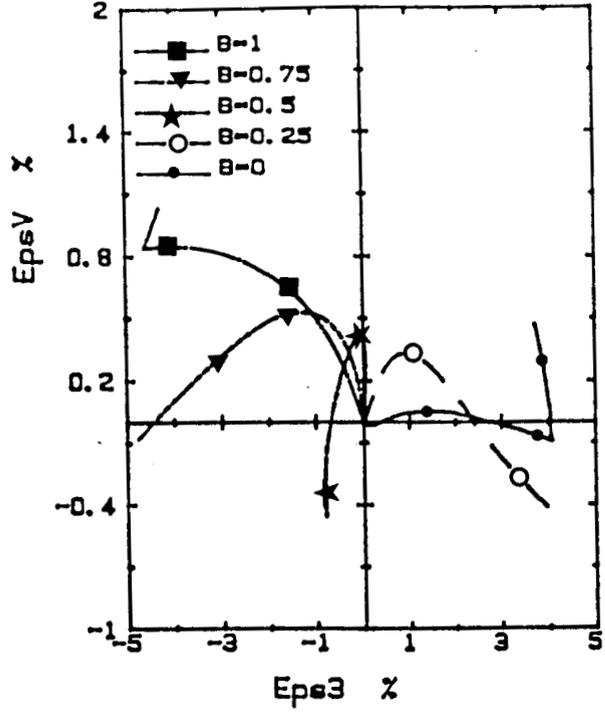


Fig. IV.13.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS A b CONSTANT

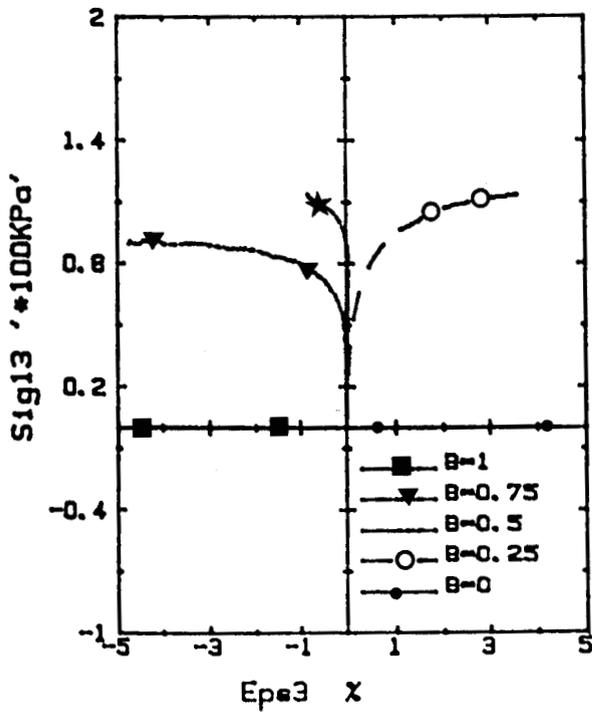


Fig. IV.13.c : Evolution du cisaillement

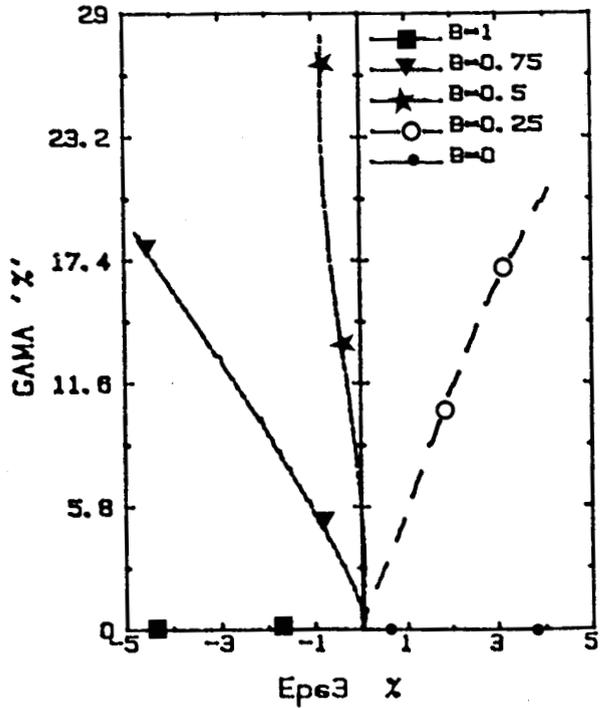


Fig. IV.13.d : Evolution de la distorsion

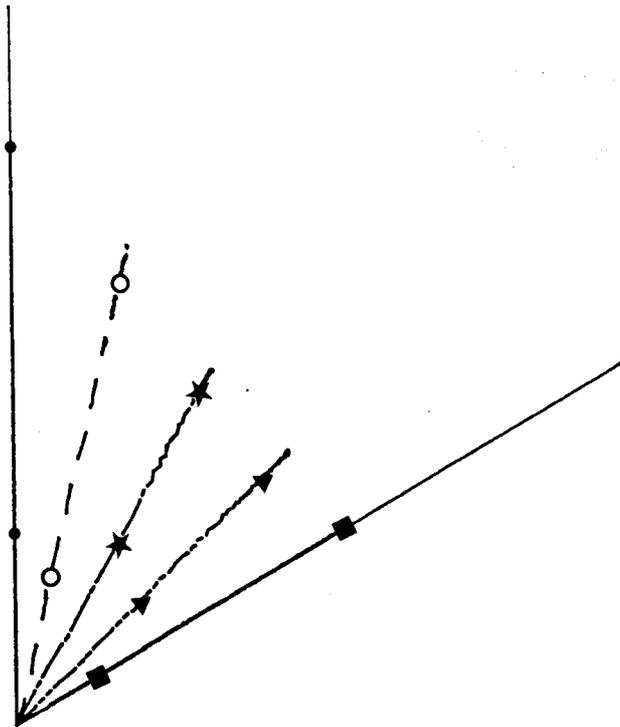


Fig. IV.13.e : plan déviateur

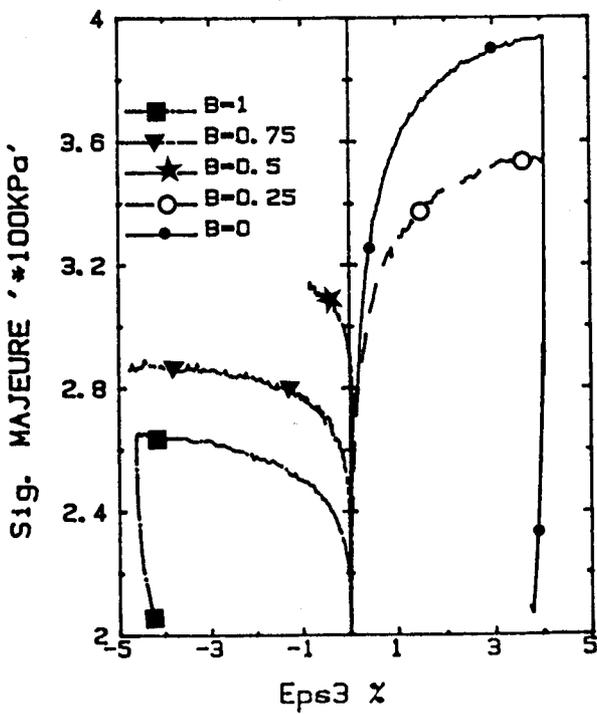


Fig. IV.13.f : Evolution de la contrainte principale majeure

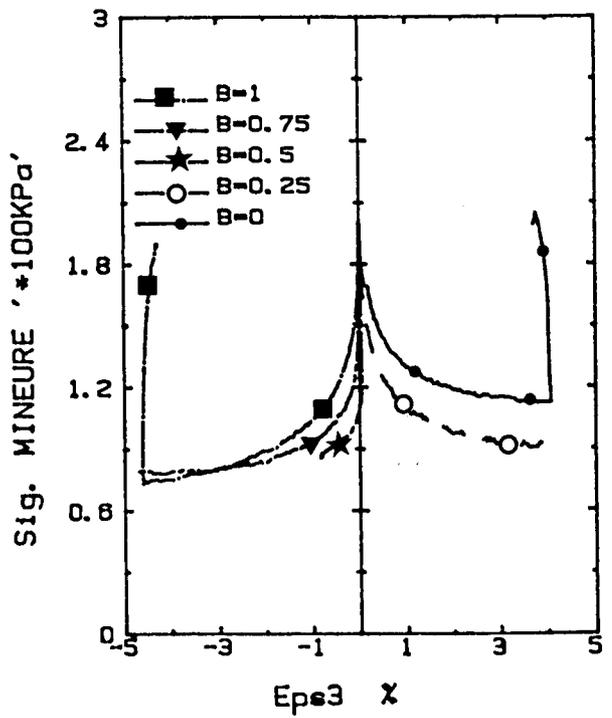


Fig. IV.13.g : Evolution de la contrainte principale mineure

* Surface de rupture et état caractéristique

La figure (IV.14.a) illustre, dans le plan déviateur, les états de contraintes à la rupture et au changement de phase pour les cinq essais. Cette figure montre que les états de contraintes à la rupture et au changement de phase se situent au voisinage de deux droites. L'écart entre ces deux états diminue lorsque la valeur de b augmente (on s'approche de l'extension).

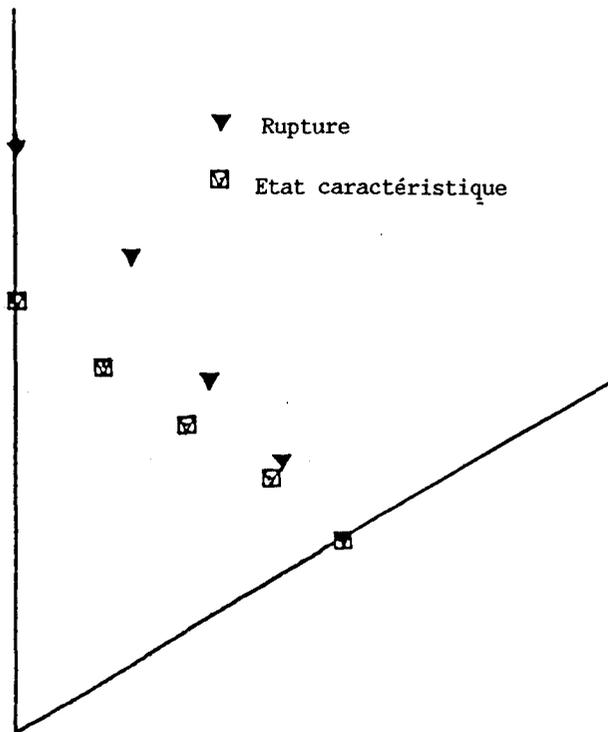


Fig. IV.14.a : Courbe d'état caractéristique et de rupture

IV.2.3) ETUDE DE L'EFFET DE L'HISTOIRE DE CHARGEMENT

IV.2.3.1) Introduction

Dans cette partie, nous proposons d'étudier l'effet de l'histoire de chargement sur le comportement du sable. Pour illustrer cet effet, nous avons réalisé des essais de torsion à déformation ou contrainte axiale imposée, sur des échantillons soumis préalablement à des chargements monotones ou cycliques.

IV.2.3.2) Effet du déviateur initial (chargement monotone)

Deux séries d'essais ont été réalisées pour l'étude de l'effet du déviateur initial sur le comportement du sable :

- La première série comporte deux essais de torsion à contrainte axiale imposée qui ont été effectués à une pression de confinement de 200 kPa, en partant d'un état initial à déviateur nul ou positif (100 kPa) (fig. IV.15).

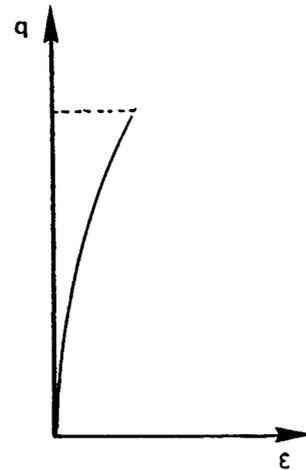


Fig. IV.15

- La seconde série comporte trois essais de torsion à déformation axiale imposée qui ont été réalisés à une pression de confinement de 300 kPa, en partant d'un état initial à déviateur négatif (- 100 kPa), nul ou positif (50 kPa) (fig. IV.16).

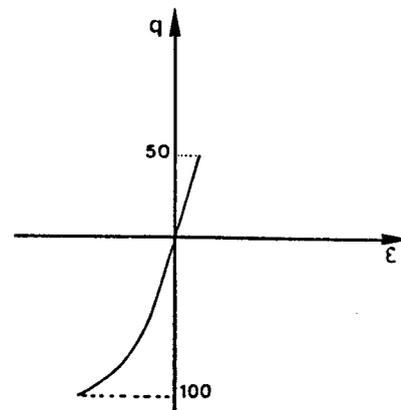


Fig. IV.16

Chemins du préchargement

1 - Essais à contrainte axiale imposée

Les résultats des essais réalisés sont illustrés dans les figures (IV.15.a) à (IV.15.c). On peut constater que le déviateur initial a pour effet :

- D'augmenter la contrainte de cisaillement à la rupture. Ceci est dû à l'augmentation de la pression moyenne engendrée par le chargement monotone (fig. IV.15.a).

- D'agrandir le domaine d'élasticité initial (à déformation volumique nulle), suite à l'écroutissage au cours du chargement monotone (fig. IV.15.b).

- De retarder l'apparition de la dilatance. En effet, celle-ci est observée pour une distorsion de l'ordre de 10 % pour l'essai à déviateur initial positif, et de 5 % lors de l'essai à état initial isotrope (fig. IV.15.b).

- De modifier sensiblement la variation de la déformation axiale. En effet, lors de l'essai à déviateur initial positif, on observe une augmentation continue de la déformation axiale ; or, l'essai à déviateur initial nul montre que la déformation axiale diminue d'une manière continue après une légère croissance au début du chargement (fig. IV.15.c).

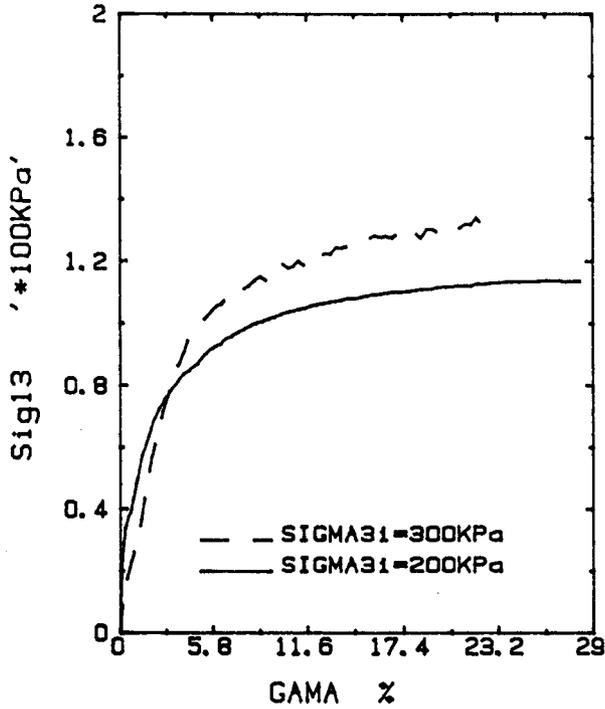


Fig. IV.15.a : Evolution du cisaillement

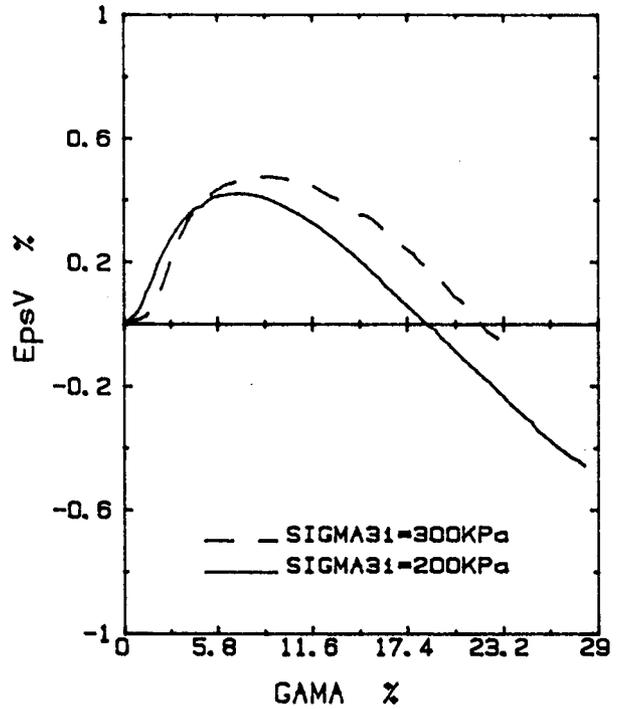


Fig. IV.15.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAI DE TORSION DRAINE
A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet du déviateur initial)

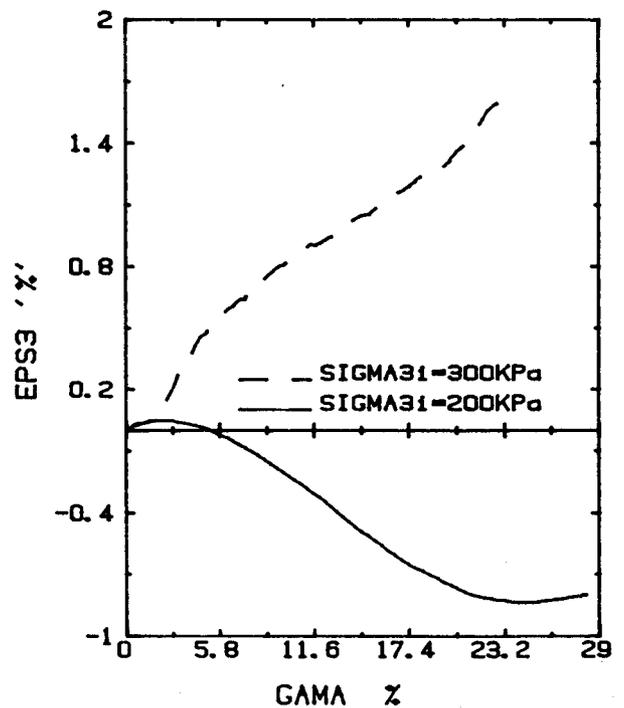


Fig. IV.15.c : Evolution de la déformation axiale

2. Essais à déformation axiale imposée

Les résultats des essais réalisés sont illustrés dans les figures (IV.16.a) à (IV.16.e). On peut constater que :

- Le déviateur initial influe sensiblement sur l'évolution de la contrainte axiale ; En partant d'un état initial isotrope, la contrainte axiale augmente au début du chargement, ensuite, elle décroît légèrement avant de se mettre à croître. Pour un déviateur initial positif, on observe une diminution importante de la contrainte axiale au début du chargement, ensuite elle augmente jusqu'à la rupture. Ceci montre qu'en début du chargement, l'évolution de la contrainte axiale dépend d'une manière très sensible du signe du déviateur initial, mais qu'ensuite, elle est conditionnée par la dilatace qui a pour effet d'augmenter la contrainte axiale (fig. IV.16.c).
- Le déviateur initial n'a pas d'influence sur l'évolution de la contrainte de cisaillement (fig. IV.16.a), mais influe moyennement sur la déformation volumique. La déformation volumique maximale augmente avec le déviateur initial (fig. IV.16.b).
- L'évolution de l'angle de Lode dépend d'une manière très sensible du signe du déviateur au début du chargement (fig. IV.16.d).
- L'évolution de la rotation des axes principaux dépend sensiblement du signe du déviateur initial au début du chargement (fig. IV.16.e).

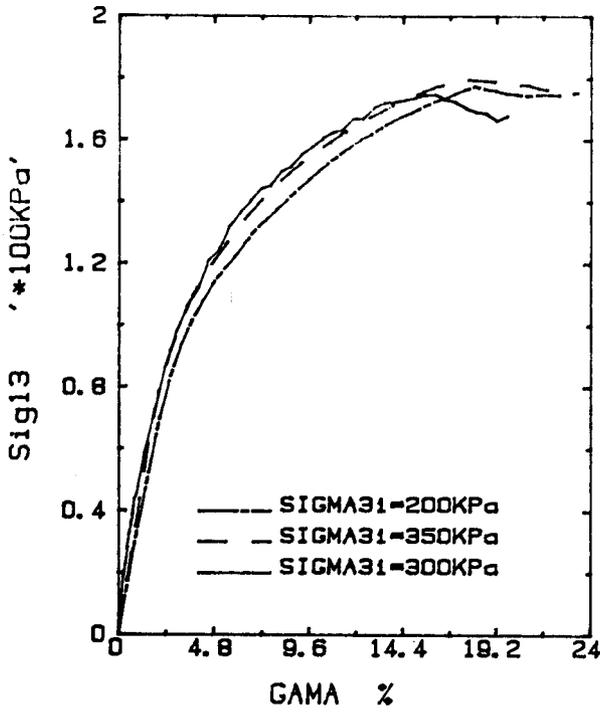


Fig. IV.16.a : Evolution du cisaillement

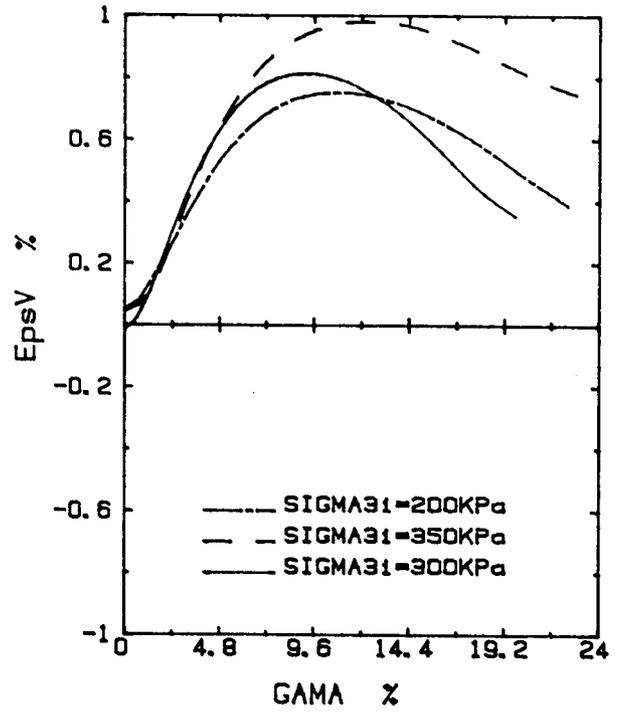


Fig. IV.16.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAI DE TORSION DRAINE
A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE
(Effet du déviateur initial)

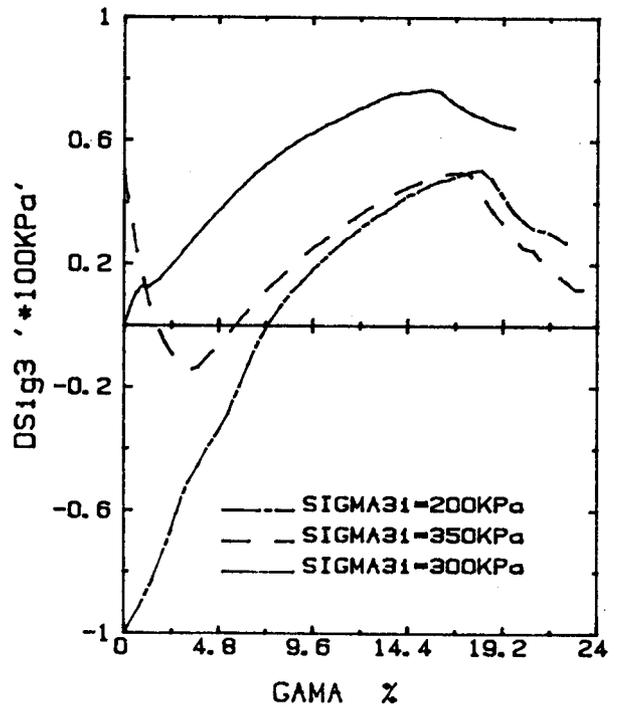


Fig. IV.16.c : Evolution de la contrainte axiale

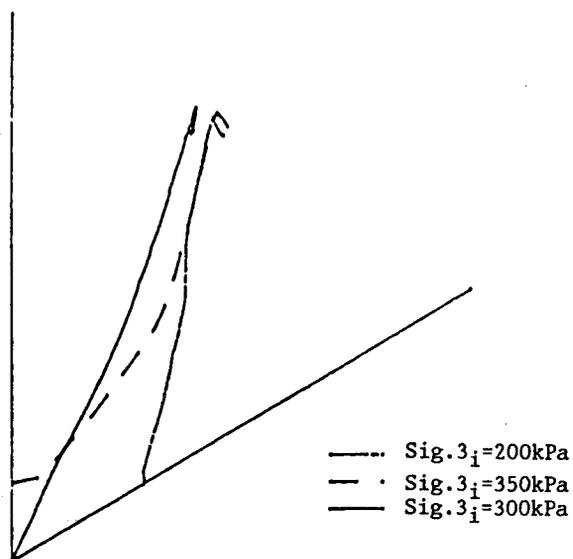


Fig. IV.16.d : Plan déviateur

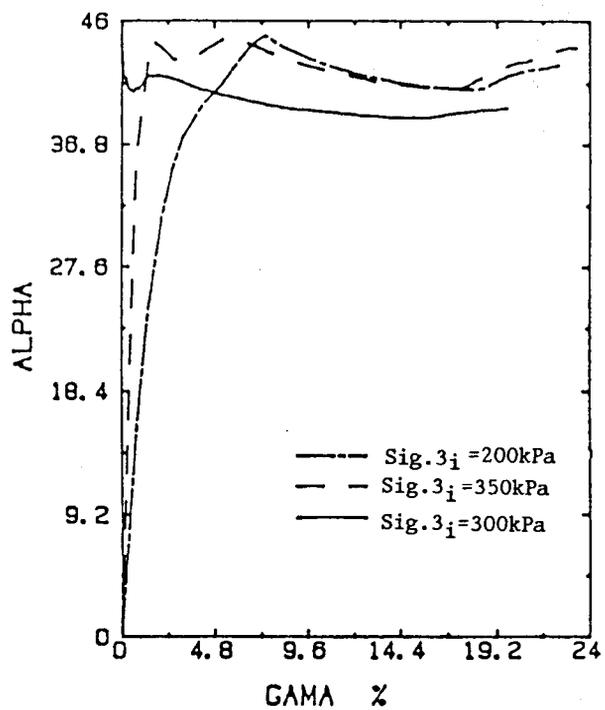


Fig. IV.16.e : Evolution de la rotation des axes principaux

IV.2.3.3) Effet d'un préchargement cyclique

Trois séries d'essais ont été réalisés pour étudier l'effet d'un chargement cyclique sur le comportement du sable :

- La première série comporte deux essais de torsion à contrainte axiale imposée, réalisée à une pression de confinement de 200 kPa, en partant d'un état initial isotrope ou après un cycle de chargement (fig. IV.17).

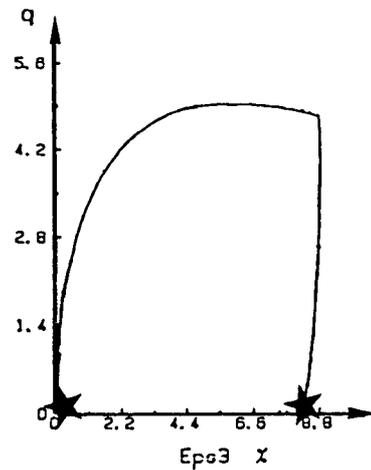


Fig. IV.17

- La seconde série est composée de deux essais de torsion, à déformation axiale imposée, qui ont été effectués à une pression de confinement de 300 kPa, en partant d'un état initial isotrope ou après un cycle de chargement (fig. IV.18).

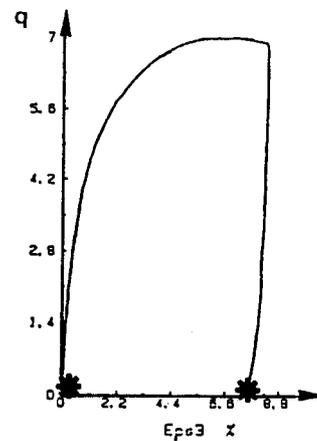


Fig. IV.18

- La dernière série comporte également deux essais de torsion, à déformation axiale imposée, qui ont été réalisés à une pression de confinement de 300 kPa, en partant d'un déviateur initial de 150 kPa obtenu après un chargement monotone ou cyclique (fig. IV.19).

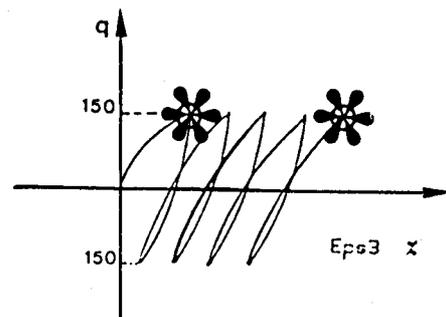


Fig. IV.19

Chemins du préchargement

1 - Essai à contrainte axiale imposée - Effet d'un cycle de chargement

Les résultats des essais réalisés sont illustrés dans les figures (IV.17.a) à (IV.17.c). On peut constater que le cycle de charge-décharge a pour effet :

- D'augmenter de 20 % la contrainte de cisaillement à la rupture. Ceci est dû au compactage du matériau au cours du cycle de charge-décharge (fig. IV.17.a).
- De diminuer la distorsion correspondant au changement de phase, et d'accentuer la dilatance à la rupture (fig. IV.17.b).
- De modifier l'évolution de la déformation axiale. En effet, le cycle de charge-décharge réduit sensiblement la phase de compression de la déformation axiale, et accentue sa phase d'extension (fig. IV.17.c).

2 - Essais à déformation axiale imposée - effet d'un cycle de chargement

Les résultats de cette série d'essais sont illustrés dans les figures (IV.18a) à (IV.18.d). Une analyse de ces résultats montre que le cycle de charge-décharge influe sur le comportement du sable. En effet, on observe :

- Une augmentation de la contrainte du cisaillement à la rupture (fig. IV.18.a).
- Une accentuation de la dilatance, et une diminution de la déformation volumique maximale, suite au compactage du matériau au cours du cycle de charge-décharge (fig. IV.18.b).
- Une augmentation de l'ordre de 100 % de la contrainte axiale maximale (fig. IV.18.d).
- Une variation très importante de la rotation des axes principaux. Ceci est dû à la variation de la contrainte axiale (fig. IV.18.c).

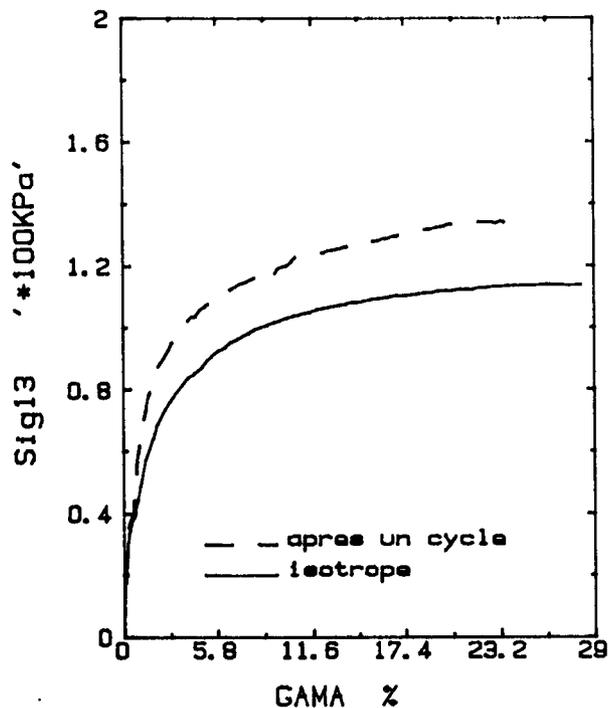


Fig. IV.17.a : Evolution du cisaillement

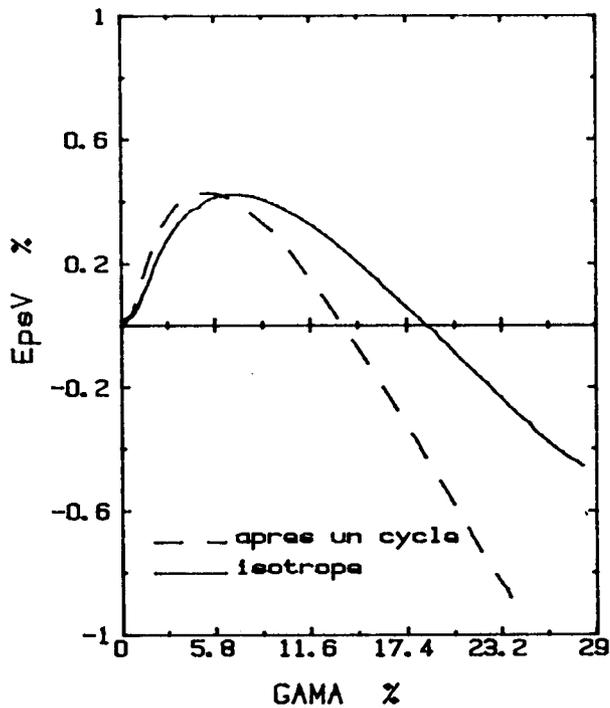


Fig. IV.17.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS DE TORSION DRAINES
A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet d'un cycle)

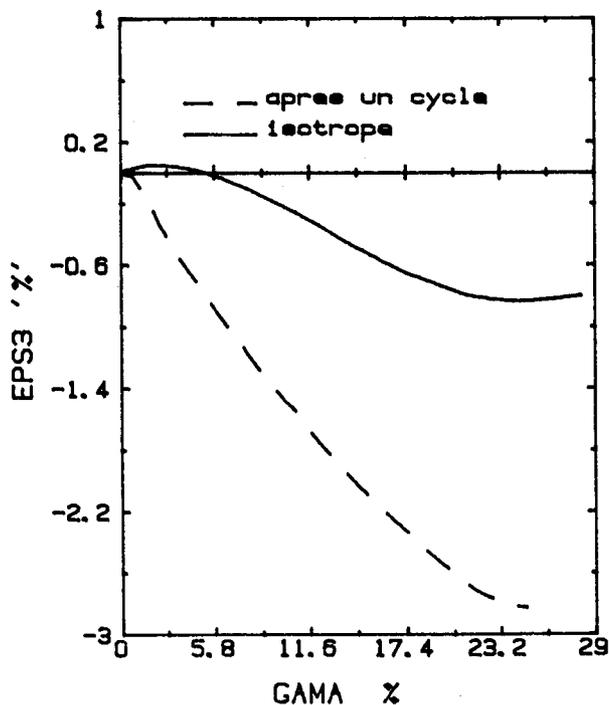


Fig. IV.17.c : Evolution de la déformation axiale

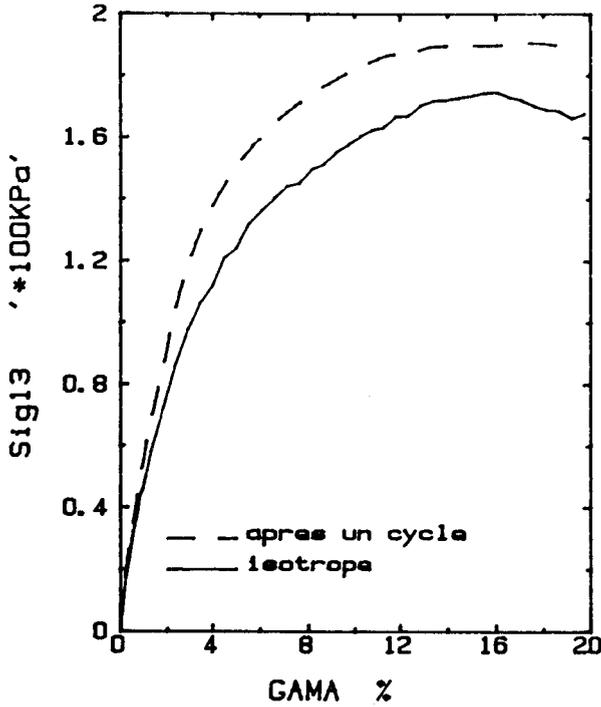


Fig. IV.18.a : Evolution du cisaillement

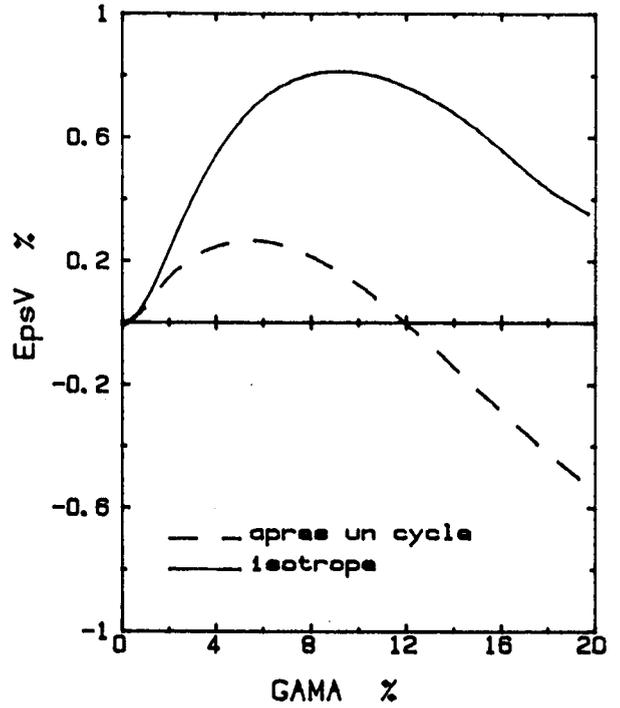


Fig. IV.18.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS DE TORSION DRAINE A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE
(Effet d'un cycle)

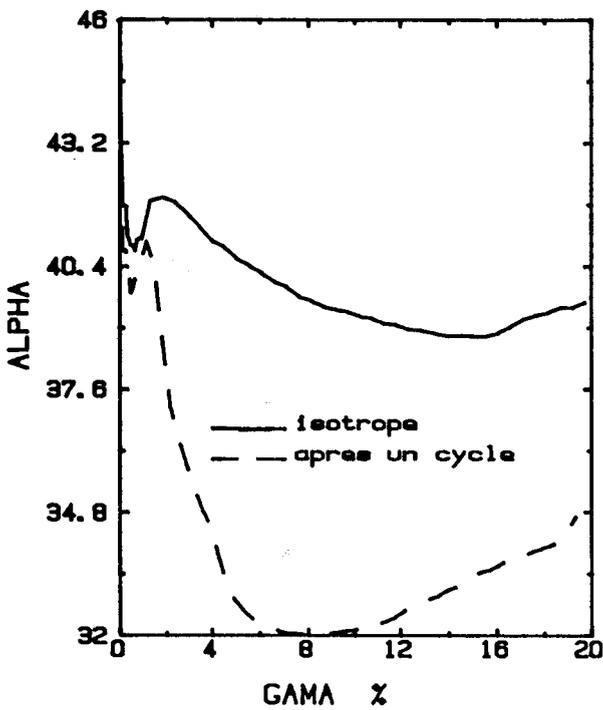


Fig. IV.18.c : Evolution de la rotation des axes principaux

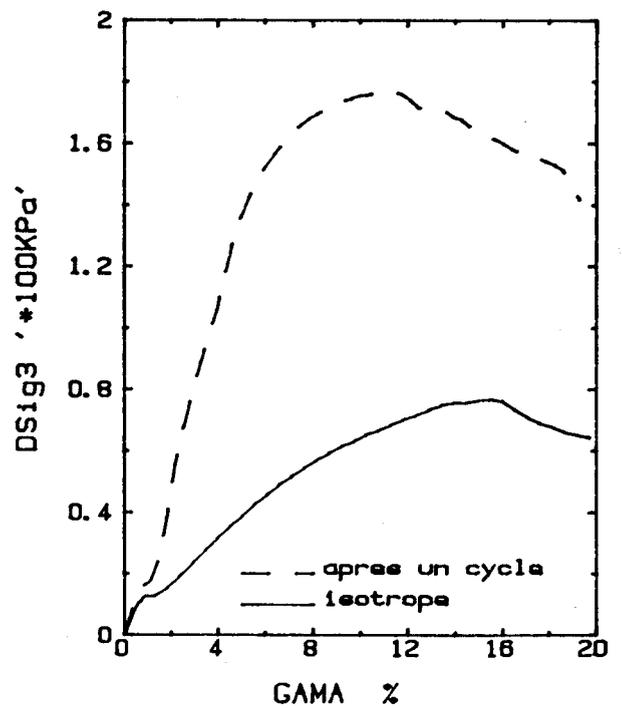


Fig. IV.18.d : Evolution de la contrainte axiale

3 - Essais à déformation axiale imposée - effet des 5 cycles de chargement

Les résultats des essais réalisés sont montrés dans les figures (IV.19.a) à (IV.19.d). On peut constater que les cycles de chargement ont pour effet de densifier le sable. Ceci a pour conséquence de :

- Augmenter légèrement la contrainte du cisaillement (fig. IV.19.a).
- Diminuer sensiblement la déformation volumique contractante (fig. IV.19.b).
- Diminuer légèrement la contrainte axiale minimale au début du chargement (fig. IV.19.d).
- Augmenter légèrement l'angle de rotation des axes principaux principaux au début du chargement (fig.IV.19.c).

IV.2.3.4) Effet du chemin de sollicitation

Le comportement du sable dépend sensiblement de la rotation des axes principaux. Afin d'illustrer cet aspect du comportement du sable, nous proposons d'étudier l'effet de l'histoire de chargement sur la réponse du sable, en réalisant deux essais menant au même état de contraintes ($\sigma_r = \sigma_\theta = 300$ kPa, $\sigma_z = 464$ kPa, $\sigma_{\theta z} = 168$ kPa), et en parcourant deux chemins de chargement différents :

- Le premier essai comporte un chemin triaxial de charge-décharge suivi par un chemin de torsion à déformation axiale imposée (fig. IV.20.a).
- Le second essai comporte un chemin de torsion à déformation axiale imposée suivi par un chemin triaxial conventionnel (fig. IV.20.a).

Les résultats de ces deux essais sont illustrés dans les figures (IV.20.b) à (IV.20.d). Une analyse de ces résultats montre que les réponses en déformations sont sensiblement différentes. En effet :

- La distorsion à la fin du premier essai est de 7 % tandis qu'elle atteint 20 % à la fin du second essai (fig. IV.20.b).
- La déformation volumique suit deux chemins sensiblement différents où elle atteint respectivement 1.56 % et 0.56 % (fig. IV.20.c).
- La déformation axiale atteint 7 % à la fin du premier essai, mais elle reste faible à la fin du second essai (fig. IV.20.d).

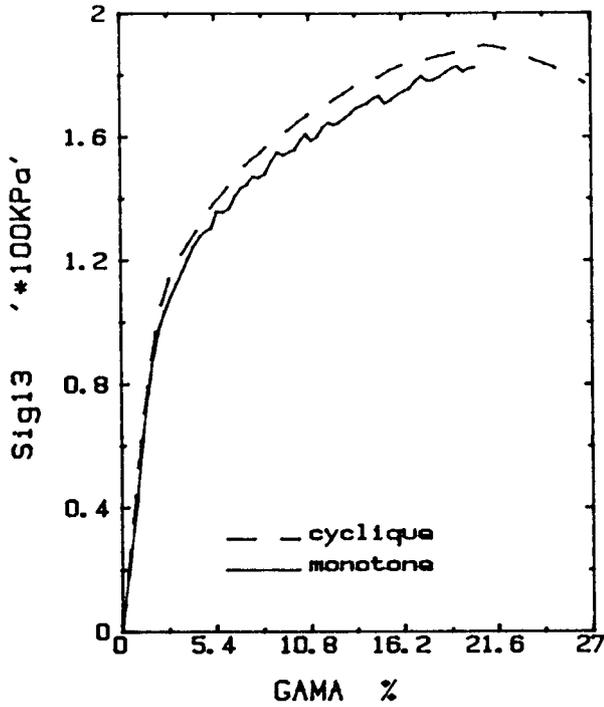


Fig. IV.19.a : Evolution du cisaillement

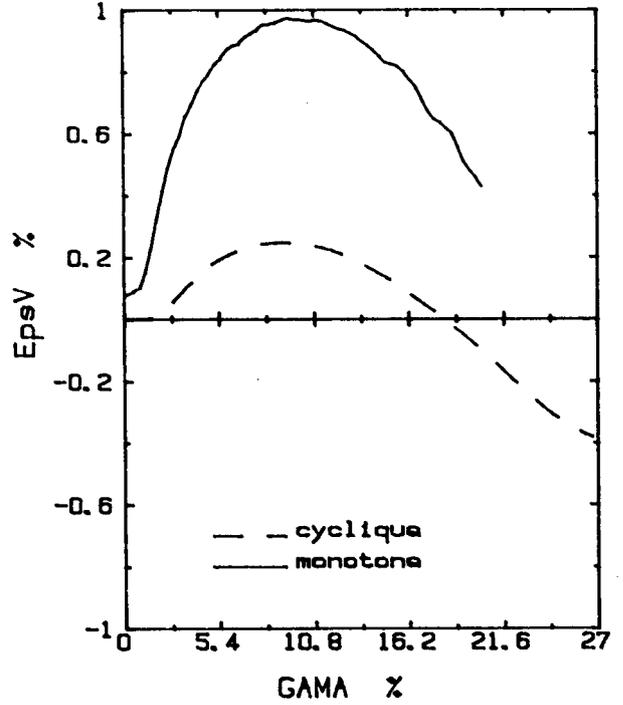


Fig. IV.19.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAIS DE TORSION DRAINE A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE
(Effet du chargement cyclique)

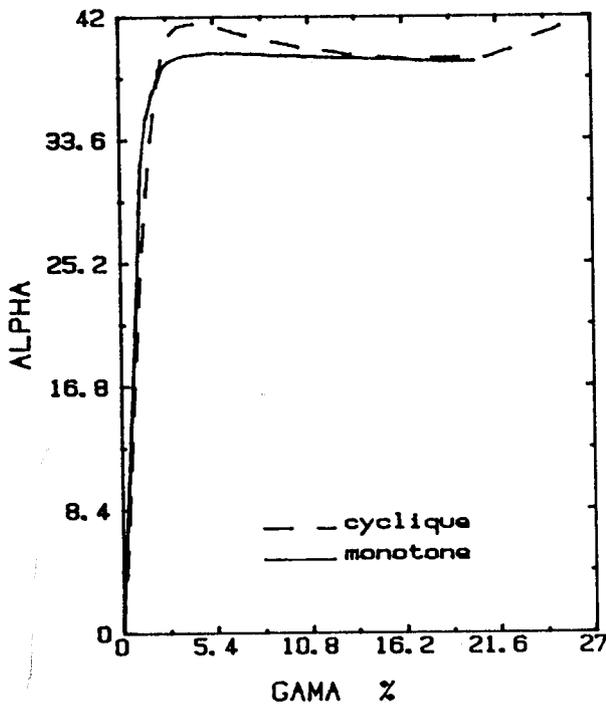


Fig. IV.19.c : Evolution de la rotation des axes principaux

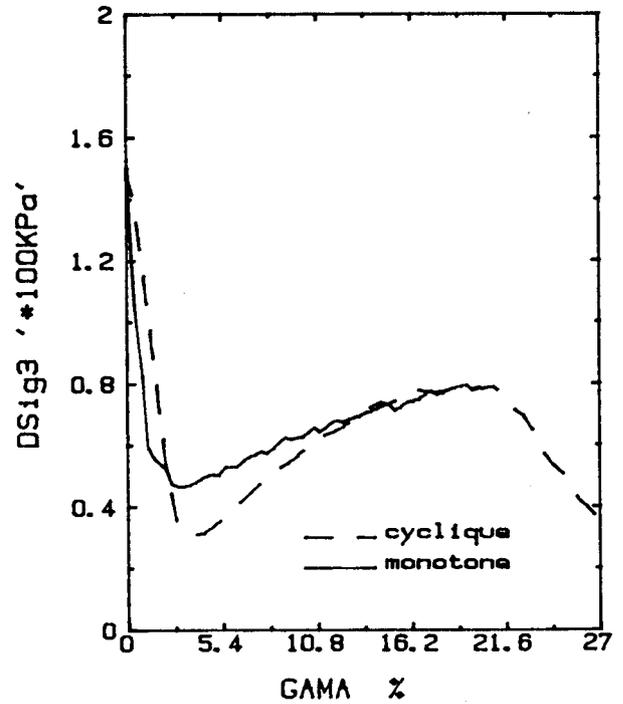


Fig. IV.19.d : Evolution de la contrainte axiale

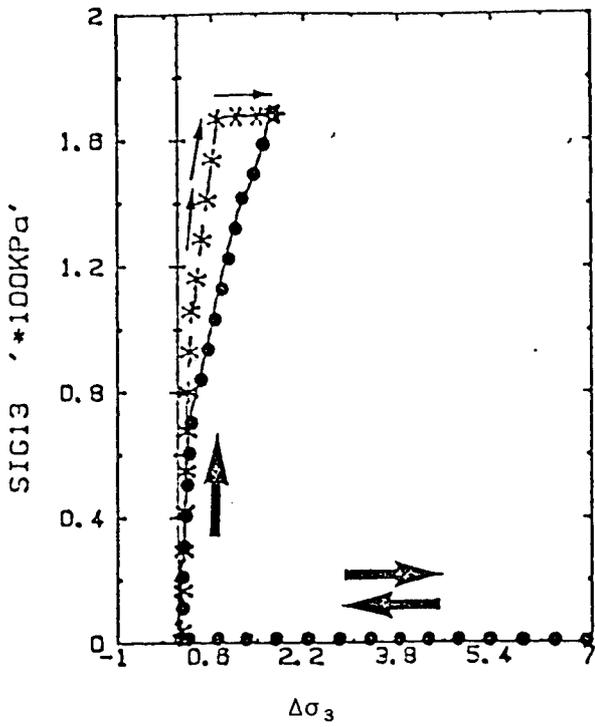


Figure IV.20.a : Chemin de sollicitation

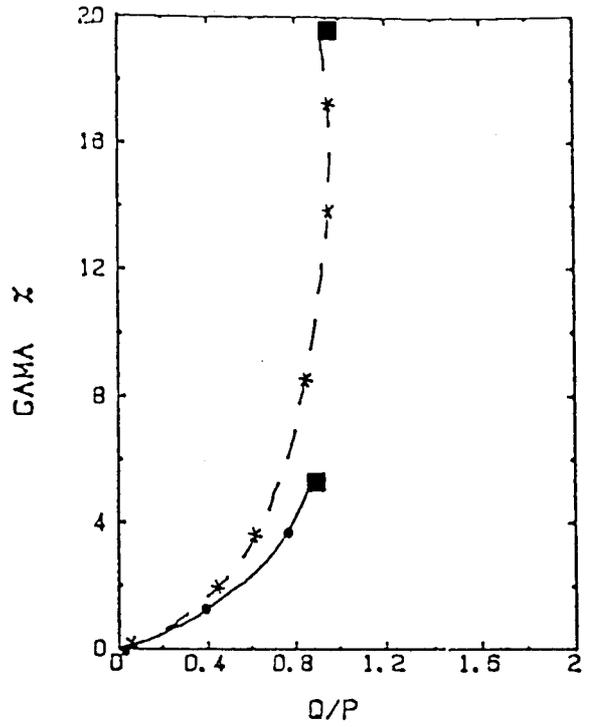


Figure IV.20.b : Evolution de la distorsion

EFFET DU CHEMIN DE SOLLICITATION

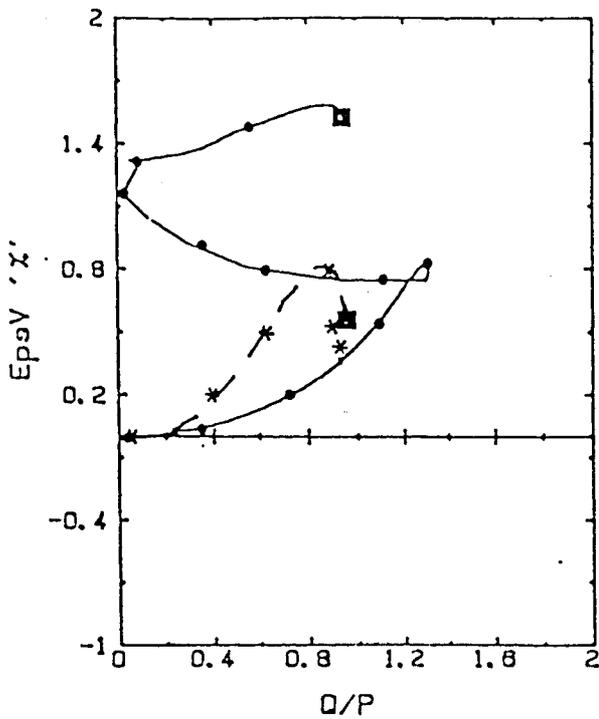


Fig. IV.20.c : Evolution de la déformation volumique

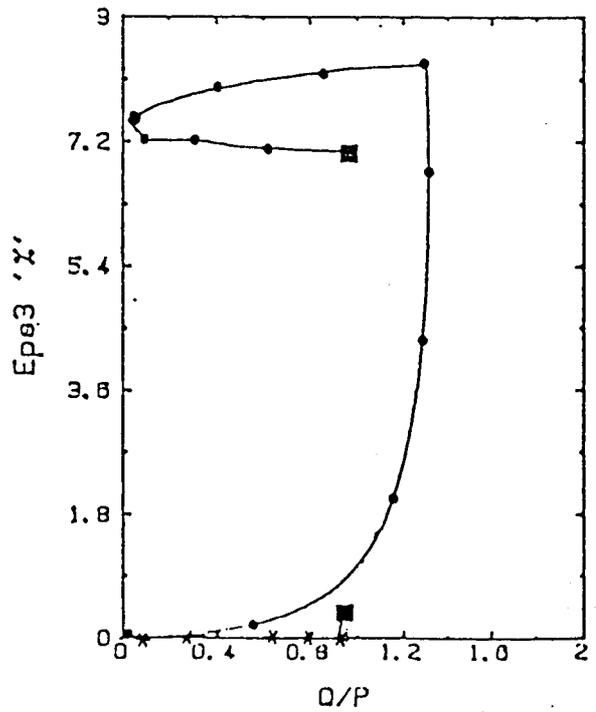


Fig. IV.20.d : Evolution de la déformation axiale

IV.3) ESSAIS CYCLIQUES

Le dimensionnement de certains ouvrages en Génie Civil, comme les fondations des structures offshore, nécessite la modélisation du comportement des sols sous chargements cycliques. Dans ce chapitre, nous allons présenter des essais cycliques qui ont été réalisés à une pression de confinement de 200 kPa, à l'appareil de torsion. Ces essais vont être classés en trois catégories :

- Les essais triaxiaux conventionnels.
- Les essais de torsion à déformation ou à contrainte axiale imposée.

IV.3.1) Essais triaxiaux conventionnels

Dans cette section, nous allons présenter deux essais triaxiaux cycliques, réalisés respectivement en condition drainée et non drainée ; ensuite, nous allons étudier l'effet des bornes des cycles du chargement, sur la liquéfaction du sable.

IV.3.1.1) Essai cyclique drainé

Nous avons effectué un essai triaxial drainé composé de 6 séries de chargement. Chaque série comporte 20 cycles. Les amplitudes du chargement ont été fixés de la manière suivante :

- Dans la première série $0 < q < 75 \text{ kPa}$
- Dans la deuxième série $75 \text{ kPa} < q < 150 \text{ kPa}$
- Dans la troisième série $150 \text{ kPa} < q < 225 \text{ kPa}$
- Dans la quatrième série $75 \text{ kPa} < q < 225 \text{ kPa}$
- Dans la cinquième série $0 \text{ kPa} < q < 225 \text{ kPa}$
- Dans la sixième série $- 75 \text{ kPa} < q < 225 \text{ kPa}$

Les figures (IV.21.a et IV.21.b) illustrent les résultats de cet essai. On peut constater que :

- La déformation axiale augmente au cours du chargement à un taux qui croît avec le déplacement du centre des cycles vers le déviateur positif (le domaine sur caractéristique (fig. IV.21.a).
- Le matériau est globalement contractant au cours de chargement cyclique, le taux des déformations volumiques augmente avec l'amplitude des cycles et avec la diminution de la borne inférieure (fig. IV.21.b)
- Le chargement cyclique induit un écrouissage qui se traduit par un léger compactage du sable (fig. IV.21.a).

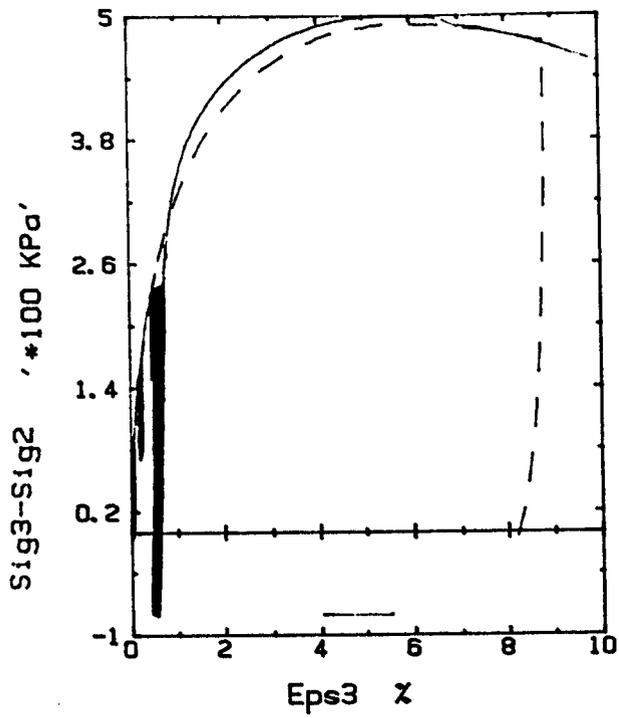


Fig. IV.21.a : Evolution du déviateur

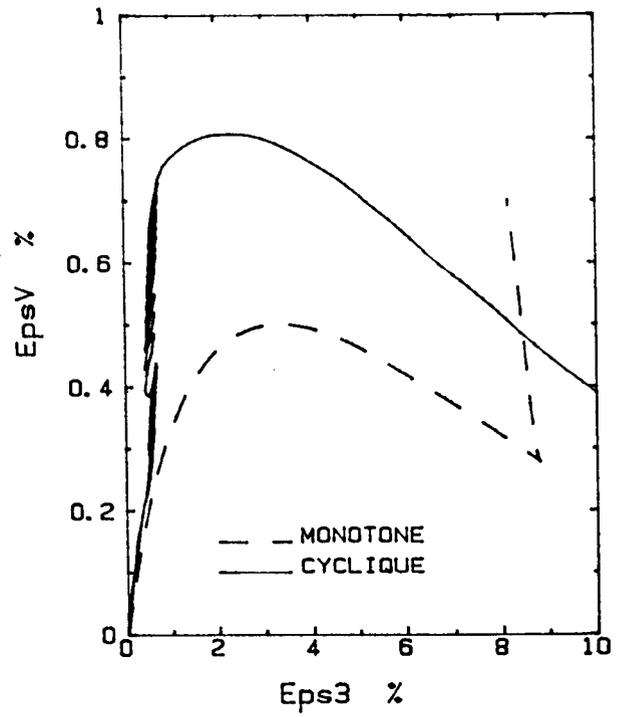


Fig. IV.21.b : Evolution de la déformation volumique

ESSAI TRIAXIAL CYCLIQUE DRAINE

IV.3.1.2) Essai cyclique non drainé

Cet essai a été effectué en condition non drainée avec (le programme du chargement de l'essai précédent). Les figures (IV.22.a à IV.22.c) montrent les résultats obtenus. On peut constater que :

- La déformation axiale est globalement croissante au cours du chargement. La déformation cumulée, par cycle de chargement, augmente avec le déplacement des centres des cycles vers le déviateur positif et la diminution de leurs bornes inférieures (fig. IV.22.a).
- La pression interstitielle est globalement croissante, à un taux qui diminue avec le déplacement du centre des cycles vers le déviateur positif, mais qui augmente sensiblement lorsque la borne inférieure des cycles décroît (fig. IV.22.b).
- La liquéfaction de l'échantillon n'est pas observée au cours des cycles en compression. En effet, on obtient une rupture de l'échantillon au dernier cycle pour une déformation axiale de l'ordre de 20 %, et une pression interstitielle de (380 kPa). La liquéfaction est atteinte lorsque, au cours du dernier cycle, le déviateur passe en extension (fig. IV.22.a et IV.22.b).

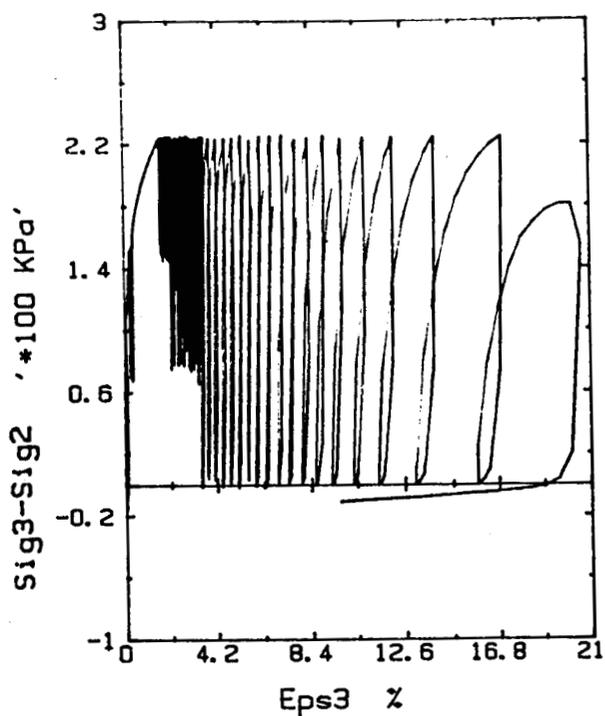


Fig. IV.22.a : Evolution du déviateur

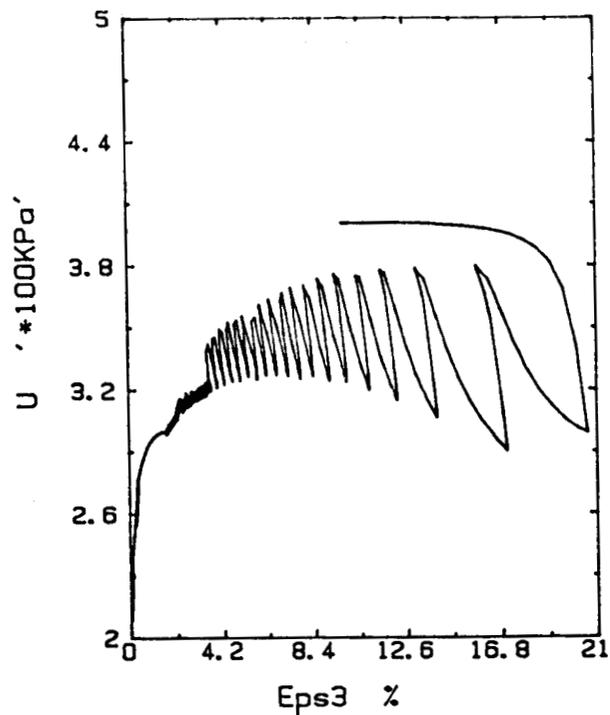


Fig. IV.22.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI TRIAXIAL CYCLIQUE
NON DRAINE

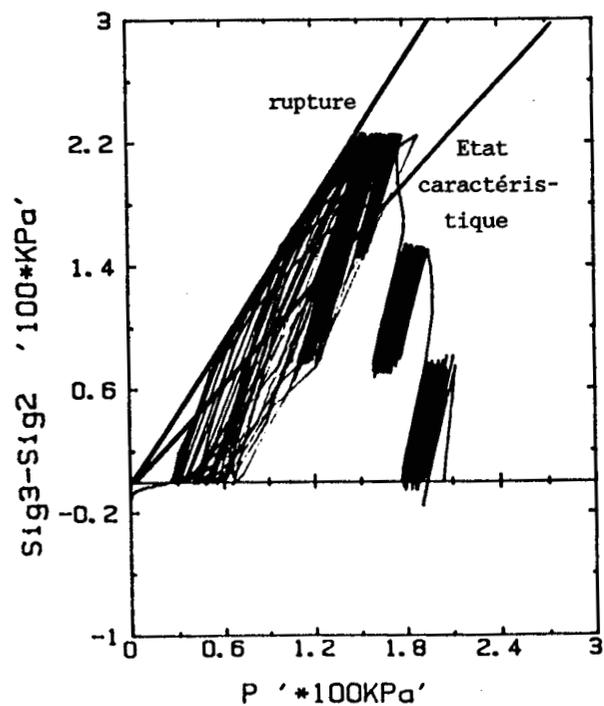


Fig. IV.22.c : Plan (Q' , P')

IV.3.1.3) Effet des bornes des cycles sur la liquéfaction

Afin d'étudier l'effet des bornes des cycles sur la liquéfaction du sable, nous avons réalisé trois essais non drainés à déviateur contrôlé pour différentes valeurs des bornes supérieures et inférieures :

- Dans le premier essai - 50 kPa < q < 200 kPa
- Dans le deuxième essai - 20 kPa < q < 200 kPa
- Dans le troisième essai - 50 kPa < q < 100 kPa

Les figures (IV.23.a) à (IV.23.c) illustrent les résultats des essais réalisés. On peut constater :

- Une apparition de la liquéfaction au troisième cycle pour le premier essai. En effet, au cours de cet essai, la pression interstitielle croît rapidement, et atteint la pression de confinement au troisième cycle (fig. IV.23.a et IV.23.b).
- L'élévation de la borne inférieure de - 50 kPa à - 20 kPa retarde l'apparition de la liquéfaction au dixième cycle. En effet, au cours du second essai, la pression interstitielle augmente moins rapidement que dans le premier essai, et il faut dix cycles pour arriver à la liquéfaction (fig. IV.24.a et IV.24.b).
- La diminution de la borne supérieure de 200 à 100 kPa retarde considérablement l'apparition de la liquéfaction. En effet, au cours du troisième essai, la pression interstitielle augmente lentement, la liquéfaction n'est atteinte qu'au bout du 63^{ème} cycle (fig. IV.25.a et IV.25.b).

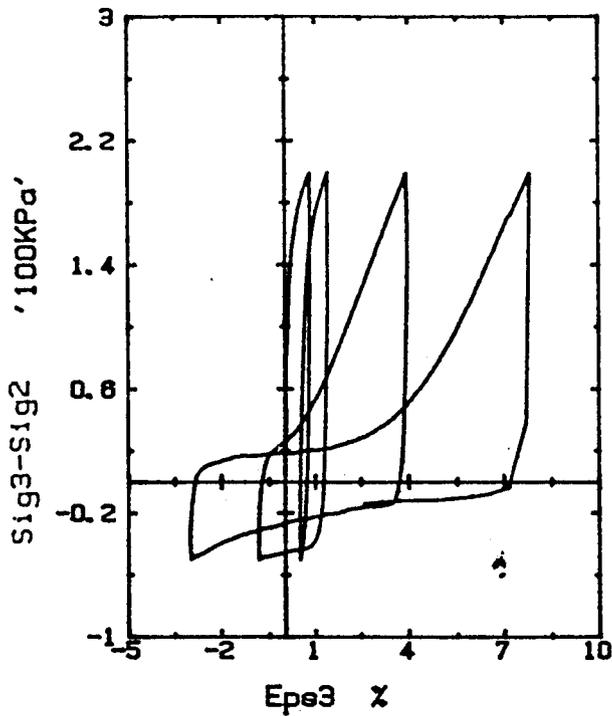


Fig. IV.23.a : Evolution
du déviateur

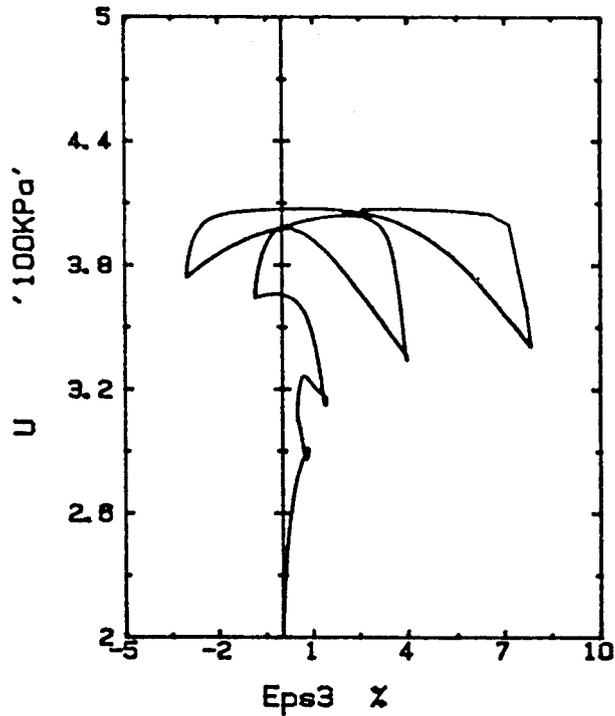


Fig. IV.23.b : Evolution de la
pression interstitielle

ESSAI TRIAXIAL CYCLIQUE
NON DRAINE
(Effet des bornes des cycles)

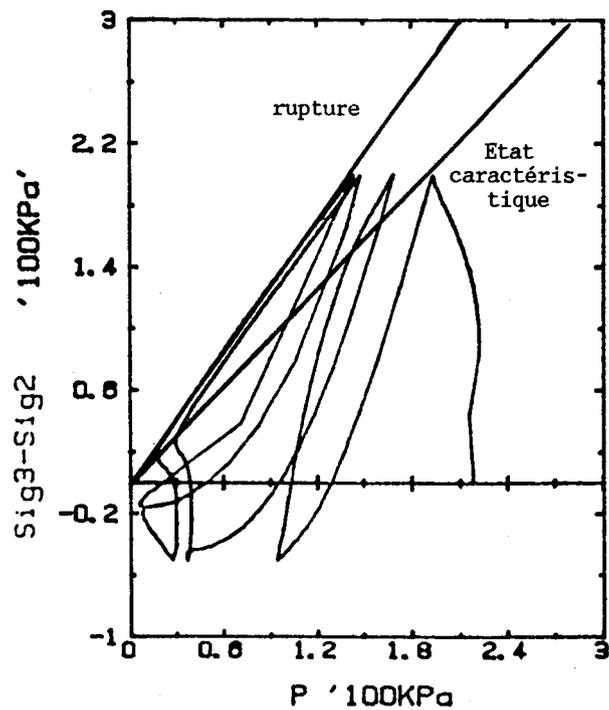


Fig. IV.2.3.c : Plan (Q', P')

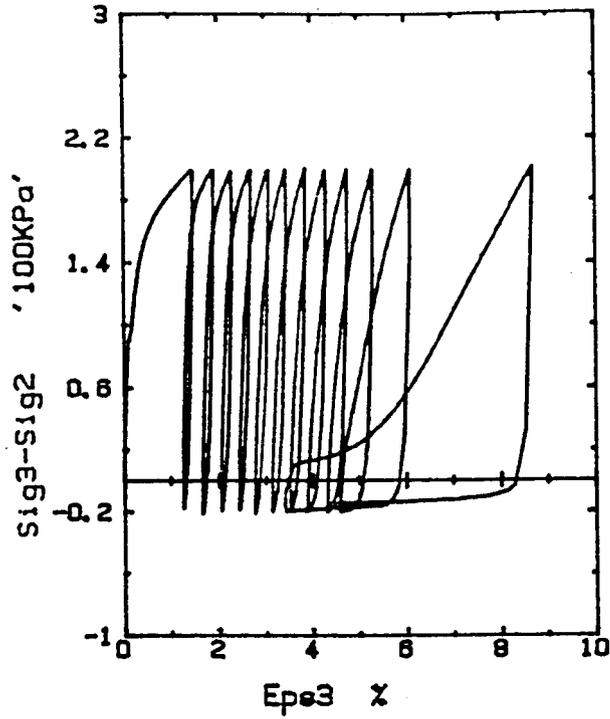


Fig. IV.24.a : Evolution du déviateur

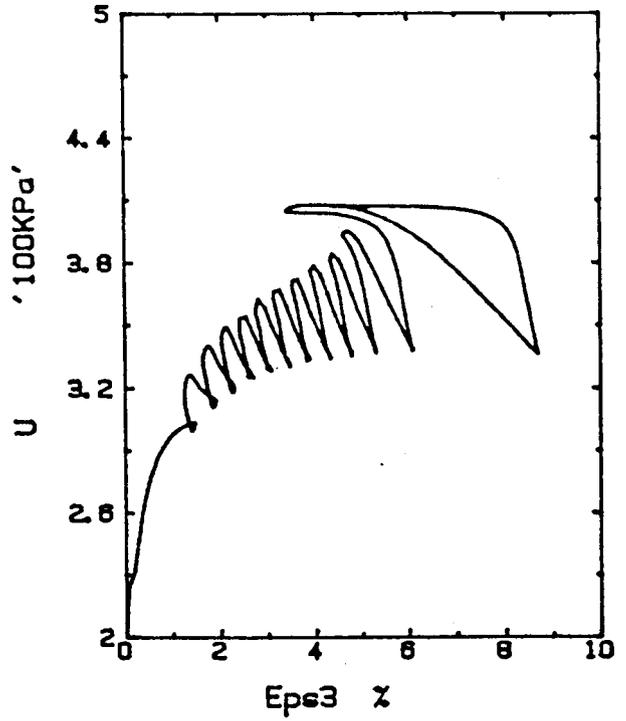


Fig. IV.24.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI TRIAXIAL CYCLIQUE
NON DRAINE
(Effet des bornes des cycles)

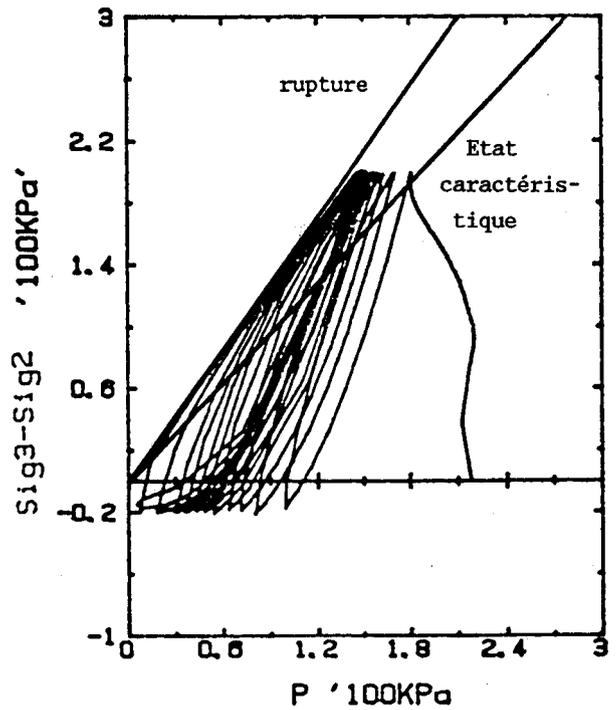


Fig. IV.24.c : Plan (Q' , P')

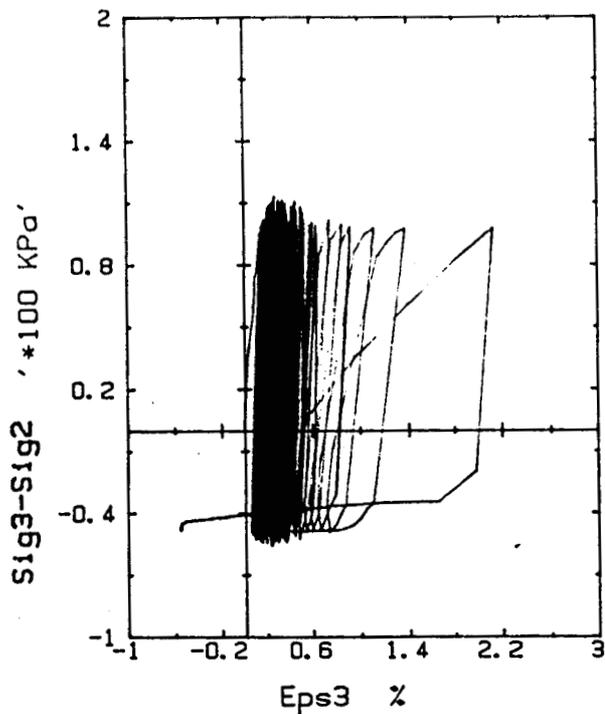


Fig. IV.25.a : Evolution du déviateur

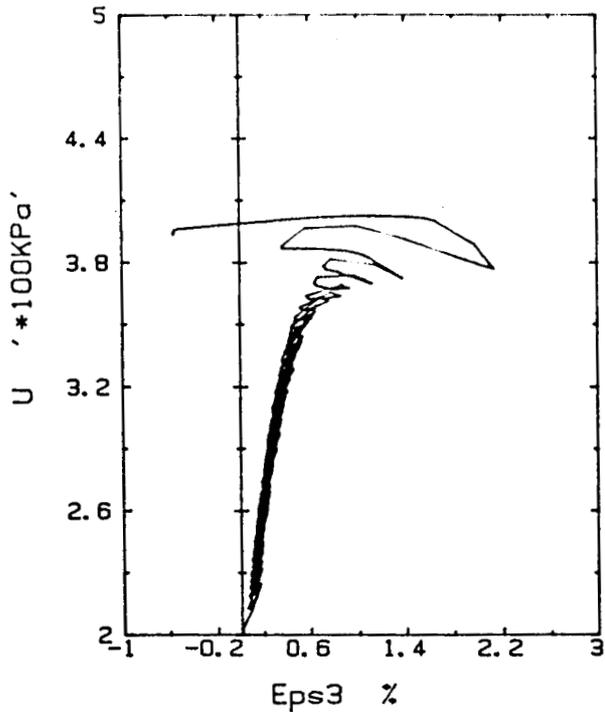


Fig. IV.25.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI TRIAXIAL CYCLIQUE NON DRAINE

(Effet des bornes des cycles)

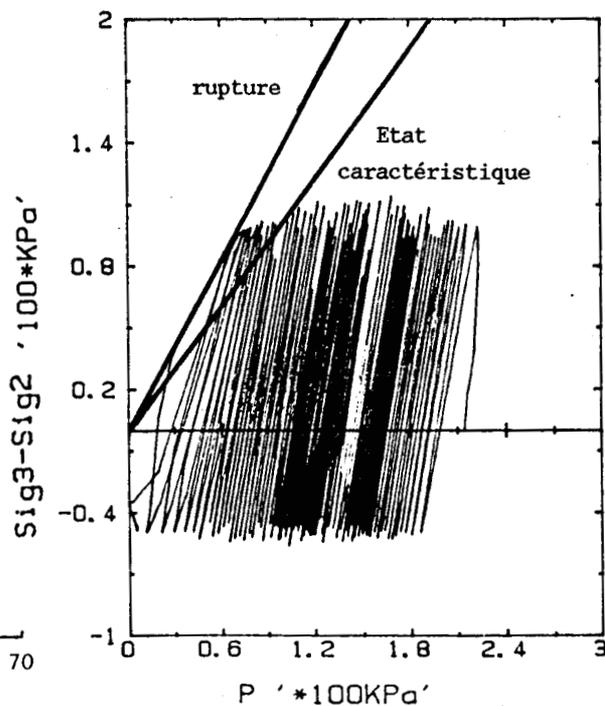
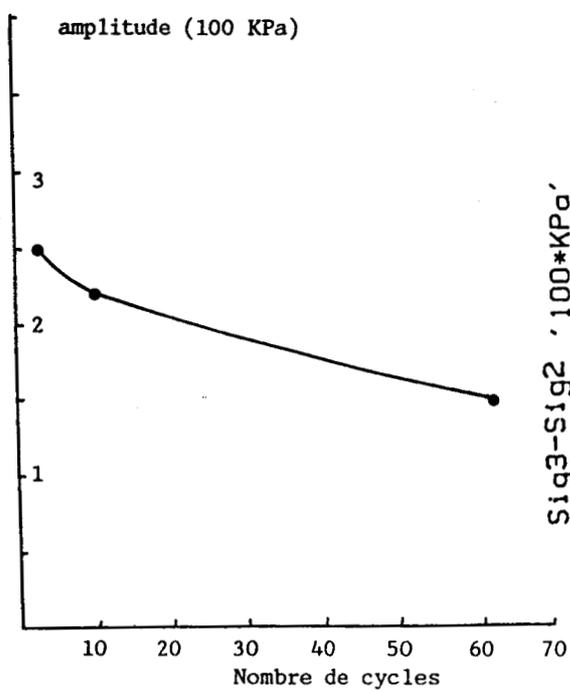


Fig. IV.25.c : Plan (Q' , P')

IV.3.2) Essais cycliques de torsion non drainés

IV.3.2.1) Introduction

Dans cette section, nous allons présenter les résultats des essais cycliques de torsion non drainés qui ont été effectués à contrainte ou déformation axiale imposée. Après une présentation de deux essais de référence, nous allons analyser l'effet sur la réponse du sable de plusieurs paramètres, notamment les bornes des cycles, leurs niveaux moyens et les valeurs du déviateur initial.

IV.3.2.2) Essais de référence

IV.3.2.2.1) Essais de torsion à contrainte axiale imposée

Un essai cyclique de torsion non drainé à contrainte axiale imposée a été effectué en partant d'un état isotrope. Cet essai est composé de deux séries de cycles : La première comporte 75 cycles de faible amplitude ($0 < \tau < 25$ KPa), la seconde comporte une dizaine de cycles d'amplitude moyenne ($0 < \tau < 45$ KPa).

Une analyse des résultats obtenus montre (figures (IV.27.a à IV.27.f) que le comportement de sable dépend sensiblement du domaine dans lequel les cycles de torsion sont effectués. En effet :

- Au cours de la première série des cycles qui correspond à un chargement dans le domaine contractant (sous-caractéristique) (fig. IV.27.a), le sable génère des très faibles déformations axiales et de distorsion, la déformation axiale est totalement en extension. Quant à la pression interstitielle, on observe qu'elle augmente sans se stabiliser à un taux qui diminue au cours du chargement.
- Au cours de la seconde série, qui correspond à un chargement dans les domaines sous et sur caractéristiques (contractant et dilatant). On note un accroissement important de la déformation axiale et de la distorsion par cycle de chargement, et une augmentation rapide de la pression interstitielle. La liquéfaction est atteinte au bout de cinq cycles dans la deuxième série.
- Au cours des deux séries de chargement, on note une diminution globale des contraintes principales majeure (sauf au début du chargement où elle augmente) et mineure jusqu'à leur annulation à la liquéfaction (fig. IV.27.e et IV.27.f).

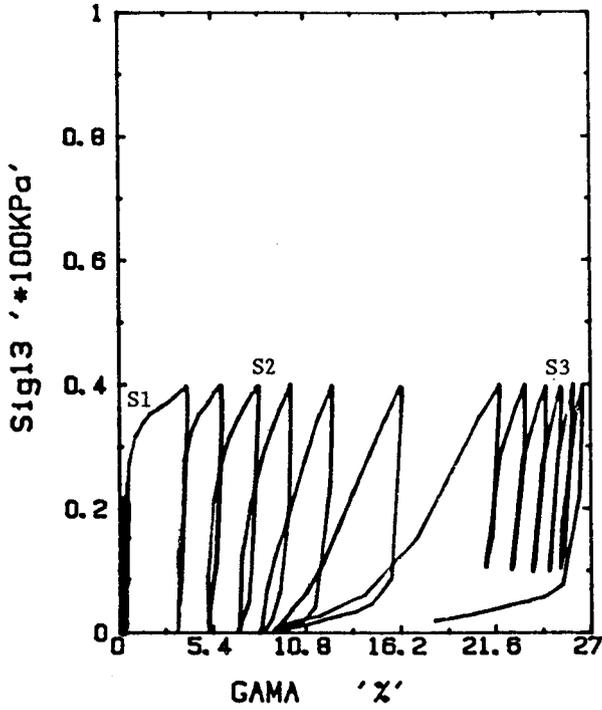


Fig. IV.27.a : Evolution du cisaillement

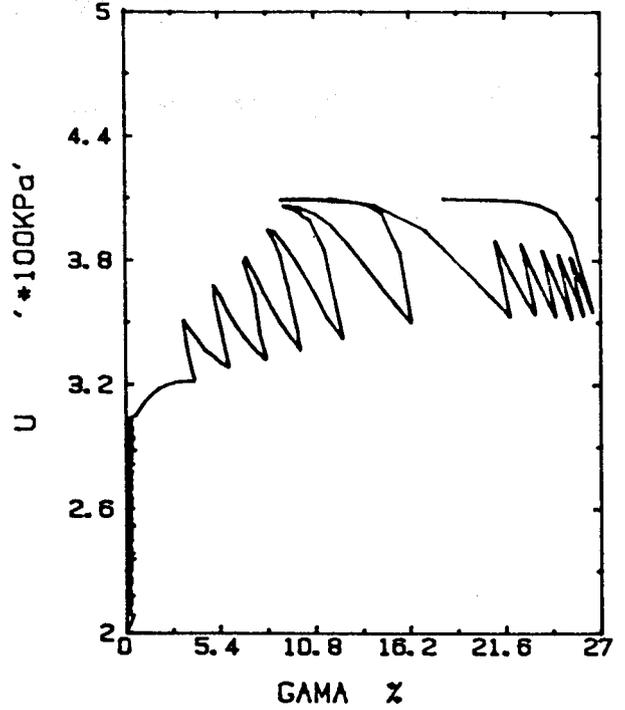


Fig. IV.27.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE

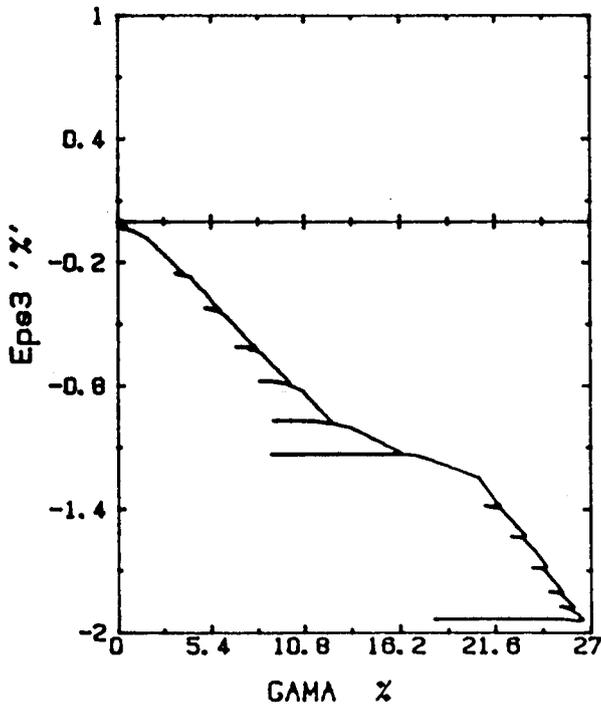


Fig. IV.27.c : Evolution de la déformation axiale

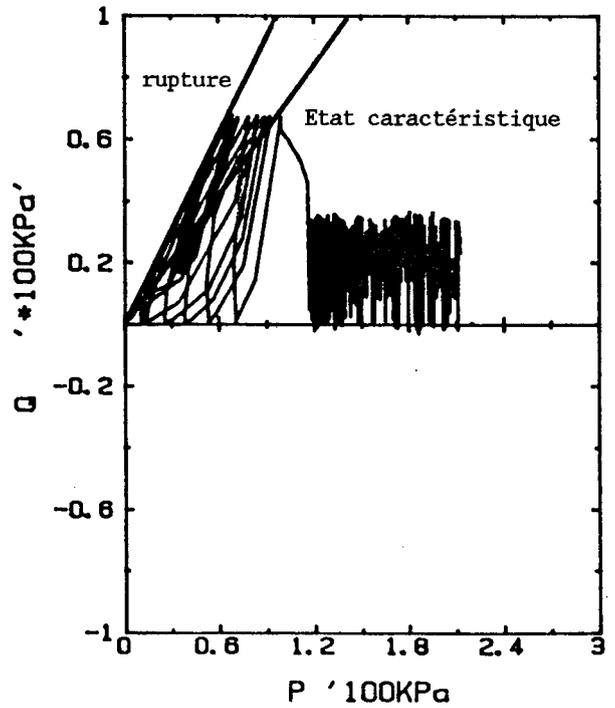


Fig. IV.27.d : Plan (Q', P')

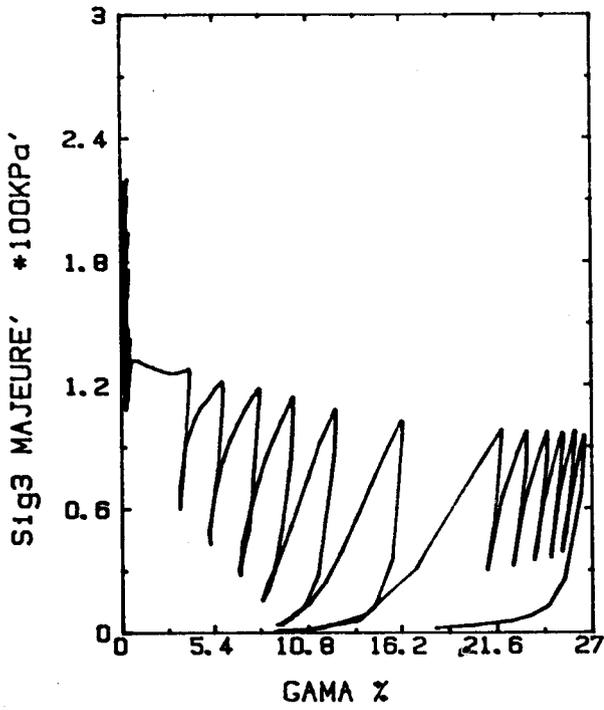


Fig. IV.27.e : Evolution de la contrainte principale majeure

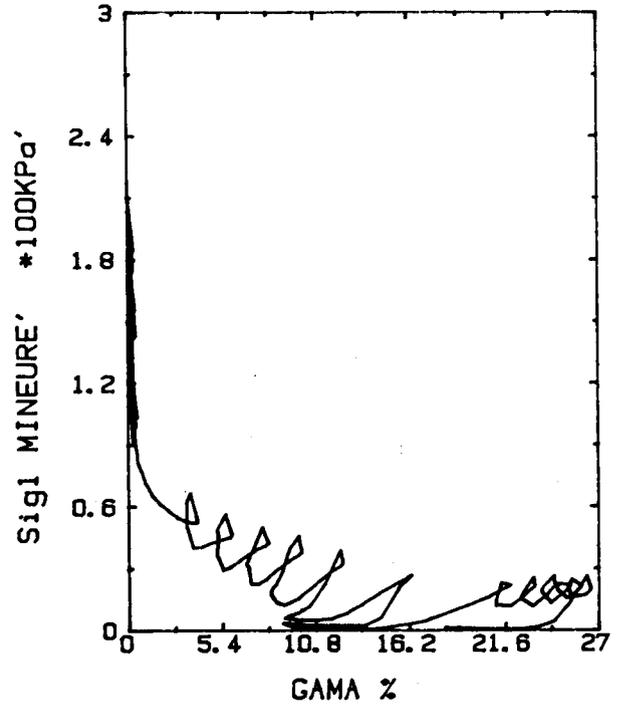


Fig. IV.27.f : Evolution de la contrainte principale mineure

IV.3.2.2.2) Essai de torsion à déformation axiale imposée

Un essai de torsion non drainé à déformation axiale imposée a été réalisé en partant d'un état isotrope. Cet essai est composé de trois séries de cycles (fig.IV.28.a).

- La première comporte 70 cycles qui sont dans le domaine sous caractéristique.
- La seconde comporte 25 cycles dont une partie coupe la droite d'état caractéristique.
- La troisième ne comporte que 15 cycles qui se situent dans le domaine sous et sur caractéristiques.

Les résultats de cet essai sont illustrés dans les figures (IV.28.a à IV.28.f). On peut constater que le comportement du sable dépend sensiblement du domaine dans lequel les cycles sont effectués. En effet, on observe que :

- La distorsion augmente globalement au cours du chargement à un taux qui croît avec l'amplitude des cycles (fig. IV.28.a).
- La pression interstitielle augmente globalement au cours du chargement. Dans la première série, elle croît d'une manière continue : dans la seconde, elle augmente rapidement au début, mais ensuite, elle tend à se stabiliser. La liquéfaction est atteinte dans la troisième série, après 15 cycles de chargement (fig. IV.28.b).
- La contrainte axiale diminue globalement au cours du chargement, elle s'annule à la liquéfaction (fig. IV.28.c)
- La contrainte principale majeure augmente au début du chargement ensuite elle diminue, tandis que la contrainte principale mineure diminue d'une manière continue. A la liquéfaction, les contraintes principales s'annulent (fig. IV.28.e et IV.28.f)

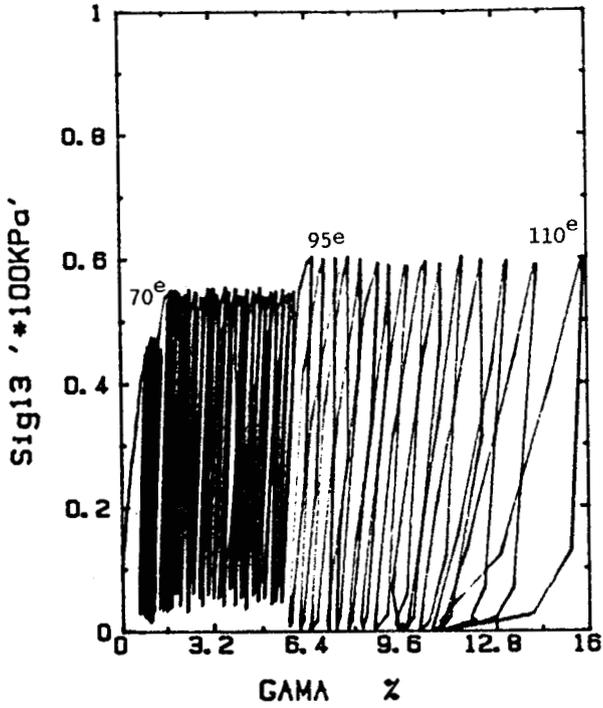


Fig. IV.28.a : Evolution du cisaillement

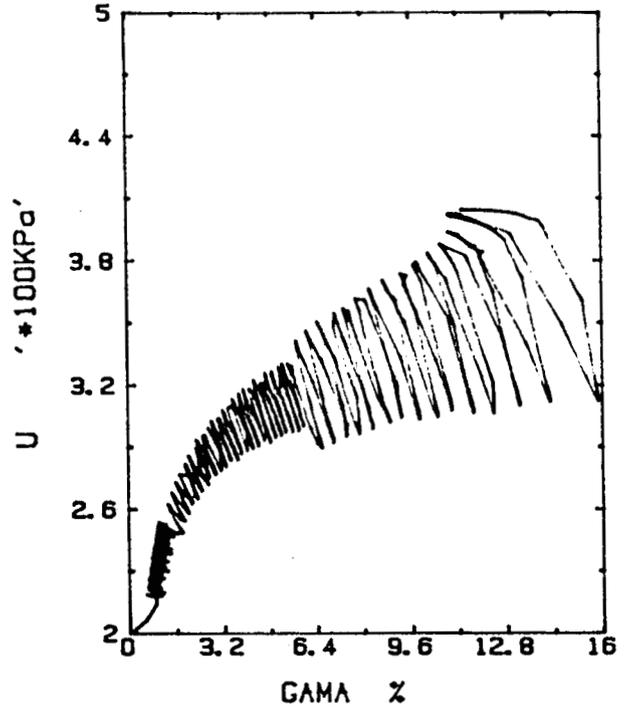


Fig. IV.28.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE

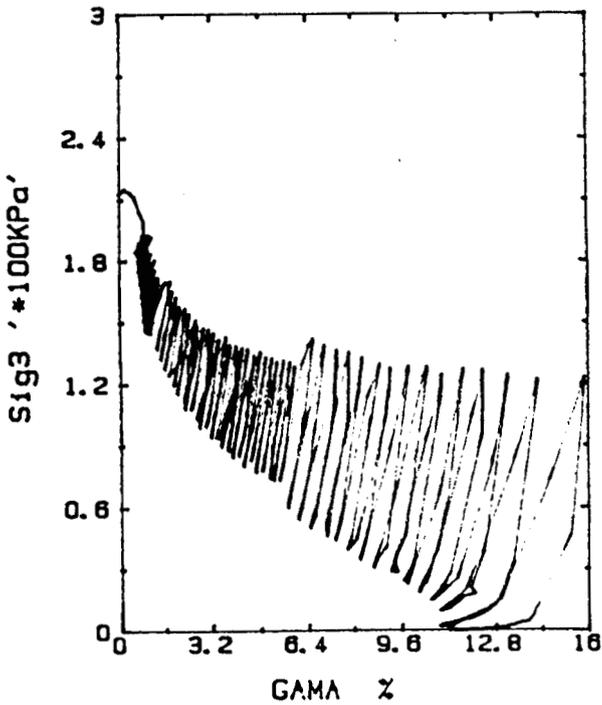


Fig. IV.28.c : Evolution de la contrainte axiale

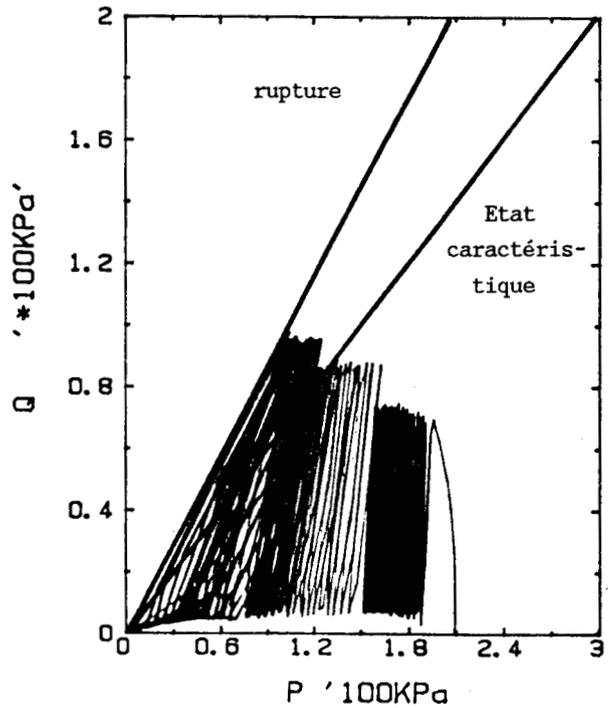


Fig. IV.28.d : Plan (Q' , P')

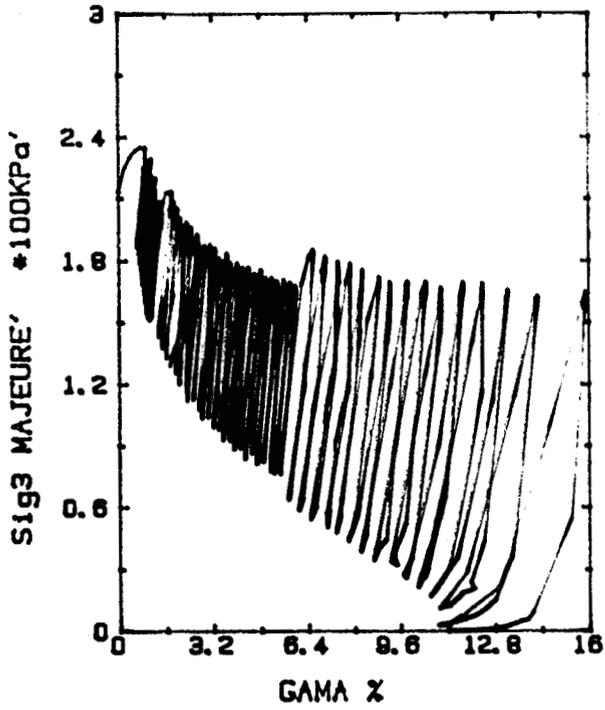


Fig. IV.28.e : Evolution de la contrainte principale majeure

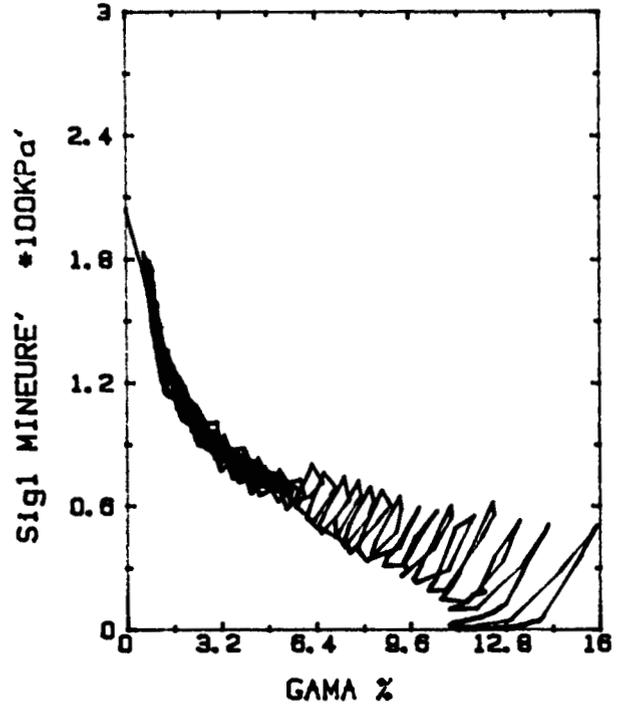


Fig. IV.28.f : Evolution de la contrainte principale mineure

IV.3.2.3) Effet des bornes des cycles

Afin d'étudier l'effet des bornes supérieures et inférieures des cycles, nous avons effectué deux essais de torsion à contrainte axiale imposée en partant d'un état initial isotrope. Le premier essai comporte un faible nombre de cycles, le second comporte 5 séries de cycles qui ont la même borne supérieure, mais une borne inférieure décroissante.

L'analyse des résultats du premier essai (fig. IV.29.a à IV.29.c) montre que:

- La pression interstitielle augmente rapidement ; la liquéfaction est atteinte au cinquième cycle pour une distorsion de l'ordre de 13 % (fig. IV.29.b.).
- La diminution de la borne supérieure du sixième cycle n'a pas d'effet sur la liquéfaction (l'échantillon reste liquéfié)(fig. IV.29.a et IV.29.b).
- L'augmentation de la borne inférieure du cycle 7 à 14 provoque une diminution de la pression interstitielle et la fin de la liquéfaction (fig. IV.29.a et IV.29.b).

L'analyse du résultat du deuxième essai (fig. IV.30.a à IV.30.f) montre que :

- La pression interstitielle se stabilise lors de la première série, car les cycles se situent entre les domaines sous et sur caractéristiques, Ishihara (1975) et Luong (1978) , mais elle se met à croître lorsqu'on fait diminuer la borne inférieure des cycles en coupant la droite d'état caractéristique (fig. IV.30.d). La liquéfaction n'est atteinte que lorsque la borne inférieure des cycles s'approche de zéro (fig. IV.30.a).

Ces deux essais montrent que la borne inférieure des cycles joue un rôle important dans la liquéfaction. En effet, celle-ci n'est atteinte que pour des cycles dont la borne inférieure est proche de zéro.

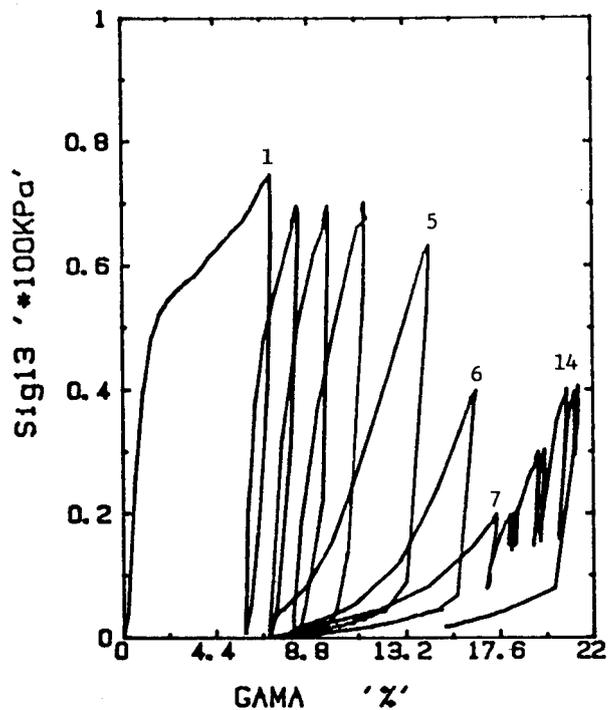


Fig. IV.29.a : Evolution du cisaillement

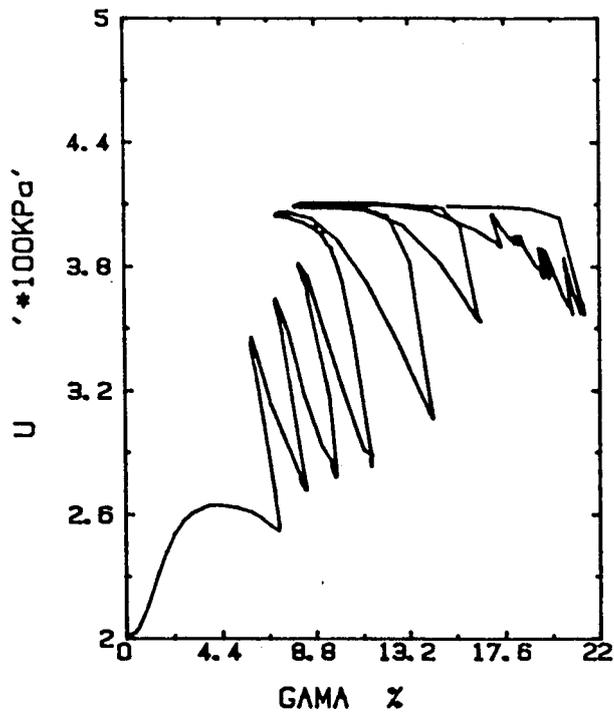


Fig. IV.29.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE
 NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
 (Effet des bornes des cycles)

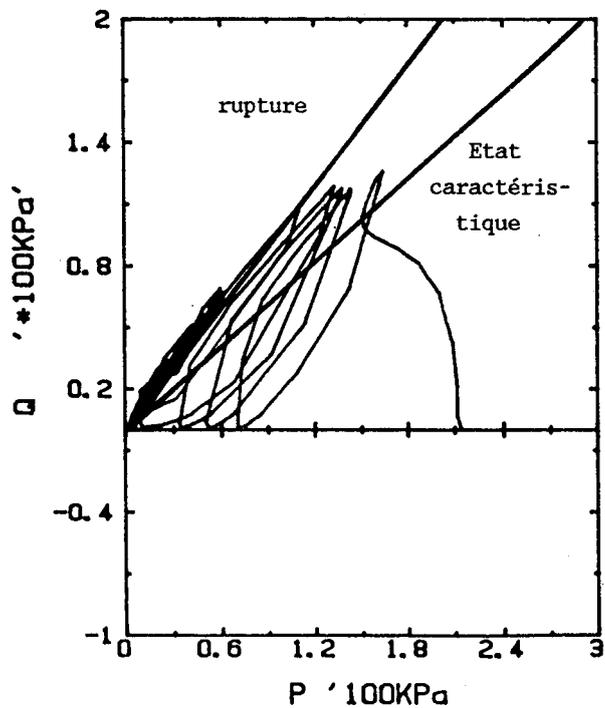


Fig. IV.29.c : Plan (Q', P')

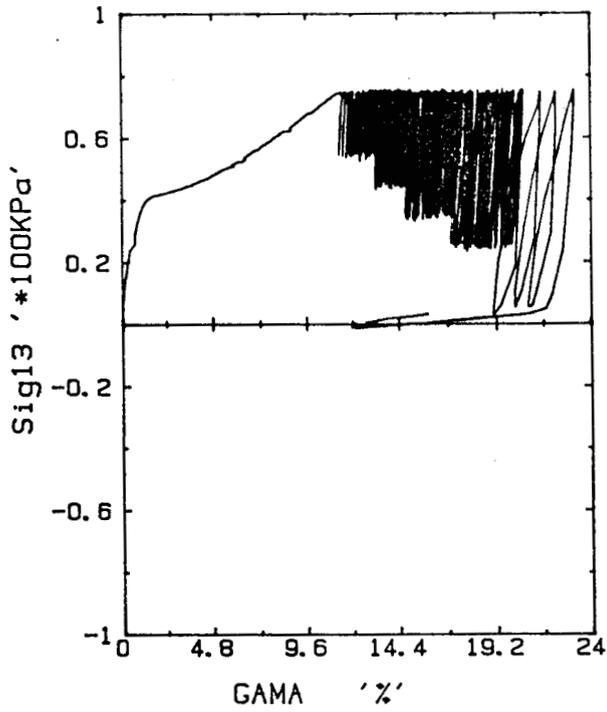


Fig. IV.30.a : Evolution du cisaillement

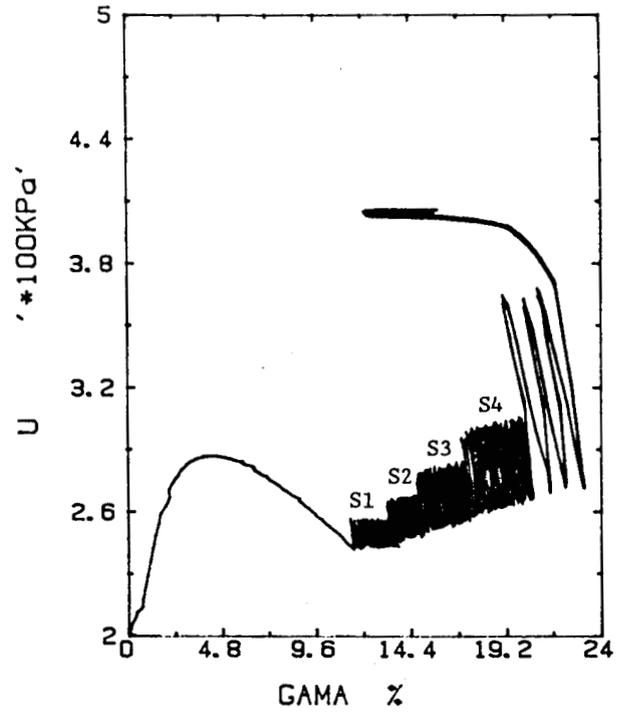


Fig. IV.30.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet des bornes des cycles)

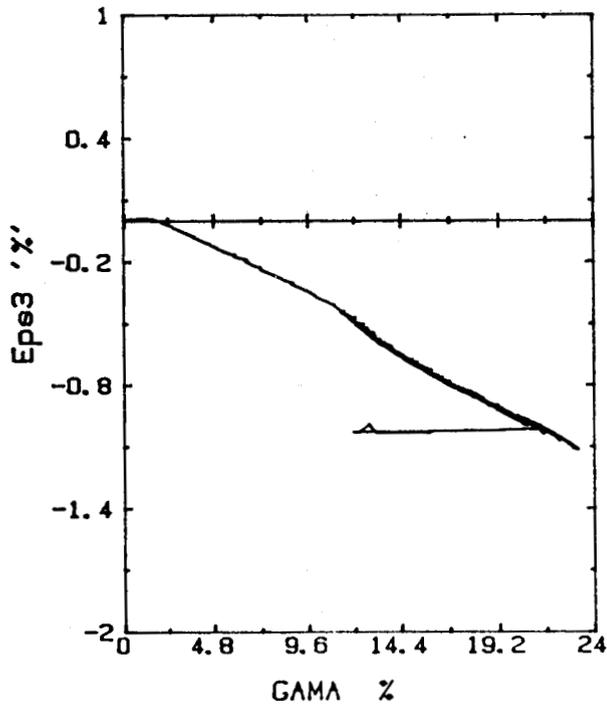


Fig. IV.30.c : Evolution de la déformation axiale

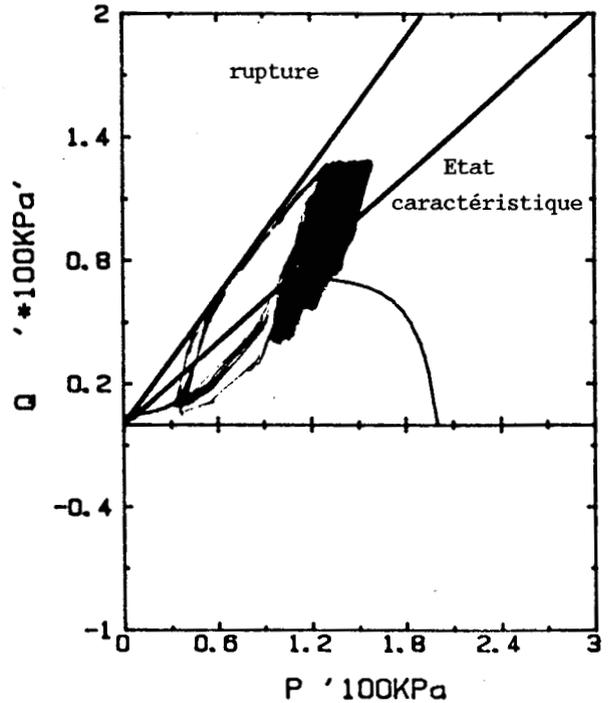


Fig. IV.30.d : Plan (Q' , P')

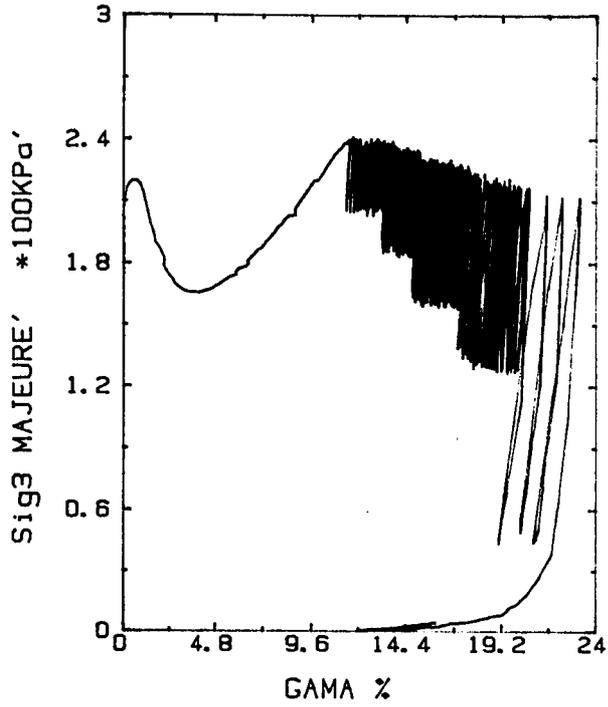


Fig. IV.30.e : Evolution de la contrainte principale majeure

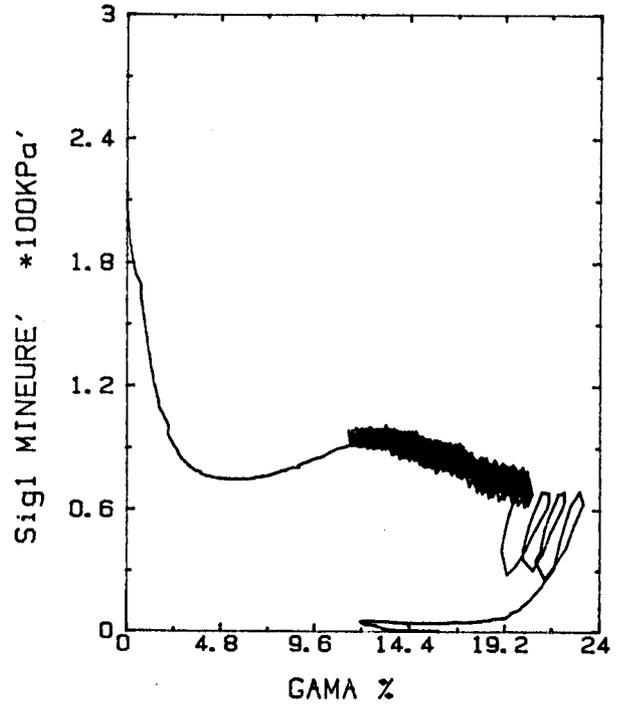


Fig. IV.30.f : Evolution de la contrainte principale mineure

IV.3.2.4) Effet du niveau moyen des cycles

Afin d'étudier l'effet du niveau moyen des cycles sur la réponse du sable, nous avons effectué un essai à contrainte axiale imposée, au cours duquel le niveau moyen des cycles a été augmenté (série 1 à 5) (fig. IV.31.a). Les résultats de cet essai sont illustrés dans les figures (IV.31.a à IV.31.d). Une analyse de ces résultats montre que :

- La déformation axiale augmente globalement au cours du chargement à un taux qui croît avec l'augmentation du niveau moyen des cycles (l'approche du domaine sur caractéristique (fig. IV.31.c).

- La pression interstitielle augmente globalement au cours des cycles de chargement à un taux qui augmente quand on passe des séries 1 à 2 et de 2 à 3, et qui diminue lorsqu'on passe des séries 3 à 4 et 4 à 5. Pour la cinquième série, on note une stabilisation de la pression interstitielle, afin d'arriver à la liquéfaction, on a fait diminuer la borne inférieure des cycles. La liquéfaction est atteinte lorsque la borne inférieure est proche de zéro (fig. IV.31.a et IV.31.b).

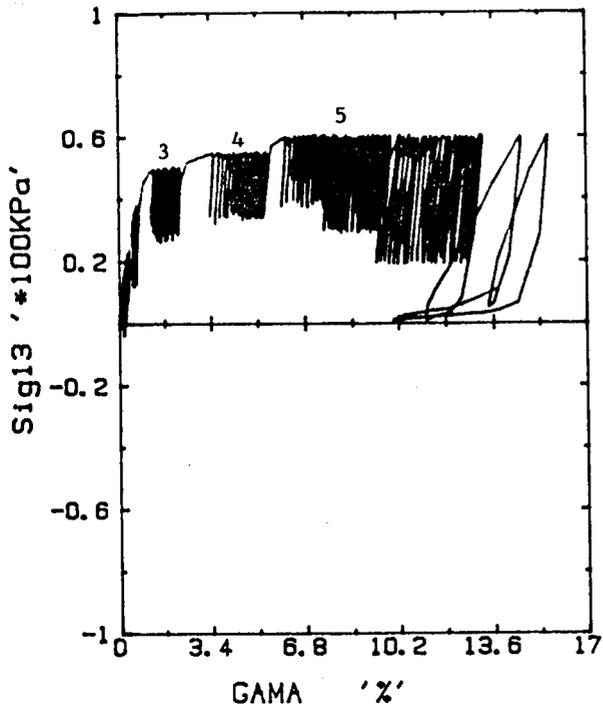


Fig. IV.31.a : Evolution du cisaillement

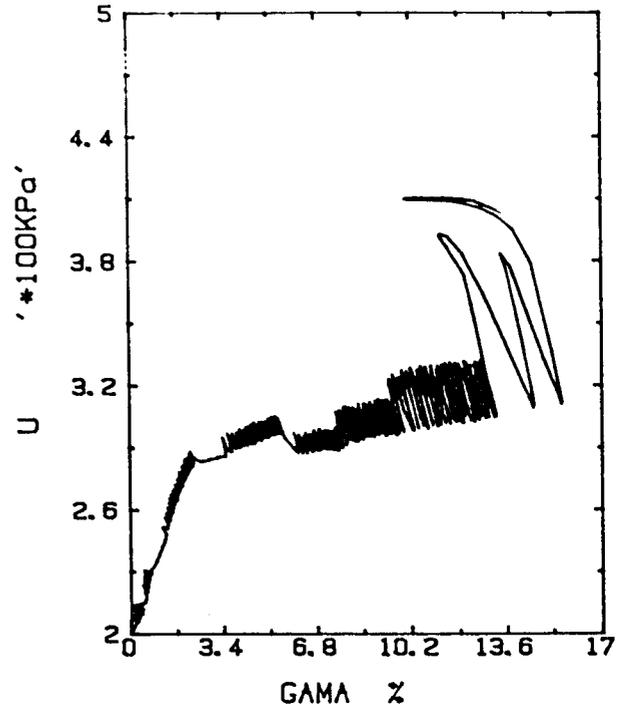


Fig. IV.31.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet du niveau moyen des cycles)

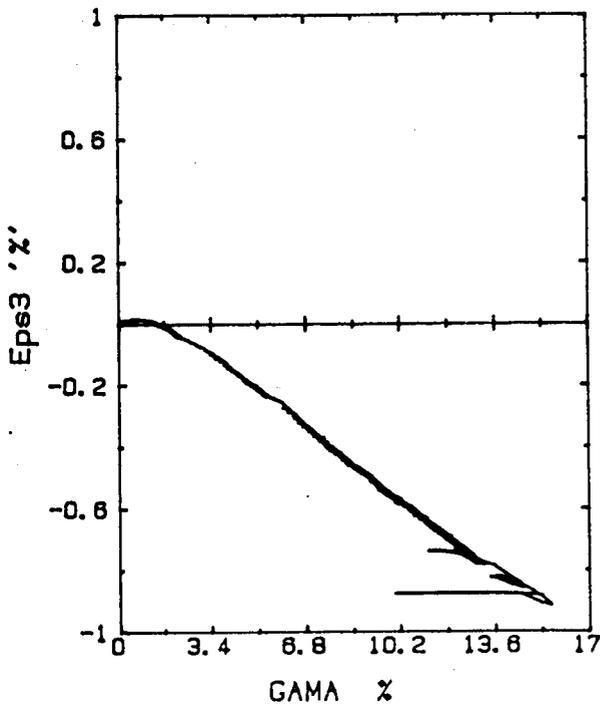


Fig. IV.31.c : Evolution de la déformation axiale

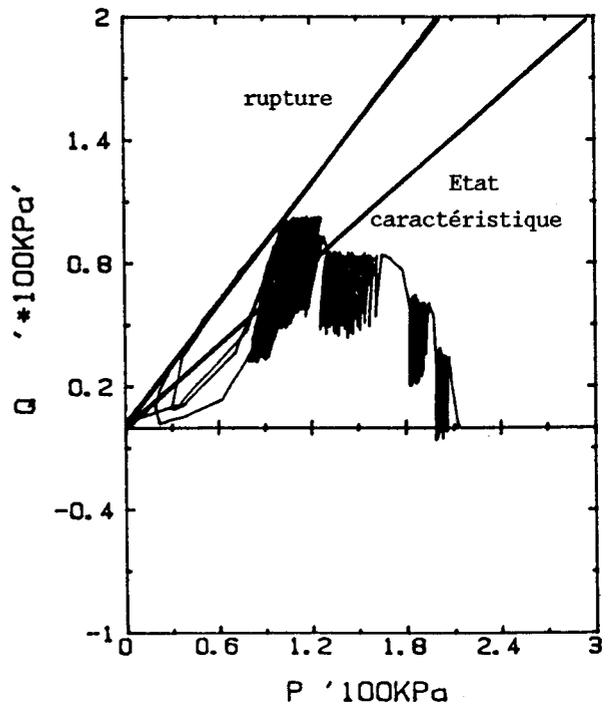


Fig. IV.31.d : Plan (Q' , P')

IV.3.2.5) Effet du déviateur initial

Afin d'étudier l'effet du déviateur initial sur la réponse du sable, nous avons effectué quatre essais de torsion cyclique non drainés, les trois premiers ont été réalisés à contrainte axiale imposée, le quatrième a été effectué à déformation axiale imposée.

IV.3.2.5.1) Essais à contrainte axiale imposée

Trois essais de torsion cyclique non drainés ayant les mêmes bornes ($0 < \tau < 45 \text{ KPa}$) ont été effectués à contrainte axiale imposée :

- Le premier essai a été effectué en partant d'un état initial isotrope (fig. IV.32.a à IV.32.d)

- Le second essai a été précédé par un chargement triaxial monotone jusqu'à un déviateur de + 50 KPa (fig. IV.33.a. à IV.33.d)

- Le troisième essai a été précédé par un chargement monotone jusqu'à un déviateur de - 50 KPa (fig. IV.34.a à IV.34.d).

Une analyse des résultats de trois essais montre que le déviateur initial influe d'une manière sensible sur l'évolution de la pression interstitielle, la distorsion, la déformation axiale.

. Effet sur l'évolution de la pression interstitielle

Au cours du premier essai, on constate que la pression interstitielle augmente rapidement. La liquéfaction est atteinte au 10^{ème} cycle. Au cours du second essai, la pression interstitielle augmente lentement ; ensuite, elle tend à se stabiliser. Au cours du 3^{ème} essai, la pression interstitielle augmente rapidement au début, mais ensuite, elle tend à se stabiliser.

. Effet sur la distorsion

On peut constater que la distorsion est globalement croissante au cours des cycles à un taux qui augmente lorsqu'on diminue le déviateur initial. Pour le deuxième et troisième essai, une distorsion de l'ordre de 10 % est atteinte sans qu'il y ait liquéfaction.

. Effet sur la déformation axiale

Au cours du premier essai, la déformation axiale est légèrement en compression au début du chargement, mais ensuite elle devient en extension. Pour le second et le troisième essai, on observe que la déformation axiale a le même signe que le déviateur initial.

Ces trois essais montrent que la liquéfaction au cours d'un essai à contrainte axiale imposée n'est atteinte que lorsque le déviateur initial est nul. En effet, l'existence d'un déviateur initial non nul engendre la stabilisation de la pression interstitielle et empêche la liquéfaction de l'échantillon.

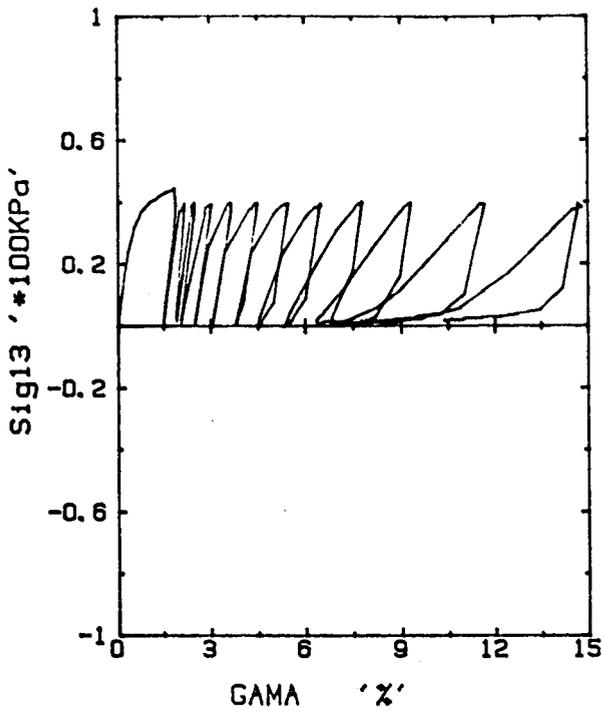


Fig. IV.32.a : Evolution du cisaillement

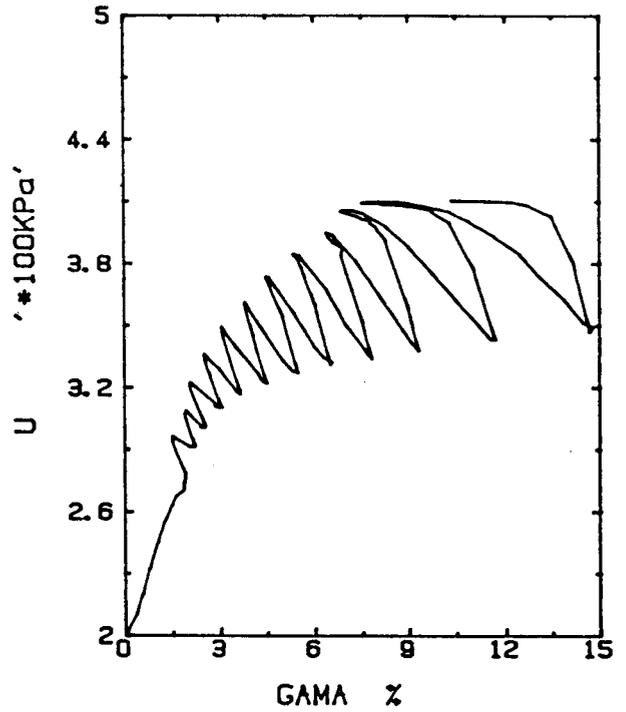


Fig. IV.32.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet du déviateur initial)

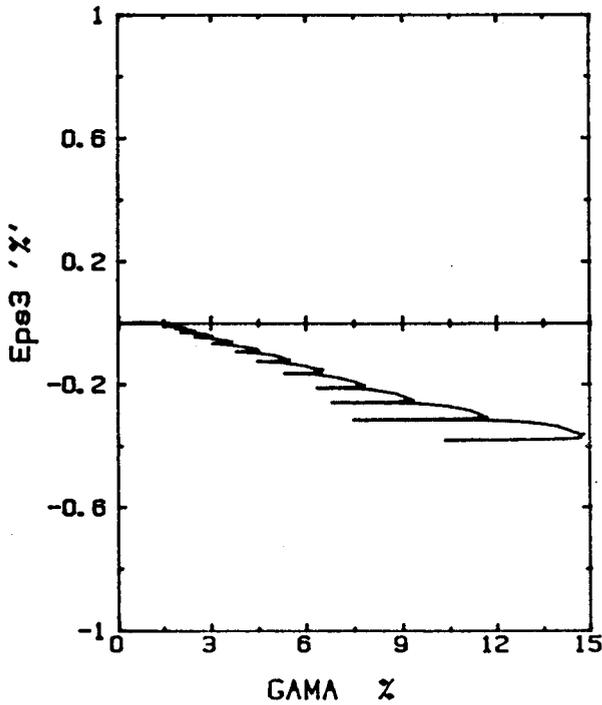


Fig. IV.32.c : Evolution de la déformation axiale

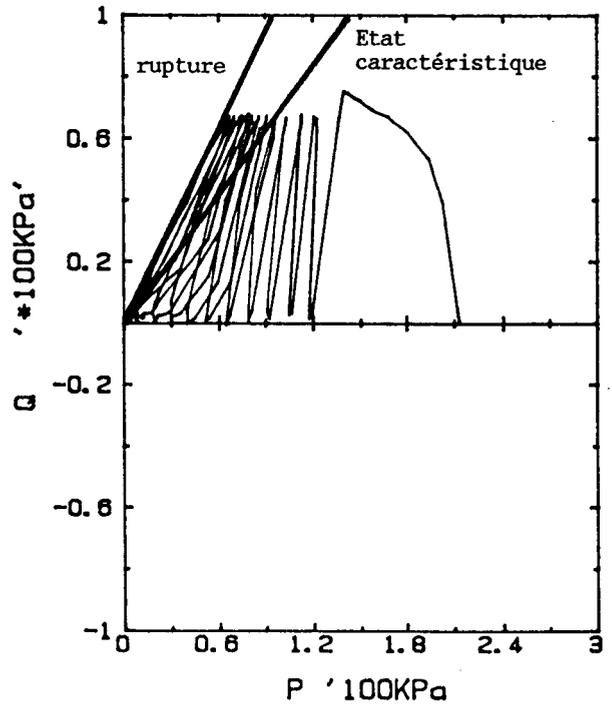


Fig. IV.32.d : Plan (Q' , P')

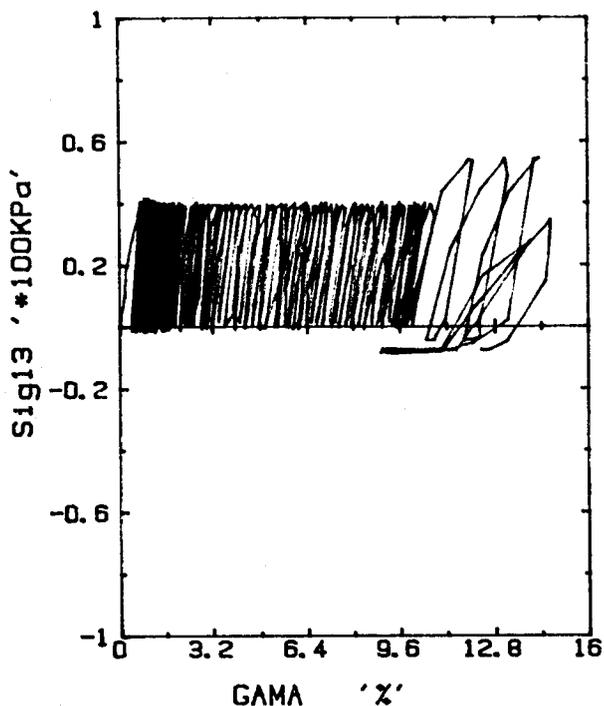


Fig. IV.33.a : Evolution du cisaillement

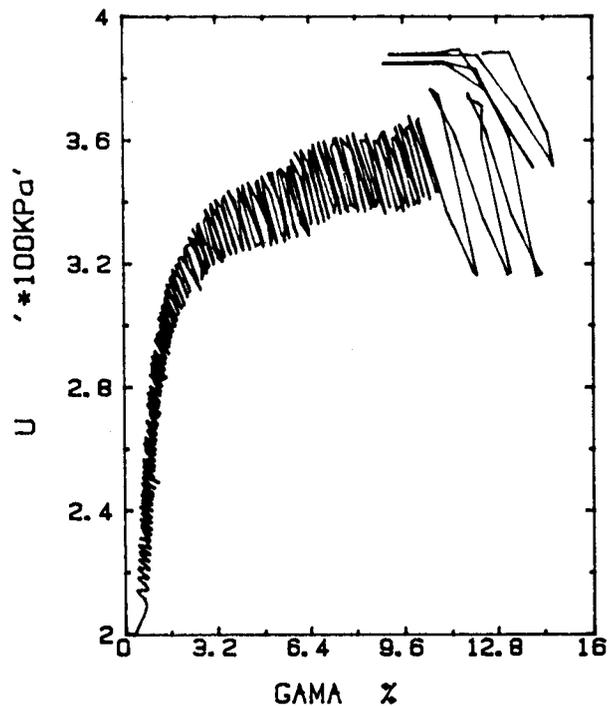


Fig. IV.33.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet du déviateur initial)

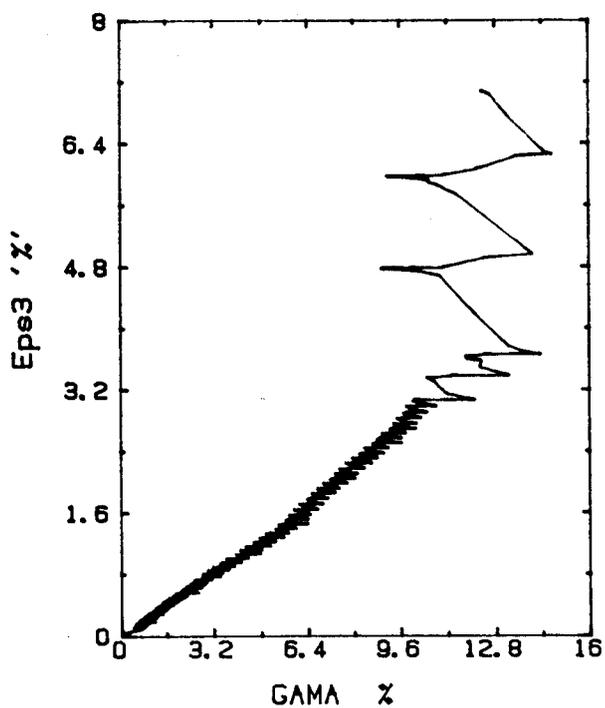


Fig. IV.33.c : Evolution de la déformation axiale

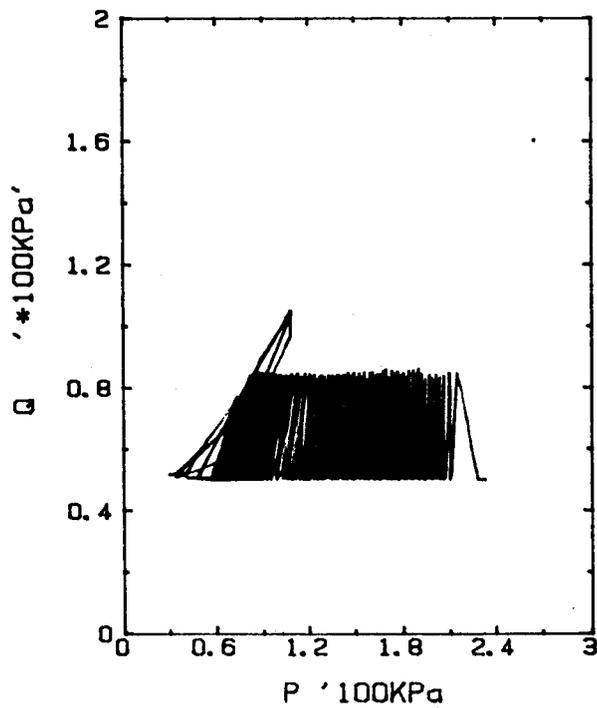


Fig. IV.33.d : Pla, (Q', P')

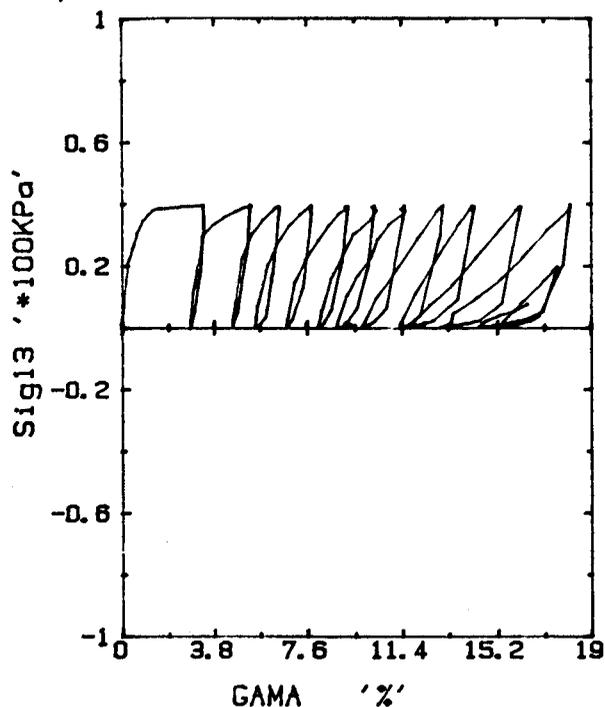


Fig. IV.34.a : Evolution du cisaillement

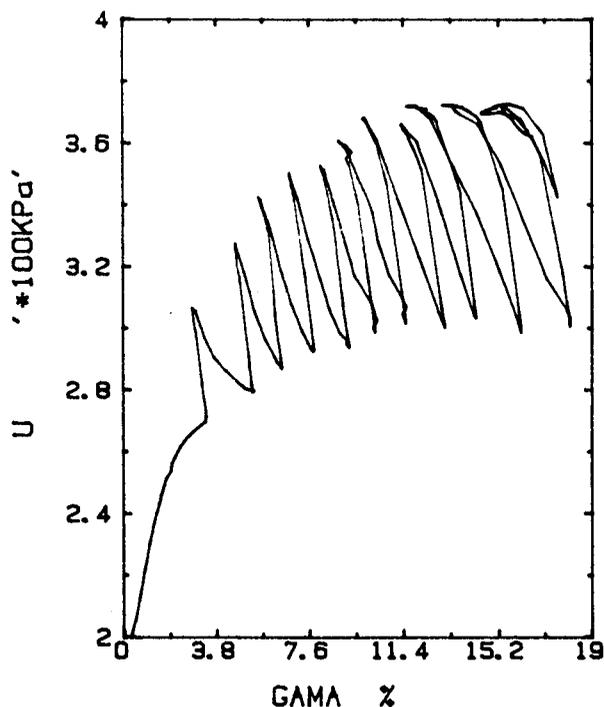


Fig. IV.34.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A CONTRAINTE AXIALE IMPOSEE
(Effet du déviateur initial)

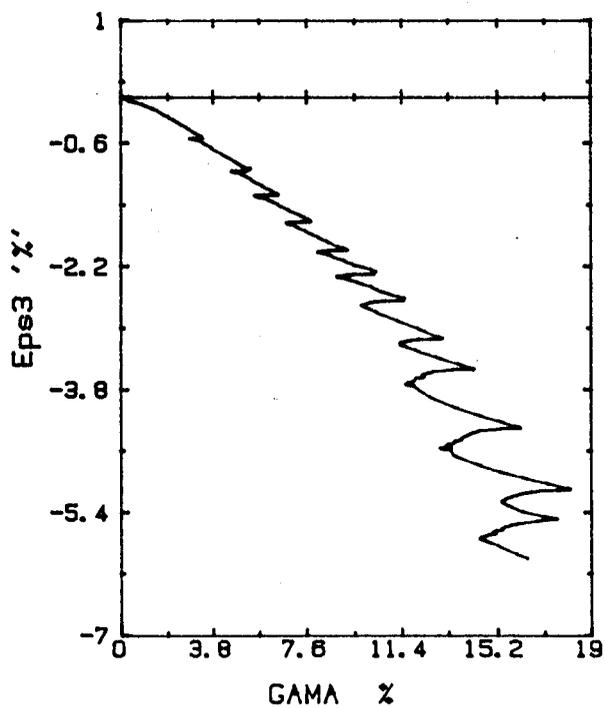


Fig. IV.34.c : Evolution de la déformation axiale

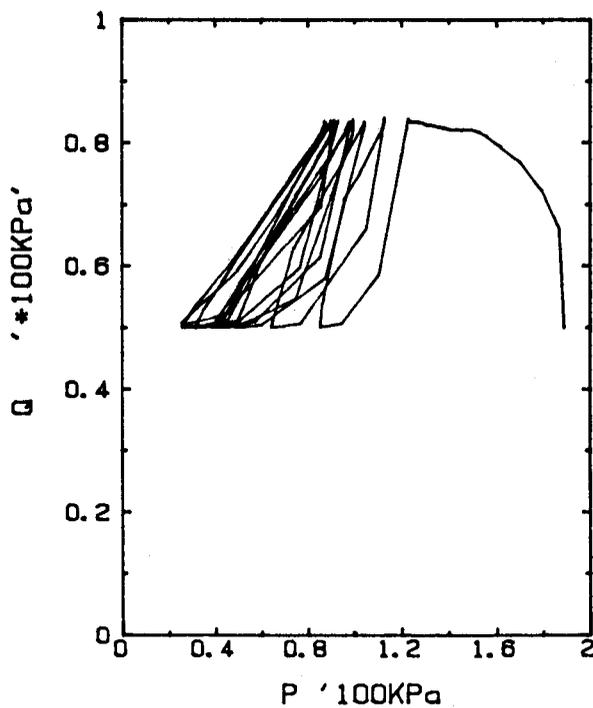


Fig. IV.34.d : Plan (Q', P')

IV.3.2.5.2) Essai à déformation axiale imposée.

Dans la section précédente, nous avons montré que la liquéfaction du sable lors des essais à contrainte axiale imposée n'est obtenue que lorsque le déviateur initial est nul. Afin d'étudier l'effet du déviateur initial lors du chemin à déformation axiale imposée, nous avons réalisé un essai de torsion cyclique non drainé à déformation axiale imposée en partant d'un déviateur initial de 50 KPa. Les résultats de cet essai sont illustrés dans les figures (IV.35.a à IV.35.f). On peut constater qu'au cours de cet essai, la pression interstitielle augmente sans se stabiliser. La liquéfaction est atteinte lorsque la borne inférieure des cycles s'approche de zéro.

Cet essai montre que la liquéfaction peut être atteinte, lors d'un chemin à déformation axiale imposée avec un déviateur initial non nul, à condition que la borne inférieure des cycles soit proche de zéro.

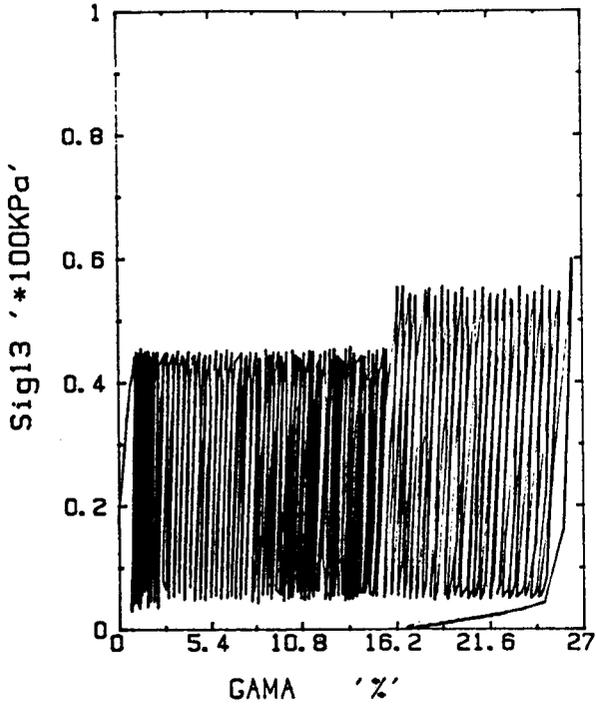


Fig. IV.35.a : Evolution du cisaillement

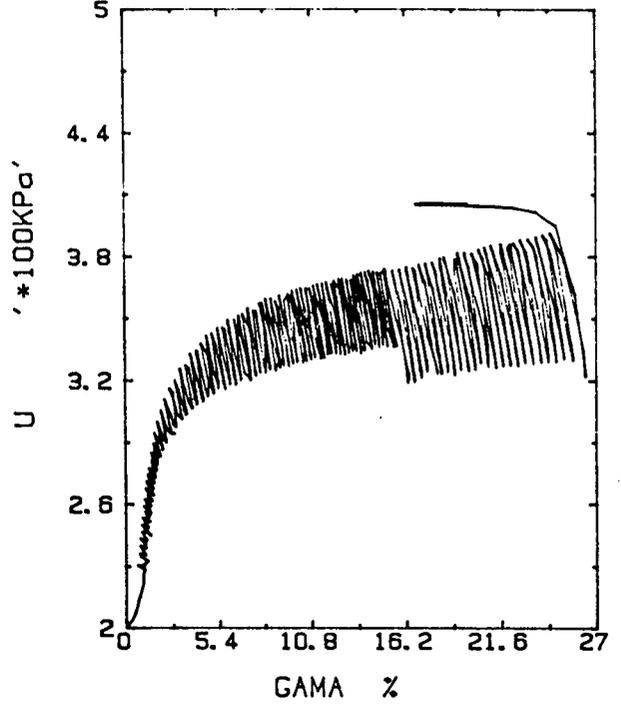


Fig. IV.35.b : Evolution de la pression interstitielle

ESSAI DE TORSION CYCLIQUE NON DRAINE A DEFORMATION AXIALE IMPOSEE
(Effet du déviateur initial)

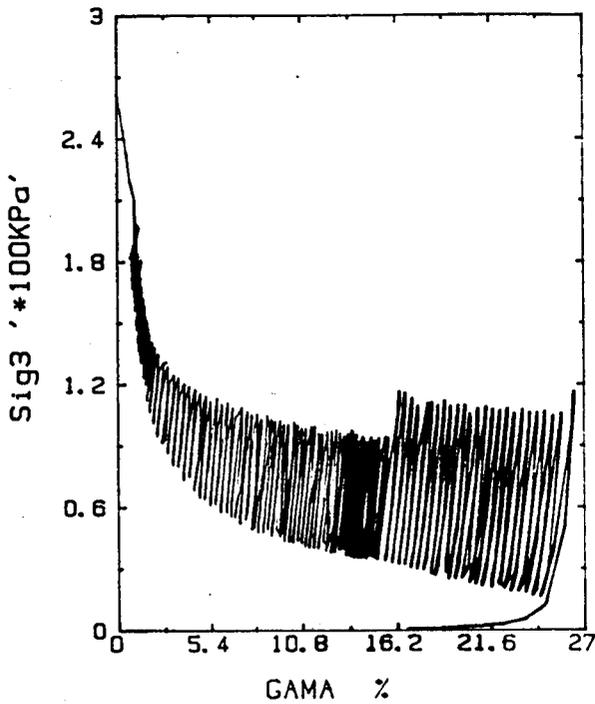


Fig. IV.35.c : Evolution de la contrainte axiale

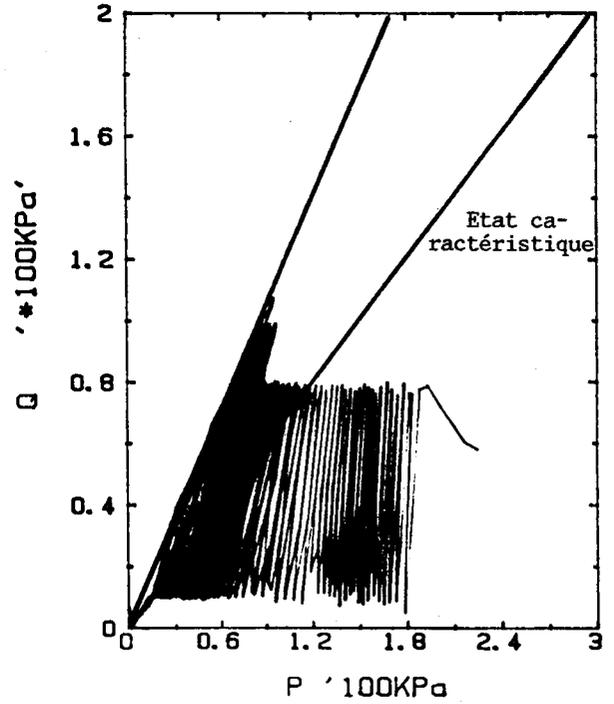


Fig. IV.35.d : Plan (Q', P')

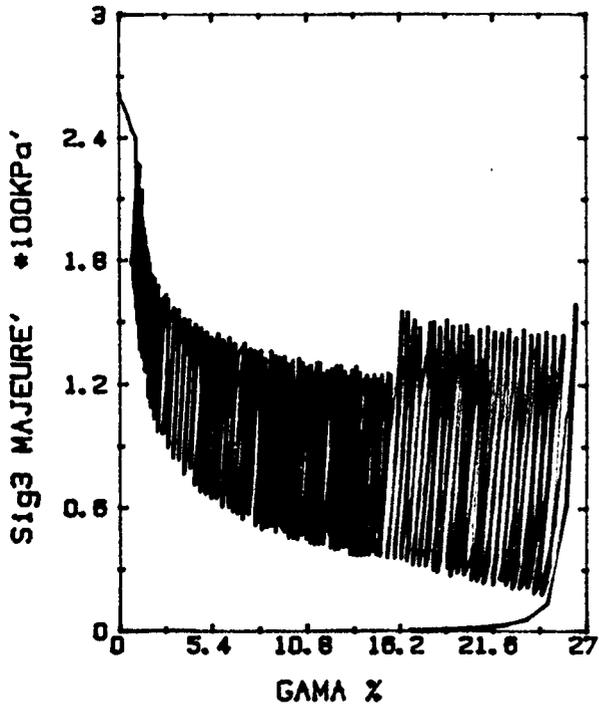


Fig. IV.35.e : Evolution de la contrainte principale majeure

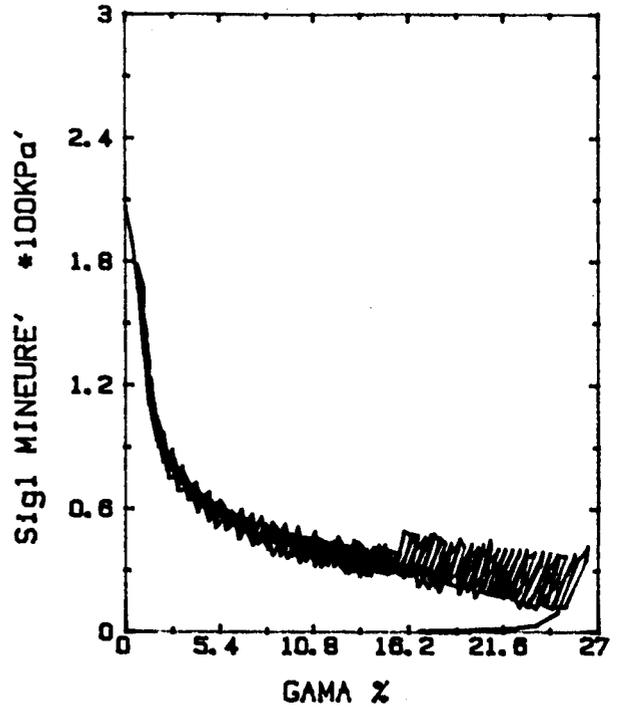


Fig. IV.35.f : Evolution de la contrainte principale mineure

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Avant de présenter les perspectives qu'on peut donner au présent travail, nous allons rappeler les résultats obtenus.

- CONSTRUCTION D'UNE MACHINE DE TORSION

Ce travail a commencé par la construction d'un appareil de torsion adapté aux sables. Actuellement, notre Laboratoire dispose d'un appareil perfectionné avec un système de contrôle et d'acquisition qui permet de réaliser des essais simples (triaxiaux drainés et non drainés) et complexes (b constant, torsion à déformation ou contrainte axiale imposée monotone et cyclique ...).

- CONSTRUCTION D'UNE BANQUE DE DONNEES SUR LE SABLE

Au cours de ce travail, nous avons réalisé de nombreux essais sur le sable d'HOSTUN. Actuellement, nous disposons d'une centaine d'essais sur divers chemins de sollicitation. Ces essais constituent une bonne base de données pour le développement et la validation des modèles rhéologiques.

- COMPORTEMENT DU SABLE ET APPAREIL DE TORSION

- La première partie de nos essais a montré que l'appareil de torsion est mal adapté pour la réalisation des essais triaxiaux conventionnels. En effet, le frettage aux extrémités de l'échantillon y génère des hétérogénéités importantes ce qui rend difficile l'interprétation des essais en particulier en grandes déformations.

- Les essais de torsion simples à contrainte axiale imposée ont montré qu'en début du chargement les déformations volumiques sont négligeables (ce qui peut être lié à l'existence d'un petit domaine élastique à l'origine), mais qu'ensuite elles deviennent importantes. Ces essais ont confirmé également le concept d'état caractéristique pour les sables.

- Les essais à b constant ont montré l'importance de la contrainte intermédiaire. Ils ont aussi prouvé que la machine de torsion offre la possibilité de réaliser des essais triaxiaux vrais.

- La quatrième partie a montré que le comportement du sable dépend sensiblement de l'histoire du chargement.

- Les essais de torsion cycliques ont montré que le comportement du sable dépend du domaine du chargement (contractant ou dilatant). La liquéfaction n'est obtenue que pour des cycles de chargement avec un déviateur dont la borne inférieure tend vers zéro.

Les suites qu'on peut donner à ce travail sont nombreuses. En particulier :

- La poursuite du programme d'essais pour la réalisation des chemins complexes (torsion circulaire, torsion à déviateur constant, ...) qui n'ont pas été réalisés faute de temps.

- L'implantation des essais réalisés dans un système de validation automatisé pour le développement et la vérification des modèles rhéologiques.

BIBLIOGRAPHIE

- AI-MUKHTAR M.** - "Etude expérimentale et modélisation du comportement des fondations superficielles sous sollicitations monotones et cycliques" - Thèse de Doctorat, Université de Lille I (1987)
- BISHOP A.W. and HENKEL D.J.** - "The measurement of soil properties in the triaxial test" (1982)
- CASAGRANDE A. and CARILLON** - Shear failure of anisotropic materials - Contribution to soil Mechanics" Boston Society of civil Engineers, (1941-1953), pp. 123-135
- CHEHADE R., ROBINET J.C., SHAHROUR I.** - "Dilatancy and liquefaction criterion in triaxial and torsion tests" - Accepté pour 12^{ème} Congrès International de Mécanique des sols. RIO (1989)
- CHEHADE W., CHEHADE R., SHAHROUR I.** - "Microcomputer code for constitutive laws verification" - Accepté pour NUMOG 3. NIAGARA FALLS, CANADA, May 1989
- COUSIN D., DELGRANGE H.**- "Asservissement en géotechnique"- Travail de fin d'études EUDIL (1987)
- DOANH T.** - "L'étude du comportement de la kaolinite" - Thèse de Doctorat-Ingénieur, E.C.P. - E.N.T.P.E. (1984)
- GOLCHEH Y.** - "Etude des sollicitations rotationnelles sur une kaolinite - Réalisation d'un appareillage de torsion" - Thèse de Docteur-Ingénieur E.C.P. - E.N.T.P.E. (1984)
- GUELLEC P.** - "La méthode des éléments finis - technique de calculs et diverses applications" - Bulletin des liaisons L.P.C. - avril 1972, pp. 46-73
- HARDIN and DRNEVICH** - "Shear modulus and damping in soils : Measurement and parameter effects", JSMFD. ASCE, Vol. 98, n° SM7, pp. 667-692
- HIGHT D.W., GENS A. and SYMES M.J.** - "Development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of geotechnique, vol. XXXIII, n° 4, décembre 1983, p. 335-383
- HVORSLEV M.J.** - "Torsion shear apparatus and testing procedures" waterways experiment station - Vicksburg Bulletin 38, (1952)

- ISHIHARA K. and LI** - "Liquefaction saturated sand in triaxial torsion shear test" - Japanese society of soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 12, 1972, n° 2, pp. 19-39
- ISHIHARA K. and TAKATSU** - "Effects of over consolidation and K_0 - Condition on the liquefaction characteristics of sands", Japanese Society of soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 19, n° 4, PP. 59-68 (1979)
- ISHIHARA K. and TOWHATA I.** - "Sand repose to cyclic rotation of principal stress direction as induced by wave leads" - Soils and Foundation, Vol. 23, n° 4, décembre 1983
- ISHIHARA K. and YASUDA** - "Sand liquefaction in hollow cylinder torsion under irregular excitation", Japanese Society of soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 15, n° 1, pp. 45-59 (1975)
- KHARCHAFI M.** - "Contribution à l'étude du comportement des matériaux granulaires sous sollicitations rotationnelles" Thèse de Doctorat - Ecole Centrale de Paris (1988)
- KJELLMAN W.** - "Géotechnique", Vol. 2, n° 3 (1951)
- LADE P.V. and DUNCAN J.M.** - "Cubical triaxial tests on cohesion-less soil". Journal of the soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, Vol. 99, N° SM10, Proc. paper 10057, October, 1973, pp. 793-812
- LADE P.V.** - "Torsion shear tests on cohesion less soil" - 5th panam conference, BUENOS AIRES, ARGENTINE Vol. 1 (1975)
- LADE P.V.** - "Interprétation of torsion shear tests on sand". Proceeding of 2nd Int. Conference on Numerical Methods in geomechanics BLACKBURG, U.S.A. (1976)
- LADE P.V.** - "Torsion Shear Apparatus for soil testing" - Laboratory shear strength of soil ASTM STP 740, R.N. Young and F.C. Townsend Eds. American Society for testing and materials, pp. 145-163 (1981)
- LEROYER F.** - "Conception d'une machine de torsion" - Travail de Fin d'Etudes EUDIL (1985)
- LUONG M.P.** - "Etat caractéristique du sol" - C.R. Ac. Sc., Paris, t. 287, Série B, 305 (1978)
- LUONG M.P.** - "Comportement cyclique des sols pulvérulents" - C.R. Ac. Sc., Paris, t. 287, Série B, 313 (1978)
- MOHKAM M.** - "Contribution à l'étude théorique et expérimentale des sables sous changements cycliques" - Thèse de Docteur-Ingénieur, Grenoble (1983)
- PEARCE J.A.** - "Stress and strain behaviour of soils" - Roscoe Memorial Symposium, Foulis an Co (1971)
- ROBINET J.C., GOLCHEH Y., DEFFAYET M. et FAU D.** - "Appareil de cisaillement des sols par torsion d'un cylindre creux" - Groupe Français de Rhéologie, Paris (1983)

ROSCOE K.H. - "An apparatus for the application of simple shear to soil samples" -
Proceedings of the 3th International Conference on soil Mechanics and
Foundations Engineering, ZURICH, Session 2/24 - pp. 168-191 (1953)

SAADA A. and TOWNSEND F.C. - "Laboratory shear testing of soils" - ASTMSTP
740, R.N. Young and F.C. Townsend, Eds. American Society for testing and
materials, pp. 7-77 (1981)

SHAHROUR I. CHEHADE W., BENCHEIKH B. - "Application des modèles
élasto-plastiques à l'étude des fondations des plates-formes". Journées
Universitaires de Génie Civil, LILLE, Mai (1988)

