

50376
1991
302



66147

N° D'ordre : 786

50376
1991
302

THESE
de DOCTORAT

présentée

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

EN GENIE CIVIL

par

PREVOST Joël

DEVELOPPEMENT D'UN APPAREILLAGE DE TORSION-COMPRESSION
SUR CYLINDRE CREUX DE ROCHE

Application à l'étude du comportement d'une
craie blanche sous sollicitations rotationnelles

SOUTENU LE 15 OCTOBRE 1991

JURY :

MM. HENRY
DI BENEDETTO
SHAROUR
CHARLEZ
SCHROEDER
SIWAK
LANSIAUX

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Invité

AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire du Département Génie Civil de l'École des Mines de DOUAI.

Je tiens à remercier particulièrement Messieurs GERENTE, DEFRANCE et LANSIAUX pour la confiance qu'ils ont montré à mon égard.

Monsieur le Professeur HENRY a assuré la direction de ce travail. Sa rigueur scientifique, les conseils qu'il m'a formulés et ses encouragements m'ont été d'un grand soutien. Il m'a fait l'honneur de présider le jury. Qu'il veuille bien accepter mes plus vifs remerciements.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur SIWAK dont les conseils et directives m'ont été très précieux durant ces années de travail.

Messieurs les Professeurs DI BENEDETTO et SHAHROUR ont accepté d'être les rapporteurs de ce mémoire. Je leur en suis très reconnaissant.

Je tiens également à remercier vivement Messieurs CHARLEZ et SCHROEDER qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

L'accomplissement de ce travail doit beaucoup au département Productique-Robotique de l'École des Mines de Douai qui a réalisé avec beaucoup de soin l'usinage de l'appareillage.

J'adresse mes plus chaleureux et sincères remerciements à tous les membres du laboratoire qui m'ont aidé dans ce travail. Je pense notamment à MM. RUDENT, BODDELE, ADAMIEC et KUCHCINSKI.

La dactylographie de ce manuscrit a été assurée par Mesdames COLLART et GRANDEL. Je leur exprime ma sincère gratitude.

S O M M A I R E

<u>NOTATIONS et TERMINOLOGIE</u>	p. 1
<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	p. 3
<u>PREMIERE PARTIE : DEVELOPPEMENT D'UN APPAREILLAGE DE TORSION-COMPRESSION SUR CYLINDRE CREUX DE ROCHE.</u>	p. 7
INTRODUCTION	p. 8
CHAPITRE I : PRESENTATION DE REALISATIONS EXPERIMENTALES BASEES SUR L'ESSAI DE TORSION.	p. 10
I - 1 Principaux appareillages existants	p. 11
I - 2 Principaux résultats	p. 13
CHAPITRE II : L'ESSAI DE TORSION-COMPRESSION SUR CYLINDRE CREUX DE ROCHE - Analyse théorique de l'essai et présentation de l'appareillage	p. 17
II - 1 Analyse théorique	p. 19
II 1 1 Hypothèses de base	p. 19
II 1 2 Etat de contraintes	p. 19
II 1 2 1 Cas de la torsion pure	p. 22
II 1 2 2 Cas des compressions axiale et latérales	p. 24
II 1 2 3 Cas des quatre sollicitations combinées	p. 24
II 1 3 Déformation en torsion pure	p. 25
II - 2 Dimensions de l'échantillon	p. 27

II - 3	L'appareillage de torsion-compression	p. 29
II 3 1	Principe de l'appareillage	p. 29
II 3 2	La cellule d'essai	p. 33
II 3 2 1	Protection de l'échantillon	p. 36
II 3 2 2	Encastrement de l'échantillon	p. 36
II 3 3	Pilotage et asservissement de l'appareillage	p. 38
II - 4	Préparation de l'essai	p. 43
II 4 1	Préparation des éprouvettes	p. 43
II 4 2	Collage de l'éprouvette	p. 43
II 4 3	Saturation de l'éprouvette	p. 44
II - 5	Chemins de contraintes et algorithmes de pilotage et d'acquisition	p. 48
II 5 1	Chemins de contraintes appliqués à l'échantillon	p. 48
II 5 2	Algorithmes de pilotage et d'acquisition	p. 49
CHAPITRE III	COMPARAISON DE TECHNIQUES DE MESURE	p. 53
	EXPERIMENTALES DES DEFORMATIONS DE L'ECHANTILLON	
III - 1	Présentation des essais de calibration	p. 54
III - 2	Résultats expérimentaux	p. 56
III 2 1	Courbes couple-déformation angulaire	p. 56
III 2 2	Courbes couple-déformation volumique	p. 56
III 2 2 1	Détermination de la déformation volumique par contrôleur GDS	p. 56
III 2 2 2	Détermination de la déformation volumique par jauges et capteurs	p. 60
CONCLUSION		p. 61

<u>SECONDE PARTIE</u> : ESSAIS DE TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE SUR UNE CRAIE BLANCHE - SIMULATION NUMERIQUE A L'AIDE DU MODELE DE LADE	p. 64
INTRODUCTION	p. 65
CHAPITRE I : ESSAIS DE TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE SUR UNE CRAIE BLANCHE	p. 67
I - 1 Essais de torsion-compression hydrostatique	p. 69
I 1 1 Présentation et caractéristiques du matériau testé	p. 69
I 1 2 Résultats expérimentaux et analyse	p. 72
I 1 2 1 Courbes couple-déformation angulaire	p. 72
I 1 2 2 Courbes déformation volumique - déformation angulaire	p. 77
I 1 2 3 Modes de rupture	p. 78
I 1 2 4 Conclusion	p. 80
I - 2 Comparaison entre l'essai de torsion pure et l'essai type LUNDBORG	p. 80
CHAPITRE II : SIMULATION NUMERIQUE DE L'ESSAI DE TORSION SOUS PRESSION HYDROSTATIQUE A L'AIDE DU MODELE DE LADE	p. 83
II - 1 Présentation du modèle élastoplastique pour craie	p. 84
II - 2 Simulation numérique de l'essai de torsion sous pression hydrostatique	p. 88
II 2 1 Hypothèses et conditions de simulation numérique	p. 88
II 2 2 Comparaison simulation numérique - résultats expérimentaux	p. 91
II 2 3 Remarques	p. 96

CONCLUSION

p. 98

CONCLUSION GENERALE

p. 100

BIBLIOGRAPHIE

p. 104

NOTATIONS ET TERMINOLOGIE

ρ (g/cm ³)	= masse volumique
n	= porosité
$\sigma I, \sigma II, \sigma III$ (Pa)	= contraintes principales respectivement majeure, intermédiaire et mineure,
$\vec{\sigma}$	= vecteur contrainte
$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}$ (Pa)	= composantes normales du vecteur contrainte en coordonnées cylindriques
$\sigma_{r\theta}, \sigma_{rz}, \sigma_{\theta z}$ (Pa)	= composantes tangentielles du vecteur contrainte en coordonnées cylindriques
σ (Pa)	= contrainte normale
τ (Pa)	= contrainte tangentielle
$\epsilon_{rr}, \epsilon_{\theta\theta}, \epsilon_{zz}$ (-)	= composantes normales du vecteur déformation en coordonnées cylindriques
ϵ_v (-)	= déformation volumique
γ (-)	= déformation de glissement
w (rd/l)	= déformation angulaire spécifique
E (Pa)	= module d'Young
ν (-)	= coefficient de Poisson
G (Pa)	= module d'élasticité transversal
I_0 (l ⁴)	= moment polaire d'inertie d'une section circulaire par rapport à son axe
α (rd)	= angle entre σI et l'axe de révolution
ϕ_e (l)	= diamètre extérieur
ϕ_i (l)	= diamètre intérieur
h (l)	= hauteur

Re (l)	= rayon extérieur du cylindre
Ri (l)	= rayon intérieur du cylindre
r (l)	= rayon compris entre Ri et Re
e (l)	= Re-Ri : épaisseur du cylindre
F (N)	= force de compression axiale
Pe (Pa)	= pression de confinement latérale extérieure
Pi (Pa)	= pression de confinement latérale intérieure
M (m.N)	= moment de torsion
b (-)	= $(\sigma_{II} - \sigma_{III})/(\sigma_I - \sigma_{III})$: caractérise l'importance de σ_{II} par rapport à σ_I et σ_{III}
q (Pa)	= $(\sigma_I - \sigma_{III})/2$
p' (Pa)	= $(\sigma_I' + \sigma_{II}' + \sigma_{III}')/3$ avec $\sigma_i' = \sigma_i - u$
u (Pa)	= pression interstitielle

INTRODUCTION GENERALE

Le calcul et l'étude de la stabilité d'ouvrages nécessite actuellement une connaissance de plus en plus précise du comportement des matériaux qui interviennent dans la réalisation de ces ouvrages. Dans de nombreux cas, les matériaux sont soumis à des sollicitations complexes avec ou sans rotation des axes principaux de contraintes ou de déformations. Il apparaît donc nécessaire de déterminer et de paramétrer les caractéristiques d'un matériau subissant différents chemins de sollicitations, afin de pouvoir élaborer des lois de comportement qui reproduisent, au mieux, le comportement du matériau en tenant compte de l'histoire du chargement.

Sans pour autant réaliser une liste exhaustive, des modèles rhéologiques importants, qui essaient de satisfaire aux exigences précédemment citées, ont été développés tant en mécanique des sols qu'en mécanique des roches. On peut retenir entre autres :

- le modèle incrémental de **DARVE** à multiples zones tensorielles (7), tridimensionnel, en charge et décharge, traduisant les grandes déformations et le comportement non linéaire des sols,

- le modèle de **MROZ** (20), à plusieurs surfaces limites d'écroutissage, dans le cas des argiles non drainées. Ce modèle simule des chargements cycliques, en élasticité non linéaire ou en élasto-plasticité à écroutissage durcissant,

- le modèle de **LADE** (17), élasto-plastique à deux mécanismes, qui dans le cas des matériaux granulaires, tient compte des effets de contractance et de dilatance,

- le modèle de **PANET** (21), élasto-plastique, à écroutissage radoucissant dans le cas des roches,

- le modèle de **DESAI** (8) basé sur la théorie de la plasticité dans le cas des roches tendres et qui prend en compte, avec un faible nombre de paramètres, l'influence du chemin de contraintes.

Il apparaît, tout d'abord, que ces modèles s'appuient sur un milieu continu homogène dans le cadre d'une mécanique irrotationnelle. Le formalisme tridimensionnel est le plus souvent obtenu à partir d'essais biaxiaux où deux contraintes principales sont égales. Les critères de rupture ou les fonctions d'écoulement sont soit indépendants de la contrainte intermédiaire, soit exprimés en terme d'invariants.

L'étude en laboratoire permet généralement de mieux connaître les caractéristiques mécaniques des matériaux à l'aide d'essais qui tentent de reproduire le mieux possible l'état naturel des sollicitations. Cependant la plupart des essais s'avèrent insuffisants pour déterminer toutes les propriétés constitutives des matériaux.

L'essai triaxial classique ne fait intervenir que deux contraintes principales différentes. Dans le cas de sollicitations tridimensionnelles, l'appareillage qui s'impose est le véritable triaxial (19). Dans cet essai considéré homogène, mais très difficile à mettre en oeuvre, les directions principales du champ de contraintes restent fixes par rapport au matériau. En réalisant un contrôle indépendant de la valeur des trois contraintes principales, il est possible d'étudier non seulement l'influence de la contrainte intermédiaire, mais également l'anisotropie initiale ou induite au cours de l'essai, dans le cadre d'une mécanique irrotationnelle.

Les mesures des caractéristiques de rupture en cisaillement dépendent quant à elles du type d'essai réalisé. Les essais à plan de cisaillement imposé, du type **LUNDBORG** où les plans de rupture n'affectent qu'un très faible volume d'échantillon, ou de type **CASAGRANDE** qui induit une rotation de l'échantillon d'autant plus élevé que l'espace inter-boîte est important, provoquent un cisaillement local et non global de l'échantillon, ce qui induit une non-homogénéité du champ de contraintes et de déformation au sein du matériau. Ce sont des essais où l'on teste essentiellement la matrice sans prendre en compte la présence de discontinuités éventuelles. Ces essais donnent généralement des résistances à la rupture supérieures à celles des essais à plan de cisaillement libre, tels que compression monoaxiale, traction directe, essai triaxial classique ou torsion pure (10).

Les essais à plan de cisaillement libre, qui prennent en compte la fissuration du matériau, sont plus représentatifs des phénomènes naturels où la rupture a souvent lieu suivant les plans les plus défavorables vis à vis de la stabilité.

Lorsque l'on étudie la stabilité d'ouvrages souterrains (mines, tunnels, cavités, carrières souterraines...) ou l'influence du creusement sur celle-ci, il apparaît qu'il existe des chemins de contraintes principales parfois tridimensionnels pour lesquels la direction des contraintes principales subit une rotation, qui peut être accompagnée d'un changement de la valeur des contraintes principales : problèmes de convergence aux fronts de taille, de stabilité de piliers, de fondations de structures off-shore, de forages...

Comme on peut le constater, il y a donc une limitation dans les équipements de laboratoire pour simuler le contrôle de la valeur et de la rotation des contraintes principales au sein d'un matériau soumis à des efforts normaux combinés à des efforts de cisaillement. Cependant, il est possible de réaliser en laboratoire des chemins de contraintes tridimensionnels, qui incluent la rotation des directions des contraintes principales et la variation de leur valeur, à travers un essai sur échantillon cylindrique creux. Celui-ci doit alors être soumis simultanément à un chargement axial, à des pressions de confinement intérieure et extérieure et à un effort de torsion.

L'objectif de ce travail consiste en la conception et la mise au point en laboratoire d'un tel essai dans le cadre des matériaux fragiles. Cette réalisation expérimentale doit permettre, par une grande souplesse d'utilisation, de mieux déterminer le comportement des matériaux rocheux sous différents états de contraintes. Il sera alors possible de développer et valider des modèles rhéologiques qui puissent simuler les multiples combinaisons de sollicitations que l'on peut rencontrer in-situ. Ce travail s'intègre dans le cadre du GRECO Géomatériaux, groupe Validation - Matériaux cohérents, dont les objectifs généraux sont de valider les essais et les modèles.

Ce travail se décompose en deux parties principales. La première consiste en une présentation de différentes réalisations d'essais de torsion d'éprouvettes cylindriques pleines ou creuses. L'appareillage de torsion-compression développé à l'Ecole des Mines de DOUAI est ensuite décrit. Cet appareillage permet une combinaison et une superposition des quatre conditions aux limites (effort axial, couple, pression latérale extérieure, pression latérale intérieure) sur un cylindre creux de roche. Enfin, nous présentons les essais de comparaison de techniques de mesures expérimentales, essais réalisés sur un grès des Vosges.

La seconde partie de ce travail présente, tout d'abord, les premiers essais de torsion-compression hydrostatique réalisés sur une craie blanche, puis la simulation numérique de ces essais à l'aide du modèle de LADE, modifié et adapté par SHAO à l'étude des craies.

PREMIERE PARTIE

DEVELOPPEMENT D'UN APPAREILLAGE

DE TORSION-COMPRESSION SUR

CYLINDRE CREUX DE ROCHE

INTRODUCTION

L'intérêt de la réalisation d'un essai de torsion-compression sur cylindre creux de roche est de pouvoir simuler et modéliser le comportement in-situ d'un matériau soumis simultanément à des efforts normaux et à des efforts de cisaillement. Cependant, la mise au point d'un appareillage, permettant de réaliser en laboratoire de telles simulations, pose de nombreux problèmes théoriques et technologiques dont il faut tenir compte lors de la conception, mais également lors de l'interprétation des résultats expérimentaux.

L'objet de la première partie de ce travail est, tout d'abord, de présenter différents appareillages de torsion réalisés dans le monde, et les principaux résultats qualitatifs qu'ils ont permis d'obtenir.

Sur la base de ces références technologiques et expérimentales, le second chapitre décrit l'appareillage qui a été développé à l'Ecole des Mines de DOUAI. Il précise l'aspect théorique de l'essai de torsion combiné ou non à d'autres sollicitations, et indique le mode opératoire que nous avons défini dans la réalisation de l'essai. Enfin, il présente les premiers algorithmes et chemins de contraintes qui ont été développés sur cet appareillage.

Le dernier chapitre de cette première partie décrit les essais de torsion monotone sous contrainte hydrostatique constante réalisés sur un grès des Vosges, et pour lesquels différentes techniques de mesure et de dépouillement sont analysées et comparées.

CHAPITRE I

PRESENTATION DE REALISATIONS EXPERIMENTALES

BASEES SUR L'ESSAI DE TORSION

La complexité de la mise au point d'un essai de torsion combiné à d'autres types de chargement explique le faible nombre de références, dans le cadre de la mécanique des roches, sur des réalisations expérimentales en laboratoire.

Dans ce chapitre sont présentés de manière succincte et non exhaustive différents appareillages basés sur l'essai de torsion. Puis sont dégagés les principaux résultats qualitatifs relatifs au comportement mécanique des matériaux testés sous différents chemins de sollicitations.

I 1 - PRINCIPAUX APPAREILLAGES EXISTANTS

A l'heure actuelle, plusieurs appareillages ont été réalisés, qui permettent l'étude de matériaux tels que les sols ou les matériaux fragiles.

Cependant, **BÖKER** (1915) (4) fut le premier à étudier les déformations plastiques en torsion d'éprouvettes cylindriques pleines en marbre de Carrare, sollicitées préalablement hydrostatiquement ou axialement.

GRIGGS (1936) (12) réalisa des essais de torsion sur du calcaire de Solenhofen jusqu'à une pression de confinement de 100 MPa.

BRICE (1954) (5), **GOODE** et **HELMY** (1967) (11) ont étudié la fissuration du béton par torsion-compression axiale sur éprouvettes tubulaires.

Le tableau I-1 suivant répertorie les réalisations les plus récentes et les plus significatives. De gammes de sollicitations très différentes, elles permettent, outre le couple, l'application de l'ensemble ou d'une partie des conditions aux limites suivantes: effort axial, pressions interne, externe ou hydrostatique, et température sur des échantillons pleins ou creux. La taille de ces derniers, notamment dans le cas des roches, tient compte non seulement de l'intensité des sollicitations appliquées, mais également du degré d'hétérogénéité et de microfissuration du matériau.

CONCEPTEURS	ECHANTILLONS	SOLLICITATIONS MAXIMALES	ETUDE
Y. SATO F. NAGAI (1974)	Marbre Cylindre plein ou creux $\phi_i = 10$ à 15 mm $\phi_e = 12$ à 18 mm	Pression : 160 MPa Couple : 25 mN	Influence de la pression hydrostatique et recherche de la distribution des contraintes à la rupture en torsion
J. HANDIN D. HIGGS J. O'BRIEN (1960)	Marbre Cylindre plein $\phi = 0,37$ inch h = 1,25 inch	Pression : 275 MPa Températ.: 300°C Force : 700 kN	Etude de la torsion sous confinement ou chargement axial et en température
Z.P. BAZANT et A1 (1981)	Béton Cylindre plein $\phi = 152, 102$ et 76 mm h = 305 mm	Pression : 138 MPa Force : 5 MN Couple : 5 600 mN Températ: 600°C	Etude de la rupture en température et en torsion
E. DURAND (1973)	Roches Cylindre plein ou creux $\phi_e = 60$ mm $\phi_i = 30$ mm h = 180 mm	Couple : 2 500 mN Force : 500 kN Pression : 60 MPa	Comportement des roches à la rupture en torsion sous pression hydrostatique ou effort axial
M.J. SYMES D.W. HIGHT A. GENS (1982)	Sable dense Cylindre creux $\phi_e = 254$ mm $\phi_i = 203$ mm h = 254 mm		Etude de l'anisotropie initiale et de la rotation des contraintes principales en conditions non drainées
A. ALARCON J.L. CHAMEAU G.A. LEONARDS (1986)	Sable Cylindre creux $\phi_e = 75$ mm $\phi_i = 38$ mm h = 187 mm	Fréquences : 600 kHz Couple : 56 mN Force : 3,3 kN	Propriétés dynamiques. Cyclage en torsion, liquéfaction
M. KHARCHAFI (1988)	Sable d'Hostun $\phi_e = 180$ mm $\phi_i = 150$ mm h = 180 mm		Etude de l'anisotropie induite. Comportement pré-rupture
R. CHEHADE I. SHAHROUR (1989)	Sable d'Hostun $\phi_e = 180$ mm $\phi_i = 150$ mm h = 180 mm	Couple : 90 mN Pression : 1,2 MPa Force : 50 kN	Influence de la contrainte intermédiaire. Liquéfaction

Tableau I-1

I 2 - PRINCIPAUX RESULTATS

Sur la base des expérimentations décrites dans le tableau précédent, des résultats qualitatifs importants sont d'ores et déjà dégagés.

SATO et **NAGAI** (24), **HANDIN** et **AL** (13) ont testé le marbre, matériau pur, homogène et de granulométrie uniforme. Ils constatent que les pressions de confinement ou la pression hydrostatique influent fortement sur le comportement en torsion : la limite de résistance élastique, la limite de rupture en torsion ainsi que la ductilité augmentent avec ces pressions. **SATO** et **NAGAI** obtiennent d'ailleurs une augmentation proportionnelle de la limite élastique avec la pression hydrostatique. De même, lorsque la torsion est couplée à un effort axial, les trois propriétés mécaniques précédentes augmentent avec celui-ci.

HANDIN et **AL** montrent de plus que la transition entre les domaines fragile et ductile ainsi que la résistance au cisaillement à la rupture sont fonction de la contrainte intermédiaire σ_{II} . Par leurs essais, ils prouvent également la non-généralité de la théorie de Mohr, qui est indépendante de la contrainte principale intermédiaire. Ils obtiennent en effet des courbes-enveloppes différentes pour plusieurs types de sollicitations : torsion, compression uniaxiale, traction directe. **CHEHADE** (6) a également montré l'importance de la contrainte intermédiaire σ_{II} en réalisant des essais à b constant sur du sable d'Hostun.

BAZANT et **AL** (2) (3), testant des bétons, matériaux hétérogènes localement (ce qui implique l'utilisation d'échantillons relativement importants), mettent en évidence que la rotation des axes principaux des contraintes pendant le processus de déformation entraîne une anisotropie de contraintes due à l'histoire du chargement appliqué.

Cette rotation permet ainsi l'étude de la réponse incrémentale du matériau à des incréments de sollicitations dont les directions principales tournent au cours de l'essai. Comme précisé précédemment, cela revêt une grande importance dans le formalisme des lois de comportement.

L'allure des courbes couple effort-déformation angulaire spécifique est influencée par le type de sollicitations et l'intensité de celles-ci. DURAND (10) a montré qu'en torsion pure sur cylindre creux de matériau homogène, il y a perte de linéarité dès que l'épaisseur augmente. Il définit d'ailleurs un point de limite élastique, seuil à partir duquel une dégradation partant de la périphérie de l'éprouvette se propage vers le centre. L'inflexion de la courbe est d'autant plus marquée que le rapport R_i/R_e est faible. Toujours en torsion pure, lorsque le chargement monotone est remplacé par un chargement cyclique, une irréversibilité et une hystérésis dans la déformation apparaissent. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'amplitude du couple est élevé. Il caractérise l'ouverture de fissures de traction. Il apparaît également un basculement progressif des cycles vers l'axe de déformation, qui traduit un écrouissage radoucissant du matériau.

Dans l'essai de torsion sous pression hydrostatique, les courbes effort-déformation angulaire montrent l'existence d'un seuil de pression en deçà duquel le comportement est pseudo-fragile, et au-delà duquel il est plastique.

DURAND a également étudié le mode de rupture sur des cylindres creux de roches isotropes et anisotropes.

Pour les premières, l'orientation de la rupture ne dépend que de l'orientation du tenseur des contraintes jusqu'à des pressions de confinement d'intensité moyenne. La rupture est alors d'extension, caractérisée par une hélice inclinée à 45° par rapport à l'axe de révolution. Ce phénomène a été confirmé par SATO, qui a observé la formation de plusieurs fissures parallèles. Pour des intensités de pression de confinement élevées, la rupture est de cisaillement, l'inclinaison de l'hélice de rupture étant supérieure à 45° par rapport aux génératrices.

Il apparaît en outre que σ_{II} joue un rôle important dans la rupture notamment pour des roches préfissurées, où elle referme les fissures et empêche les glissements. Pour des matériaux peu préfissurés (craie), la résistance à la traction dépend essentiellement de σ_I et σ_{III} , σ_{II} influençant la valeur de la cohésion déterminée à l'aide d'essais de torsion-compression axiale (10).

Dans le cas de matériaux anisotropes, l'orientation de la rupture dépend du tenseur des contraintes, mais surtout de l'orientation de celui-ci par rapport à la structure.

Selon que la stratification est perpendiculaire, parallèle ou inclinée à 45° par rapport à l'axe de révolution, la rupture est soit caractérisée par une hélice inclinée à 60°, soit située dans les plans de stratification, soit planaire inclinée à 45°.

SYMES et **AL** (14) (30) estiment que, grâce à l'essai de torsion sur cylindre creux de sol, on peut étudier séparément l'anisotropie notamment initiale, l'influence du paramètre b et l'effet de la rotation α des axes principaux des contraintes.

Remarquant qu'il n'y a pas biunivocité entre σ_{II} et α , ils définissent trois types d'essais :

- 1 - q augmente jusqu'à la rupture pour différents α à b et p' constants.
- 2 - q augmente jusqu'à la rupture pour différents b à α et p' constants.
- 3 - α varie à q , p' , b constants.

Le premier type d'essai montre la dépendance des caractéristiques de résistance et de déformation avec α , ce qui permet la détermination de l'enveloppe de rupture anisotrope.

Le second type d'essai montre l'influence du paramètre b sur la modification des caractéristiques mécaniques. Le contrôle expérimental de ce paramètre b s'avère indispensable pour l'interprétation des résultats concernant les variations de la rotation α . Cette rotation détermine en effet la réponse du matériau durant l'incrément de cisaillement suivant.

Quant au troisième type, il permet d'étudier uniquement l'effet d'une rotation continue des directions des contraintes principales.

SYMES et **AL** ont également constaté une large divergence entre les directions des incréments de contraintes et de déformations dès le début de la rotation, cette divergence s'amenuisant à la rupture. Des différentes expérimentations réalisées, ils ont défini des limites d'uniformité du champ de contraintes définies par l'inégalité $0,9 < P_e/P_i < 1,2$ dans le cas d'un cylindre à paroi mince (31).

La non-uniformité des contraintes et des déformations est également définies par les paramètres β_1 et β_3 qui traduisent la différence entre valeurs

réelles et calculées. Ces paramètres sont fonctions de la géométrie, du chemin de contraintes appliqué et de la loi de comportement. Leurs valeurs diminuent avec l'épaisseur du cylindre.

Enfin, il est à noter que **HANDIN** et **ALARCON** (1) ont obtenu, sur du sable, des états de grandes déformations à la rupture en torsion, avec une différence sensible entre les angles de déformation prévus et mesurés.

CHAPITRE II

**L'ESSAI DE TORSION-COMPRESSION SUR
CYLINDRE CREUX DE ROCHE**

Analyse théorique de l'essai
et présentation de l'appareillage

Il apparaît au travers des références bibliographiques que, dans le cadre des matériaux fragiles, peu d'essais sur cylindre creux combinant simultanément et indépendamment un chargement axial, deux pressions de confinement pouvant être différentes, et un effort de torsion, ont été réalisés.

Bien que délicat à mettre en oeuvre, cet essai est cependant très intéressant, car il permet un contrôle de la valeur des trois contraintes principales indépendamment de celui de la rotation de deux d'entre-elles.

L'indépendance des différents chargements permet de réaliser des combinaisons variées de chemins de contraintes ou de déformations.

C'est dans ce but qu'a été développé un appareillage de torsion-compression sur cylindre creux de roche soumis à des pressions latérales interne et externe. Par cet essai, il est possible d'étudier la réponse d'un matériau sollicité sur différents chemins dans l'espace des contraintes principales ainsi que l'influence de la contrainte principale intermédiaire. La torsion permet de préciser le comportement en cisaillement libre sous états de contraintes hydrostatiques, biaxiaux ou triaxiaux, et d'étudier la rotation de deux contraintes principales. Les cyclages en contraintes déterminent les irréversibilités en déformation de la roche testée. Les essais doivent être également réalisés dans des conditions drainées ou non drainées, afin d'étudier les variations de volume de l'échantillon ou les surpressions interstitielles (couplage fluide-squelette). L'analyse des résultats expérimentaux ne peut alors se concevoir que dans le cadre d'une mécanique rotationnelle.

L'objet de ce chapitre est de présenter tout d'abord une étude théorique de l'essai, puis une analyse dans le choix des dimensions de l'échantillon. Enfin, après une description de l'appareillage, nous précisons le mode opératoire adopté dans la préparation de l'essai, et les premiers algorithmes et chemins de contraintes qui ont été développés.

II 1 - ANALYSE THEORIQUE

II 1 1 - Hypothèses de base

Il est nécessaire de fixer un certain nombre d'hypothèses afin de définir l'état de contraintes qui se développe au cours de l'essai de torsion-compression.

Nous supposerons que le comportement du matériau testé obéit à une loi élastique, linéaire et isotrope. De plus, dans le cas de la torsion, les sections droites du cylindre à base circulaire restent planes et normales à la direction axiale. L'axe de torsion se confond avec celui du cylindre. Enfin, les forces de volume sont négligées.

II 1 2 - Etat de contraintes

L'éprouvette tubulaire est repérée par un système d'axes trirectangulaires en coordonnées cylindriques $(0, r, \theta, z)$ (Figure II-1) :

$0.r$: axe dirigé suivant un rayon

$0.\theta$: axe dirigé suivant une tangente à une section droite circulaire

$0.z$: axe dirigé suivant une génératrice.

Les efforts appliqués à l'éprouvette tubulaire sont les suivants :

- un effort axial F de compression,
- une contrainte de confinement intérieure P_i ,
- une contrainte de confinement extérieure P_e ,
- un moment de torsion M .

L'état de contraintes en fonction des efforts F , P_i , P_e et M dans un élément de la paroi du cylindre est le suivant, compte-tenu des hypothèses précédentes (9) (15) (23) (Figure II-2) :

$$\sigma_{rr} = \frac{P_i R_i^2 - P_e R_e^2}{(R_e^2 - R_i^2)} - \frac{(P_i - P_e) R_e^2 R_i^2}{(R_e^2 - R_i^2) r^2}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P_i R_i^2 - P_e R_e^2}{(R_e^2 - R_i^2)} + \frac{(P_i - P_e) R_e^2 R_i^2}{(R_e^2 - R_i^2) r^2}$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zz1} + \frac{F}{\pi (R_e^2 - R_i^2)}$$

$$\sigma_{\theta z} = \sigma_{z\theta} = \frac{2 M r}{\pi (R_e^4 - R_i^4)} = \frac{M r}{I_0}$$

$$\sigma_{r\theta} = \sigma_{\theta r} = 0 \quad \text{avec } R_i < r < R_e$$

$$\sigma_{rz} = \sigma_{zr} = 0$$

où σ_{zz1} est une fonction des pressions P_i et P_e qui dépend des conditions aux limites en déplacement aux extrémités du cylindre.

Dans un tel essai, l'effort de torsion M développe uniquement des contraintes de cisaillement $\sigma_{\theta z}$ et $\sigma_{z\theta}$. L'effort axial F contribue à la contrainte verticale σ_{zz} et les pressions de confinement P_i et P_e d'intensité différente entraînent un gradient des contraintes radiale σ_{rr} et tangentielle $\sigma_{\theta\theta}$ à travers la paroi. De plus, cette différence entraîne la non-égalité de ces deux contraintes, ce qui rend l'essai non-homogène.

La valeur des contraintes principales est donc fonction des efforts appliqués et de la géométrie du cylindre. Il y a cependant une restriction, les efforts appliqués suivant les directions axiale et radiale étant des compressions.

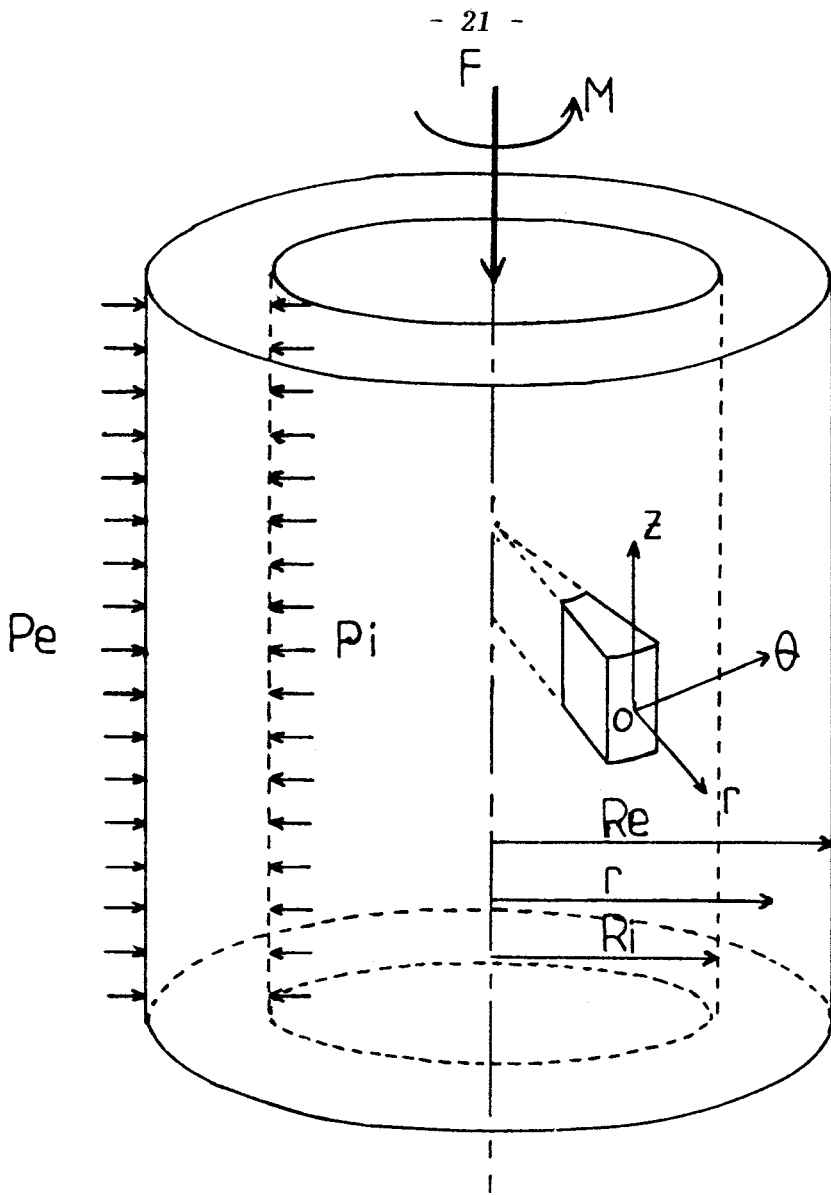


FIGURE II - 1 : Description des efforts appliqués

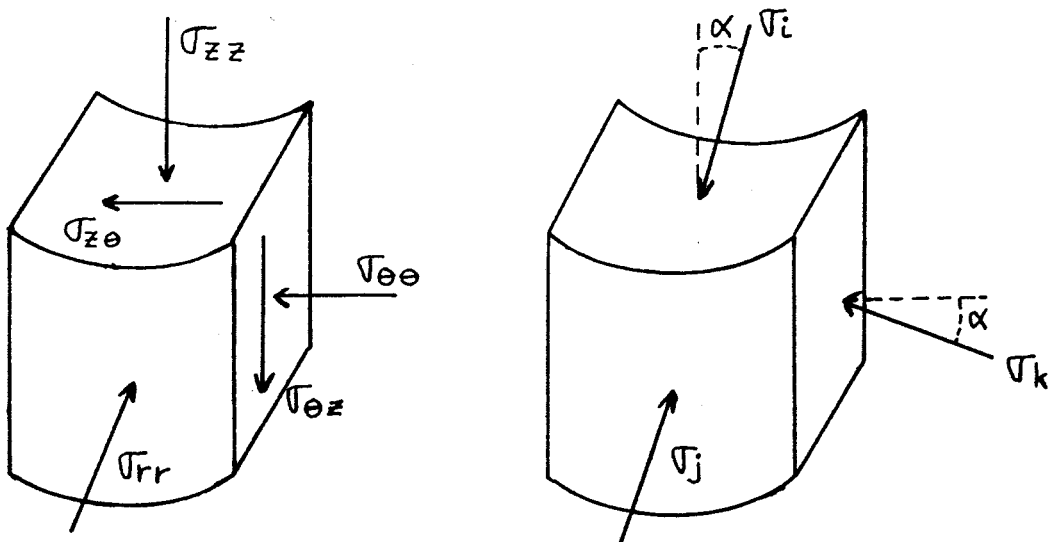


FIGURE II - 2 : Etat de contraintes dans un élément de la paroi du cylindre

II 1 2 1 - Cas de la torsion pure

En torsion pure, la matrice représentant l'état de contraintes se réduit à :

$$[\sigma] = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma z \theta \\ 0 & \sigma \theta z & 0 \end{vmatrix}$$

En chaque point, la direction radiale est direction principale. Les deux autres contraintes principales sont donc situées dans un plan normal au rayon. Chaque élément du cylindre est soumis à un cisaillement pur défini par les contraintes principales suivantes :

$$\begin{aligned} \sigma I &= \sigma \theta z \\ \sigma II &= 0 \\ \sigma III &= - \sigma \theta z \end{aligned}$$

A l'aide de la représentation de Mohr (Figure II-3), on obtient un cercle centré à l'origine des axes et de rayon $\sigma \theta z$.

Au voisinage du point O, le vecteur contrainte $\vec{\sigma}$, agissant sur une facette dS d'un prisme infinitésimal en équilibre situé dans un plan normal à la direction radiale, a pour composantes (Figure II-4) :

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma \theta z \sin 2 \beta \\ \tau &= \sigma \theta z \cos 2 \beta \end{aligned}$$

Les deux autres directions principales sont définies par les valeurs de β qui annulent la dérivée de σ par rapport à β , ce qui correspond à des orientations de $\beta = 45^\circ$ et 135° . Ces directions sont donc inclinées à 45° de part et d'autre des génératrices, qui, initialement parallèles à l'axe du cylindre, se transforment en hélice sous l'effet d'un effort de torsion pure.

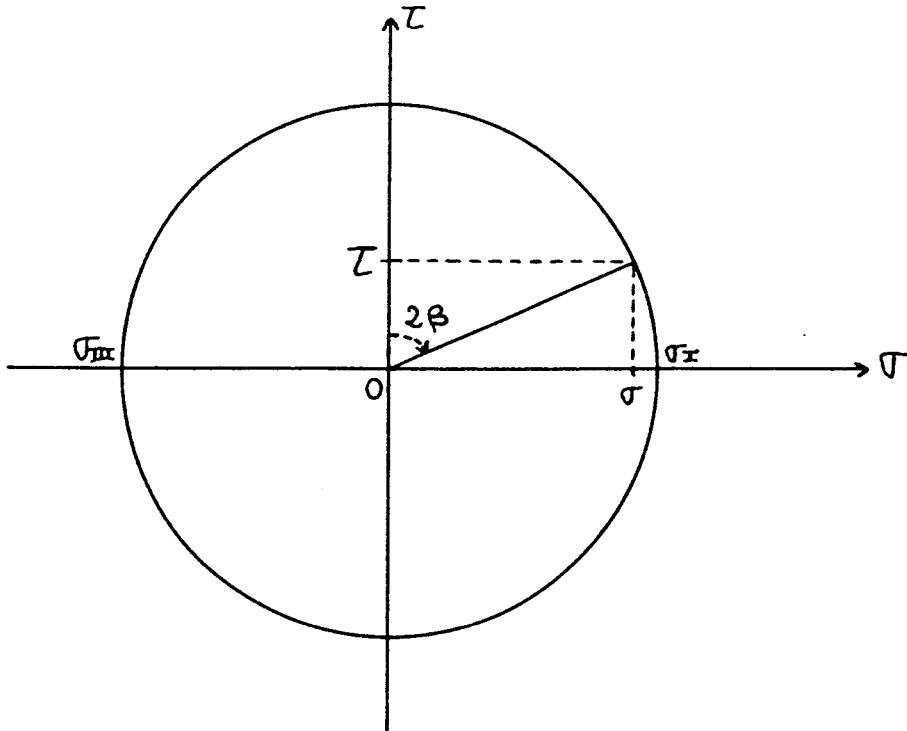


FIGURE II - 3 : Torsion pure : représentation de MOHR des contraintes situées dans un plan normal à la direction radiale

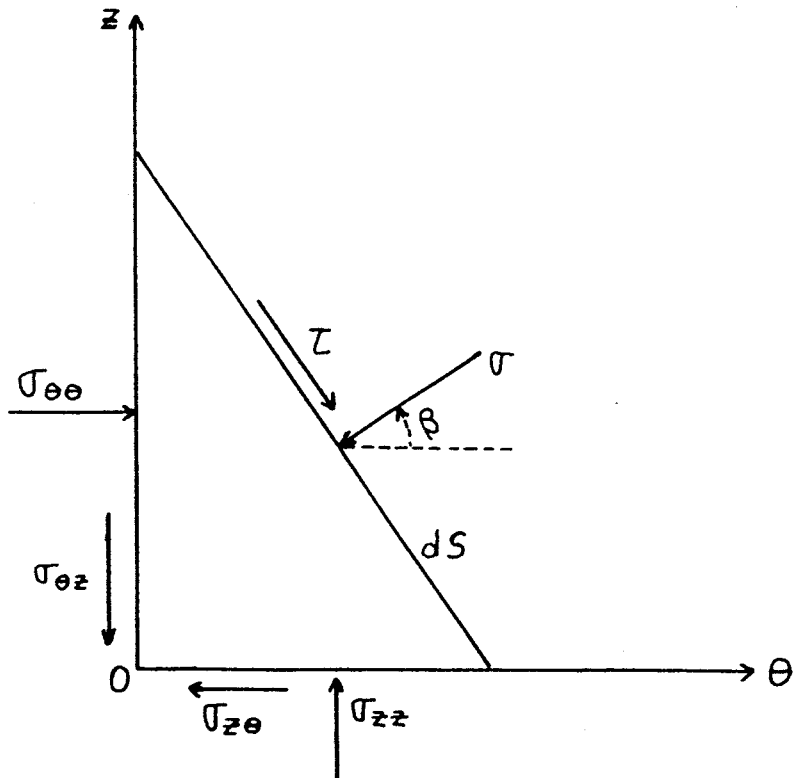


FIGURE II - 4 : Représentation plane des contraintes sur les faces latérales d'un prisme infinitésimal triangulaire dans un plan $(0, \theta, z)$

II 1 2 2 - Cas des compressions axiale et latérales

Dans ce type de sollicitations, la matrice des contraintes prend la forme suivante :

$$[\sigma] = \begin{vmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

En un point du cylindre, les trois contraintes sont alors contraintes principales de directions principales fixes confondues avec les axes du repère précédemment défini. Il faut cependant noter que pour des pressions de confinement P_e et P_i différentes, on est alors en présence d'un essai véritablement triaxial.

II 1 2 3 - Cas des quatre sollicitations combinées

Dans le cas où les quatre sollicitations F , P_e , P_i et M sont appliquées, la matrice des contraintes devient :

$$[\sigma] = \begin{vmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{z\theta} \\ 0 & \sigma_{\theta z} & \sigma_{zz} \end{vmatrix}$$

D'une manière identique aux deux cas précédents, la direction radiale est direction principale. Les contraintes principales s'expriment de la façon suivante :

$$\sigma_i = \sigma_{rr}$$

$$\sigma_j = \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz} - \sqrt{(\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta})^2 + 4\sigma_{\theta z}^2}}{2}$$

$$\sigma_k = \frac{\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz} + \sqrt{(\sigma_{zz} - \sigma_{\theta\theta})^2 + 4\sigma_{\theta z}^2}}{2}$$

avec $i \neq j \neq k$ et $i, j, k \in \{I, II, III\}$

L'ordre de ces contraintes principales dépend de l'intensité des efforts exercés et de la position r du point d'application dans la paroi du cylindre.

Cependant, on se trouve toujours dans le cadre d'un essai véritablement triaxial.

Au voisinage du point 0, le vecteur contrainte $\vec{\sigma}$ qui agit sur une facette dS du prisme infinitésimal a pour composantes:

$$\sigma = \frac{\sigma_i + \sigma_j}{2} + \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2} \cos 2\beta$$

$$\tau = \frac{\sigma_i - \sigma_j}{2} \sin 2\beta$$

Seule la contrainte principale radiale reste fixe en direction, les deux autres contraintes subissant une rotation α pendant l'application de l'effort de torsion.

II 1 3 Déformation en torsion pure

Soit un disque d'épaisseur dz dont l'axe coïncide avec celui du cylindre. Sous un effort de torsion, les génératrices de ce disque s'inclinent d'un angle γ avec une rotation des sections droites extrêmes d'un angle relatif $d\eta$. L'angle γ , qui représente l'inclinaison des génératrices par rapport à l'axe du cylindre, représente le glissement ou la distorsion et s'exprime de la manière suivante (Figure II-5) :

$$\gamma = r \cdot d\eta / dz = r \cdot w \quad \text{où}$$

w , qui est la déformation angulaire spécifique, représente la rotation relative de deux sections droites situées à une distance unité. L'expression de w en fonction du moment de torsion, compte-tenu des hypothèses précédentes, est la suivante :

$$w = \frac{2 M}{\pi G (R_e^4 - R_i^4)} = \frac{M}{G I_0}$$

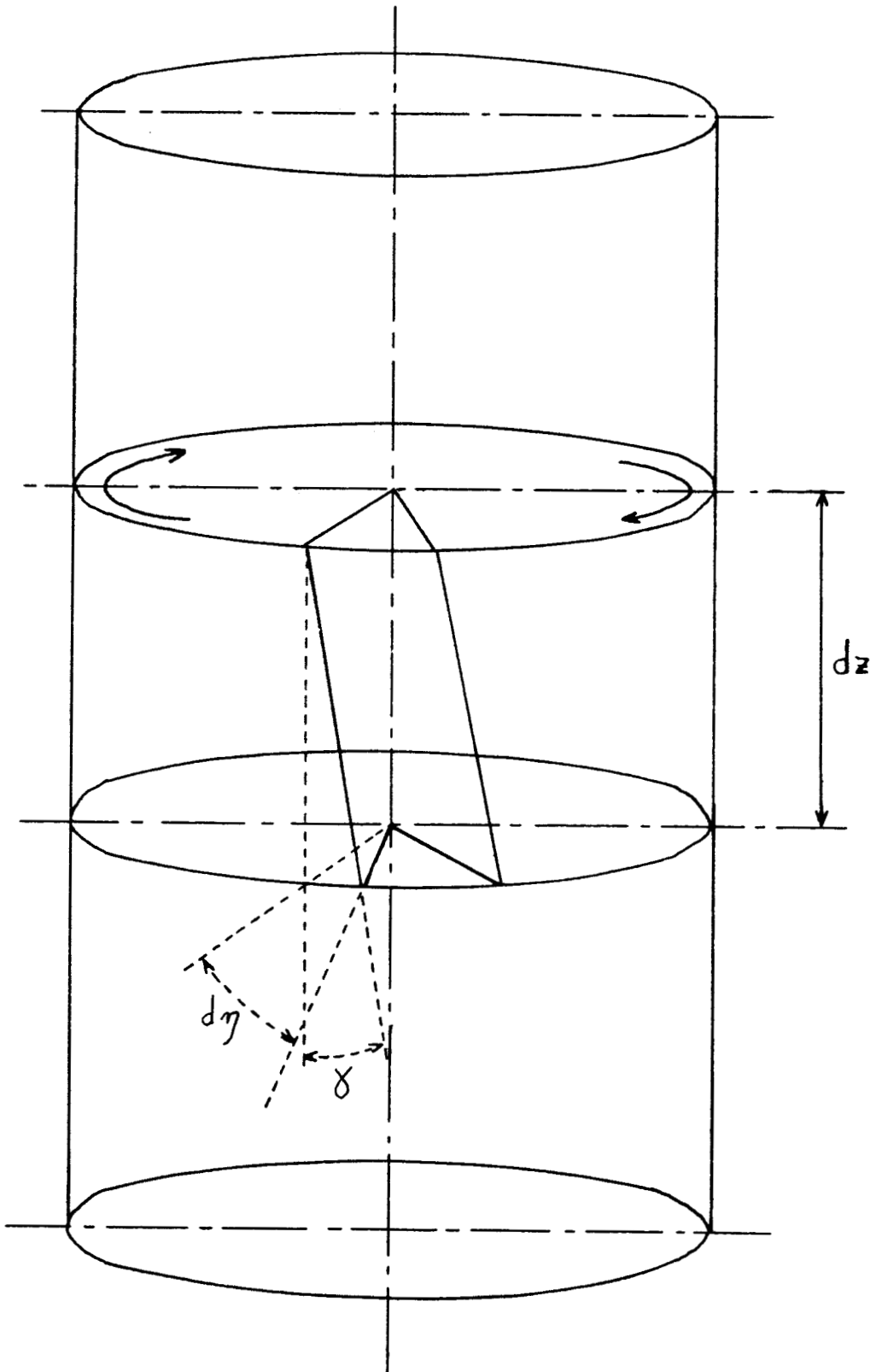


FIGURE II - 5 : Déformation d'un cylindre soumis à un effort de torsion pure

II 2 - DIMENSIONS DE L'ÉCHANTILLON

La dépendance et la non-uniformité de la valeur des contraintes principales vis-à-vis de la géométrie posent toutefois le problème du choix des dimensions de l'échantillon. Cette non-uniformité résulte tout d'abord de la courbure de l'échantillon. L'application des sollicitations en périphérie est certes uniforme, cependant des pressions de confinement différentes entraînent un gradient de σ_{rr} et $\sigma_{\theta\theta}$ le long de la paroi. De plus, l'application d'un effort de torsion implique une variation de la contrainte de cisaillement à travers la paroi.

Le choix de l'épaisseur du cylindre creux fait également intervenir des considérations pratiques et techniques. Il est également fonction de la gamme d'efforts appliqués.

Les roches, les mortiers ou bétons sont des matériaux avec une grande hétérogénéité de la microstructure, ce qui implique l'utilisation d'échantillons de taille suffisamment importante. En effet, il faut considérer que la roche n'est jamais un milieu continu et homogène à l'échelle du cristal ou du grain. L'épaisseur du cylindre doit être représentative de la taille du grain (supérieure à 10 fois le diamètre du grain (10)). Elle doit aussi assurer une densité uniforme dans toute la paroi, surtout dans le cas de matériaux hétérogènes.

Il est également nécessaire de signaler les problèmes de préparation de l'échantillon, au niveau de la fragilité lors du carottage ou de la réalisation d'un surfaçage correct de l'éprouvette.

Dans le cas des sols, **HIGHT** et **Al** (14) se sont également attachés à étudier, à l'aide des deux coefficients β_1 et β_3 , la différence entre contraintes réelles et calculées en fonction du rapport R_i/R_e et de la différence entre pressions de confinement P_e et P_i . Le coefficient β_1 permet de quantifier la rotation des axes principaux lorsque l'on calcule les contraintes en mécanique irrotationnelle. Le coefficient β_3 est un paramètre de non-uniformité des contraintes. En utilisant une loi linéaire élastique isotrope, ils concluent que pour un rapport R_i/R_e voisin de 0,8, on "optimise" la non-uniformité des champs de contraintes et de déformations.

DURAND montre par des essais de torsion pure sur différents échantillons de roches, que des rapports R_i/R_e inférieurs à 0,5 n'ont plus d'influence sur la valeur de la contrainte périphérique de cisaillement à la rupture. Pour des rapports supérieurs, cette contrainte dépend de l'épaisseur du cylindre.

DURAND préconise d'ailleurs un rapport Re/e voisin de 2 à 3.

La non-uniformité du champ de contraintes dépend également de la fixation aux extrémités du cylindre. La transmission de l'effort de torsion à l'éprouvette nécessite un encastrement de ses deux bases, ce qui implique des effets de bords non négligeables qui interviennent dans le choix de l'élanement. Ces encastresments entraînent tout d'abord un blocage radial en déplacement aux extrémités, qui s'associe au développement de contraintes radiales de cisaillement σ_{rz} et σ_{zr} qui diminuent vers le centre du cylindre (14). Ces contraintes provoquent des moments fléchissants qui affectent la distribution des contraintes verticales et la rotation des contraintes principales. Cependant **HIGHT** et **Al** ont démontré, à l'aide d'une analyse linéaire élastique par éléments finis, que le frettage aux extrémités a seulement un effet local sur la distribution des contraintes σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$ et σ_{zz} , ceci pour de nombreuses combinaisons de chargement (14). Ils ont opté pour un élanement égal à 2 afin de limiter de façon appréciable les effets de bord.

Bien que l'élanement ne doive pas influencer sur les résistances en torsion pure où le flambement n'existe pas, **DURAND** a remarqué que pour un élanement inférieur à 1,5, la rupture était gênée par les encastresments, et la valeur du couple à la rupture variait. Pour un élanement supérieur, cette valeur devient constante. Une valeur optimale de l'élanement se situe, à son avis, au voisinage de 2 à 2,5, surtout dans le cas de fortes contraintes axiales.

Sur la base de ces études, les dimensions que nous avons retenues pour l'échantillon, dans le cadre de l'appareillage de torsion-compression avec confinements intérieur et extérieur, sont les suivantes :

- diamètre extérieur : 70 mm
- diamètre intérieur : 35 mm
- élanement : 2,35

Ce choix d'un rapport Ri/Re égal à 0,5 nous place dans l'étude d'un cylindre à paroi épaisse, ce qui entraîne, par la suite, la prise en compte de la non-uniformité du champ de contraintes à travers la paroi dans l'interprétation des résultats expérimentaux. Cependant, ces dimensions permettent d'éviter les difficultés techniques du carottage d'un cylindre à paroi très mince et de son surfaçage. Le choix des dimensions de diamètre tient également compte de la volonté d'effectuer les essais en conditions drainées ou non drainées, qui doit être compatible avec le mode

d'accrochage de l'échantillon à ses extrémités.

La valeur de l'élanement, rapport de la hauteur totale de l'échantillon sur le diamètre extérieur, permet de s'affranchir des perturbations du champ de contraintes dues au frettage latéral à chaque extrémité.

II 3 - L'APPAREILLAGE DE TORSION-COMPRESSION

II 3 1 - Principe de l'appareillage

Les échantillons sont soumis à quatre efforts, qui sont totalement découplés et appliqués hydrauliquement de manière quasi-statique (photos II-1 et II-2) :

- une pression de confinement intérieure P_i ,
- une pression de confinement extérieure P_e ,
- un effort axial F ,
- un moment de torsion M .

La gamme d'efforts maximum applicable à l'échantillon a été choisie en fonction, d'une part des dimensions de l'éprouvette tubulaire et d'autre part, des principales caractéristiques à la rupture sous différentes sollicitations de matériaux fragiles homogènes (22). Cette gamme d'efforts, qui permet de couvrir la plupart des applications à petite et moyenne profondeur en mécanique des roches, est la suivante :

- 45 ou 64 MPa pour P_i
- 45 ou 64 MPa pour P_e
- 2 800 m.N en couple
- 300 kN en compression, ce qui correspond à une contrainte axiale maximale de 100 MPa.

La figure II-6 présente le principe de fonctionnement général de la presse de torsion-compression.

Les échantillons testés sont placés à l'intérieur d'une cellule d'essais, dimensionnée pour des pressions de confinement maximales de 70 MPa. Cette cellule est disposée sur un plateau monté sur doubles butées à billes, ce qui permet simultanément et indépendamment la transmission d'un effort axial et d'un effort de torsion.

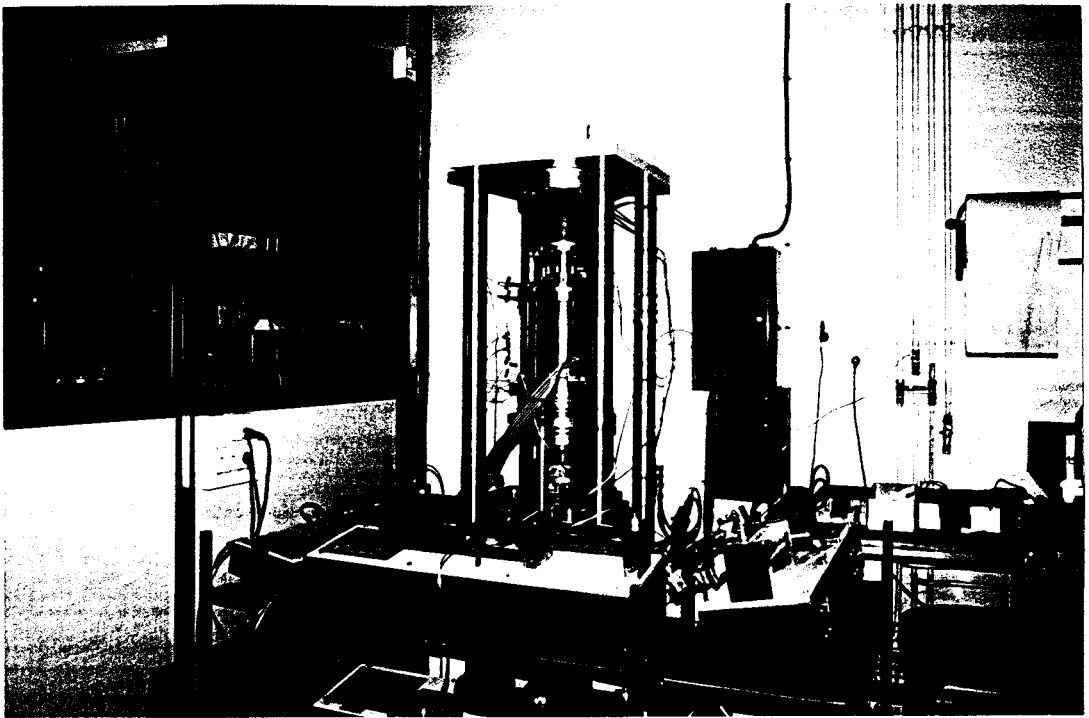


PHOTO II - 1 : PRESSE DE TORSION-COMPRESSION

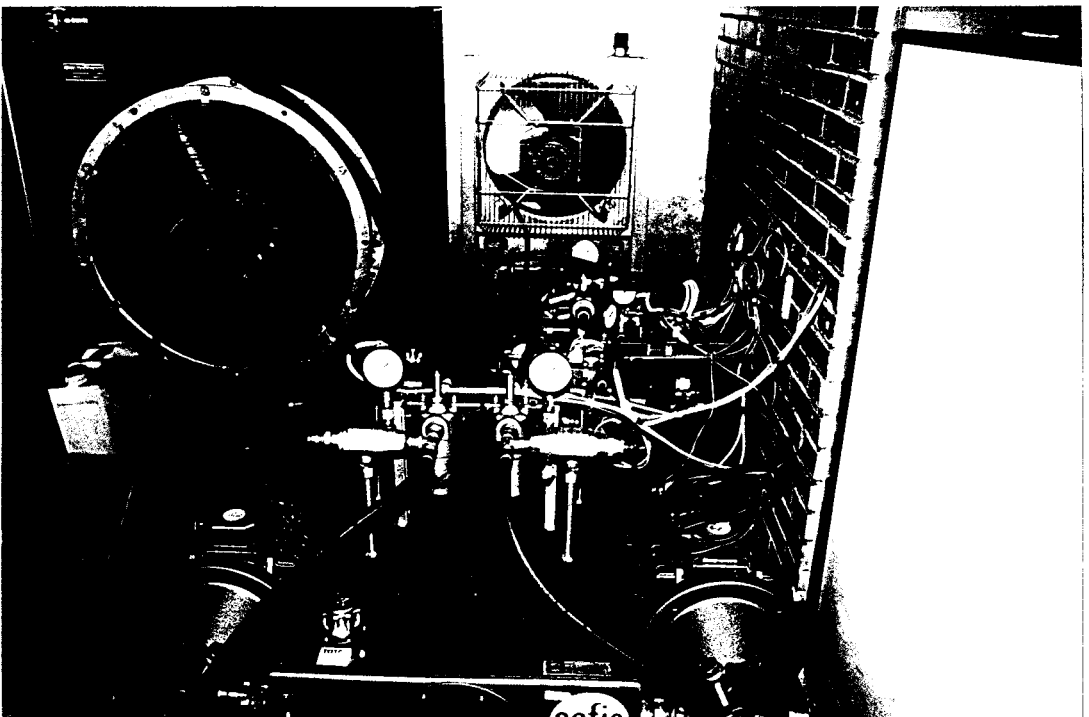


PHOTO II - 2 : GROUPES HYDRAULIQUES DE 25 et 45 MPa

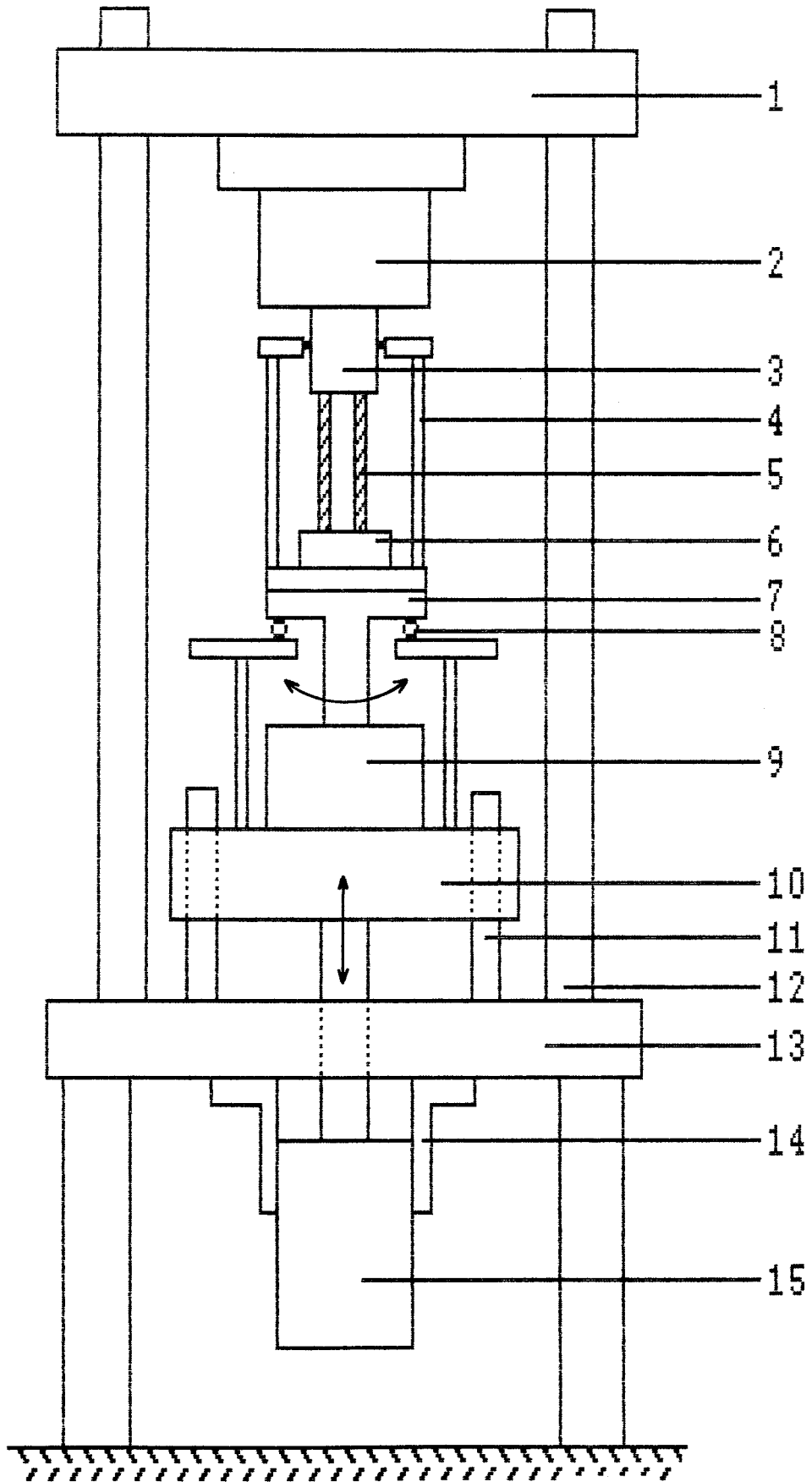


FIGURE II - 6 : Principe de la presse de torsion-compression

Légende de la figure II-6

1. Plaque supérieure
2. Capteur de force et de couple
3. Piston
4. Cellule
5. Echantillon
6. Enclume
7. Plateau mobile
8. Butée à billes
9. Vérin rotatif
10. Traverse
11. Dispositif de guidage axial et de blocage en rotation de la travers
12. Colonne
13. Plaque inférieure
14. Brides de fixation du vérin linéaire
15. Vérin linéaire

Le plateau mobile support de cellule est relié directement à un vérin rotatif pouvant appliquer le couple dans les deux sens de rotation. L'ensemble cellule, plateau, vérin rotatif est solidaire d'une traverse rigide qui se déplace axialement à l'aide d'un vérin linéaire double effet. Cette traverse est bloquée en rotation et guidée uniquement en translation à l'aide de six douilles à billes sans jeu qui coulissent le long d'arbres montés en partie basse du bâti de la presse.

La course du vérin linéaire qui permet d'appliquer l'effort axial est de 100 mm. L'angle de rotation maximum est de 280 degrés.

En partie supérieure du bâti est fixé un capteur de force et de couple, qui assure une réaction aux efforts exercés par les vérins sur la partie inférieure de l'échantillon.

Les parties supérieure et inférieure de la presse sont enfin liaisonnées à l'aide de quatre colonnes encastrées aux extrémités.

II 3 2 - La cellule d'essai

La cellule d'essai est composée principalement d'une embase, d'une enveloppe, d'un chapeau, de l'ensemble piston-échantillon-enclume, d'un dispositif de blocage axial fixé sur le chapeau et des tirants. Le dispositif de blocage est utilisé lors de la saturation de l'échantillon.

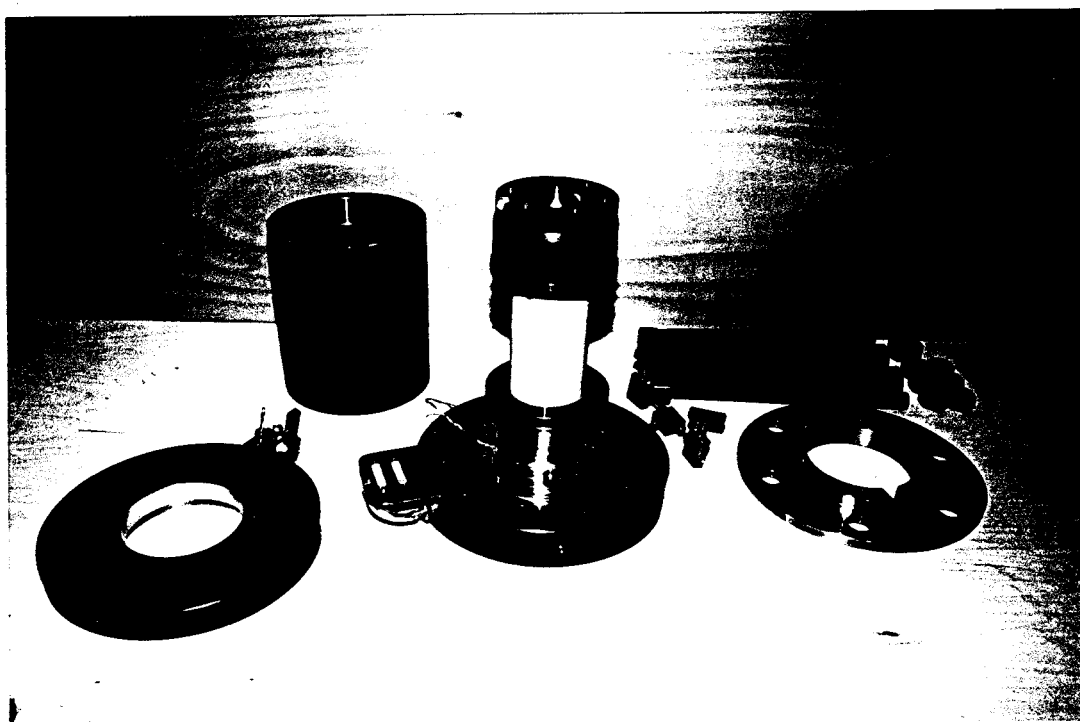
L'échantillon est centré entre le piston et l'enclume, lequel transmet les efforts en partie basse de l'éprouvette (photos II-3, II-4, II-5).

Lors de l'essai, le piston est liaisonné au capteur de force et de couple (photo II-6). De plus, le piston est réalisé dans un bronze haute performance, ce qui limite fortement les frottements parasites lors des mouvements de translation et de rotation.

L'étanchéité de la cellule est réalisée à l'aide de joints toriques et d'un joint à lèvres.



PHOTO II - 3 : CELLULE D'ESSAI ECLATEE



**PHOTO II - 4 : CELLULE D'ESSAI : Positionnement de l'ensemble
enclume-échantillon-piston sur l'embase**



PHOTO II - 5 : CELLULE D'ESSAI ASSEMBLEE

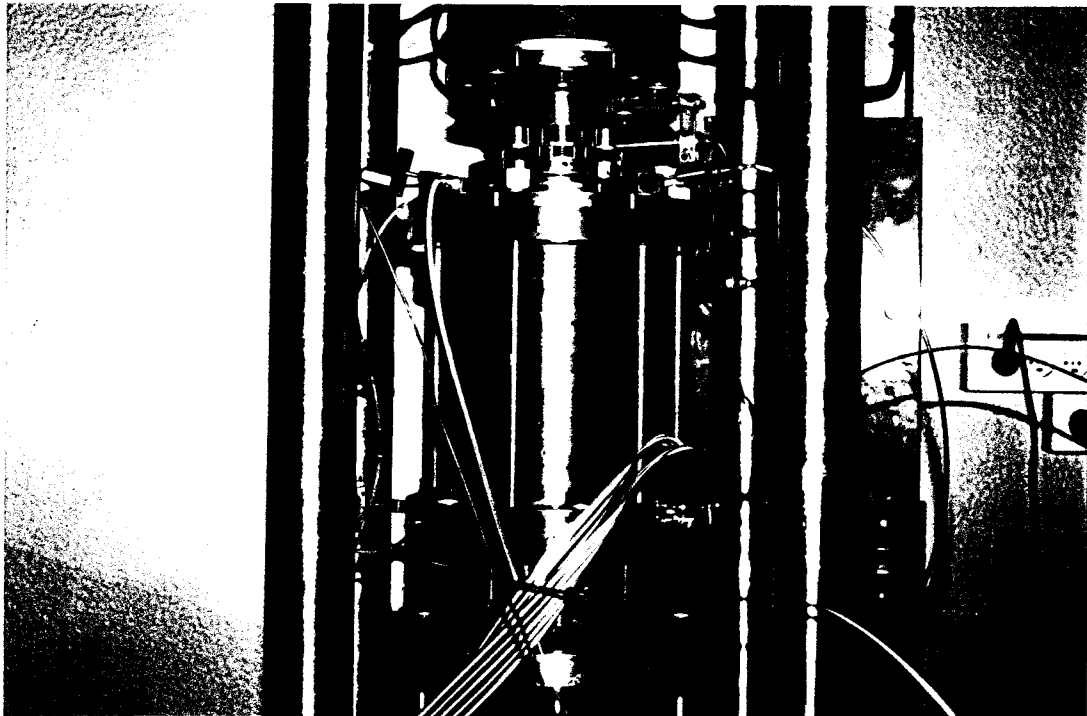


PHOTO II - 6 : CELLULE MONTÉE SUR LE BÂTI DE LA PRESSE
AVEC RACCORDEMENTS HYDRAULIQUES ET EXTENSOMETRIQUES

II 3 2 1 - Protection de l'échantillon.

Les éprouvettes tubulaires sont protégées du fluide de confinement par deux membranes intérieure et extérieure. Ces membranes sont réalisées à partir d'une résine époxy en silastène admettant de grandes déformations. Elles sont moulées et confectionnées sous vide à l'aide de moules en plusieurs parties qui permettent un démoulage facile des membranes après polymérisation de la résine (photo II-7).

Il a été nécessaire de réaliser la membrane extérieure plus courte que l'éprouvette, de façon à dégager, à chaque extrémité, un espace où la colle vienne au contact direct des surfaces latérales de l'échantillon.

Les membranes sont fixées sur le piston et l'enclume et l'étanchéité est réalisée par pincement à l'aide de flasques et par serrage conique.

II 3 2 2 - Encastrement de l'échantillon

L'essai de torsion, comme l'essai de traction directe, exige une fixation des extrémités de l'éprouvette afin de transmettre l'effort recherché et appliqué.

La colle utilisée est une résine très fluide, du type Araldite, dont la prise, à température ambiante du laboratoire, nécessite environ douze à quatorze heures.

La colle est en contact direct des surfaces latérales de l'échantillon sur une hauteur de 12,5 mm à chaque extrémité ; ceci permet d'obtenir un encastrement parfait de l'échantillon sur l'enclume et le piston. Il en résulte une hauteur utile hors encastrement égale à 140 mm, ce qui correspond à un élancement de 2.

La profondeur de pénétration de la résine à travers la paroi est voisine de 1 à 2 mm, suivant la porosité du matériau testé. La photo II-8 représente la pénétration de la colle dans une éprouvette tubulaire de craie de porosité voisine de 40 %.

Cette pénétration de la colle dans l'échantillon permet cependant un drainage correct du matériau, compte-tenu de l'épaisseur de la paroi.

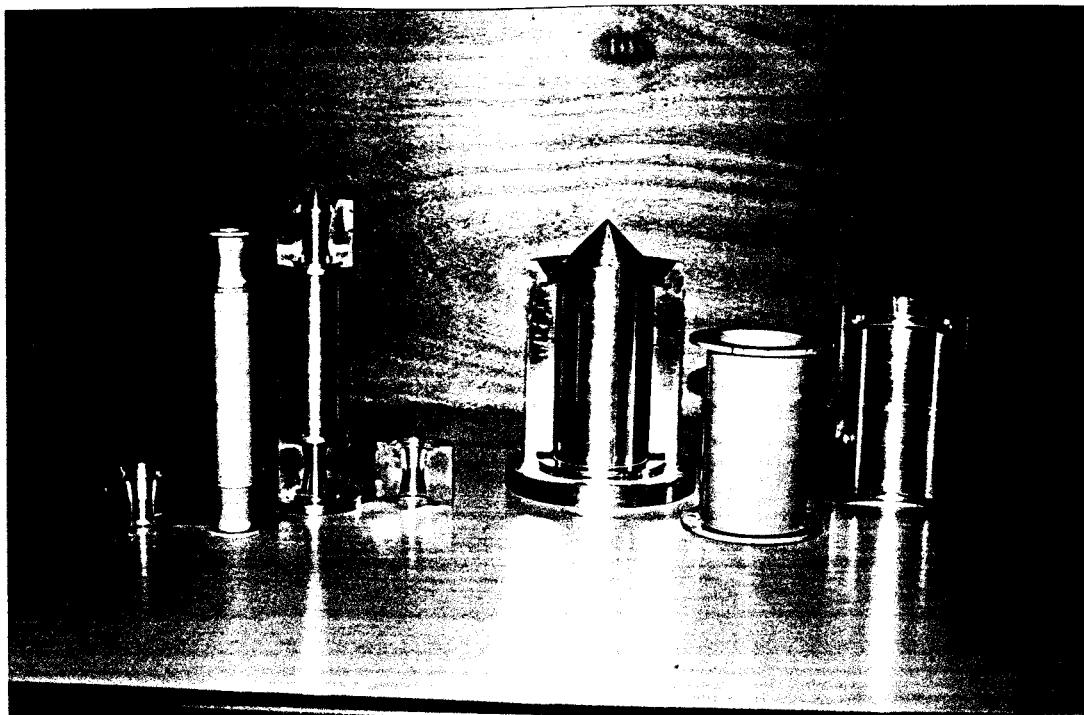


PHOTO II - 7 : MEMBRANES D'ETANCHEITE INTERIEURE ET EXTERIEURE
ET LES MOULES DE CONFECTION

BU
LLE

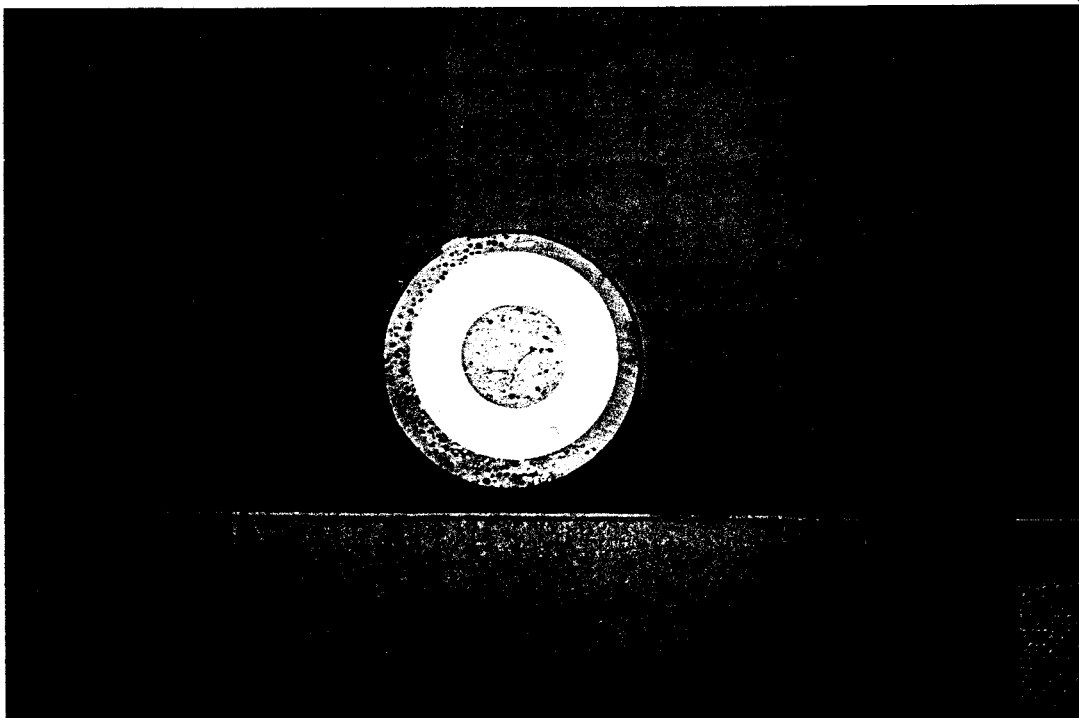


PHOTO II - 8 : PENETRATION LATERALE DE LA COLLE
DANS UNE EPROUVETTE TUBULAIRE DE CRAIE

Les caractéristiques mécaniques de la résine, obtenues par mesures ultrasoniques sont les suivantes :

Module d'Young compris entre 5 400 et 5 600 MPa,
Coefficient de Poisson égal à 0,33,
Masse volumique égale à 1,17 g/cm³

La détermination de ces caractéristiques de la colle par mesures ultrasoniques s'explique par le fait qu'il est impossible de réaliser des éprouvettes de taille suffisante en résine pure. En effet, une intense réaction de polymérisation exothermique, fonction de la quantité de résine, a lieu peu après le coulage et entraîne une formation importante de bulles.

II 3 3 - Pilotage et asservissement de l'appareillage

Les expérimentations sont réalisées par un pilotage en force ou en déplacement. Trois groupes hydrauliques équipent la machine. Le premier, qui peut délivrer une pression de 25 MPa, assure le fonctionnement des deux vérins. Les deux autres, pouvant délivrer 45 MPa, permettent l'application des pressions de confinement. Chaque effort désiré est obtenu par l'envoi d'une tension de consigne continue. Celle-ci est régulée par carte électronique, puis est transmise à une électro-vanne. Cet asservissement, réalisé en commande proportionnelle, permet une précision d'environ 0,05 MPa sur la pression.

Toutes les pressions sont régulées en boucle fermée, à l'aide de capteurs de pressions installés sur chaque voie hydraulique. Les capteurs renvoient une réponse analogique à la carte électronique qui ajuste automatiquement la réponse hydraulique en fonction de la consigne. Il est ainsi possible d'obtenir une stabilité parfaite de l'effort souhaité.

L'équipement électronique de l'appareillage est le suivant :
(Photos II-9 et II-10)

- deux centrales d'acquisition et de pilotage qui permettent par programmation l'application des efforts et l'acquisition des mesures expérimentales au cours de l'essai, ceci par entrées et sorties analogiques,

- un disque dur de 200 méga-octets, trois imprimantes,

- des capteurs de pression, de différentes capacités nominales,

- des capteurs de déplacement inductifs qui permettent la mesure des déplacements axiaux et tangentiels de l'enclume et donc globaux de l'échantillon,

- un appareil de mesure de variations de volume de type GDS dont la résolution est de 1 mm³ en volume et 1kPa en pression,

- un capteur de mesure de pression interstitielle, d'une capacité de 50 MPa et de résolution 0,03 MPa,

- un capteur de force et de couple à jauges, de capacités nominales respectives de 330 kN et 3000 mN, qui a permis d'effectuer le réglage de la machine et de prendre en compte les dissipations mécaniques, hydrauliques.... La résolution de ce capteur est de 3 daN en force et 1mN en couple,

- une centrale d'acquisition permettant la lecture directe de jauges de déformation. En effet, l'utilisation de jauges permet une mesure locale des déformations de l'échantillon, tout au moins dans le domaine pré-rupture, alors que les capteurs inductifs placés à l'extérieur de la cellule englobent les effets d'encastrement aux extrémités. Ces jauges collées à mi-hauteur du cylindre sur la surface latérale extérieure et sur deux génératrices diamétralement opposées, sont protégées du fluide de confinement par la membrane extérieure.

De plus, les capteurs de déplacement inductifs sont fixés sur le capteur de force et de couple, de façon à compenser les déformations de celui-ci et du bâti. La figure II-7 représente le schéma de pilotage et d'asservissement de la machine. Il faut également indiquer que les deux groupes hydrauliques de 45 MPa peuvent être désormais remplacés par deux pompes hydrauliques GDS ayant chacune 64 MPa de puissance, et dont la résolution est de 1 mm³ en volume et 16 kPa en pression. Ces pompes sont programmables en rampe ou en cyclage directement à partir des centrales.

Enfin, le pilotage en force ou en déplacement est réalisé à l'aide du capteur de force et de couple, des capteurs de pression et des capteurs inductifs (au total 28 capteurs), grâce à un contrôle permanent de leurs variations effectué par les centrales d'acquisition et de pilotage. Ceci permet la régulation des pressions hydrauliques alimentant les vérins.



PHOTO II - 9 : CENTRALES DE PILOTAGES ET D'ACQUISITION

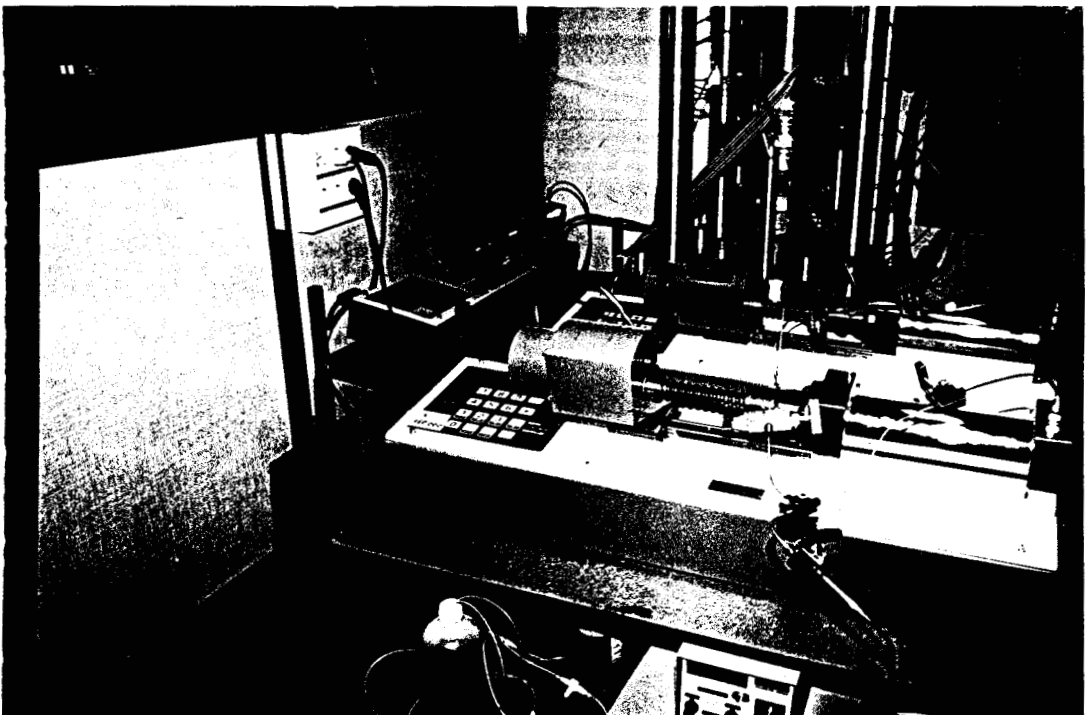


PHOTO II - 10 : - POMPES HYDRAULIQUES (64 MPa)
- APPAREIL POUR MESURE DE VARIATIONS VOLUMIQUES
- CENTRALE D'EXTENSOMETRIE

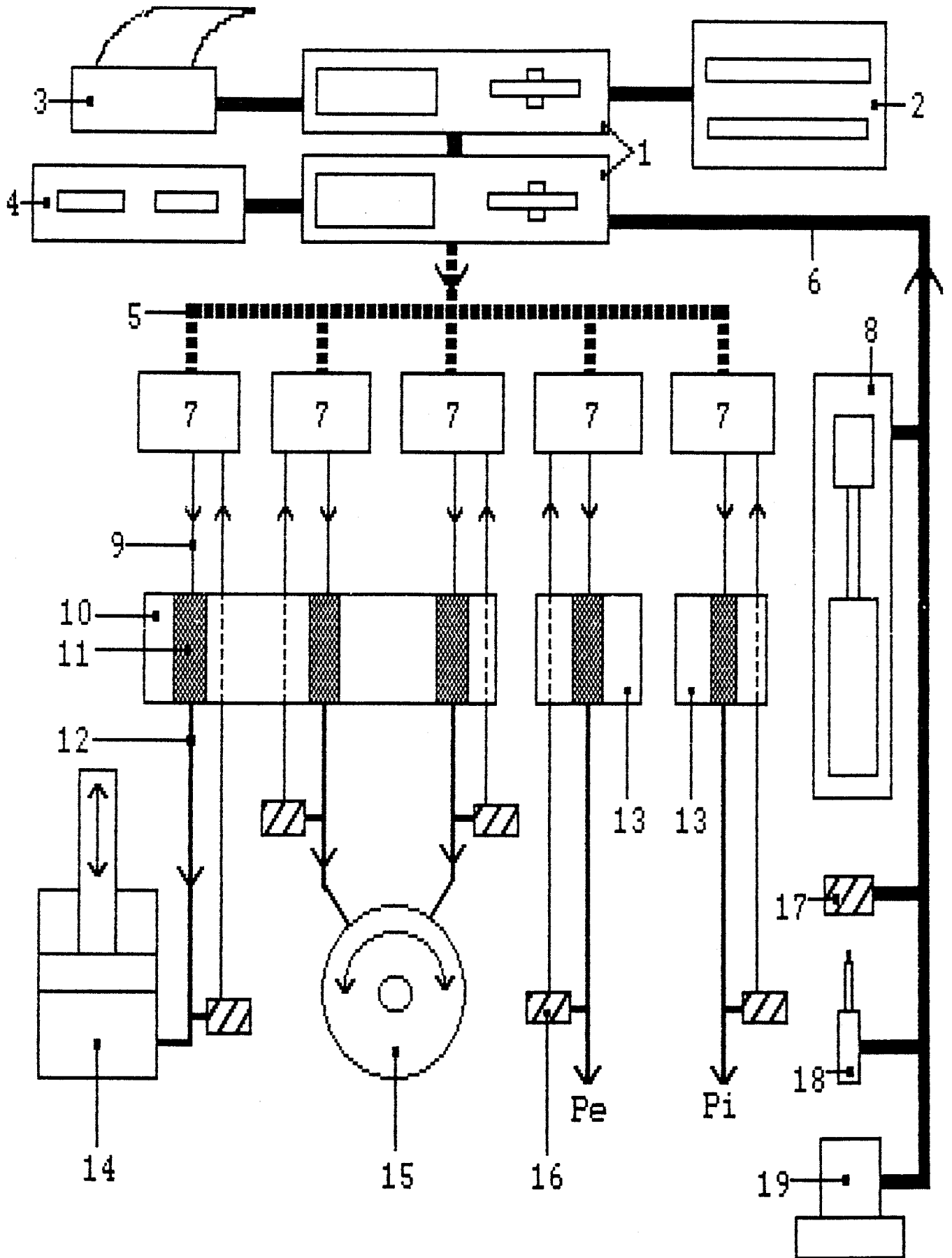


FIGURE II - 7 : Pilotage et asservissement de l'appareillage

Légende de la figure II-7

1. Centrales de pilotage et d'acquisition
2. Centrale d'acquisition par extensométrie
3. Imprimantes
4. Disque dur
5. Circuit de contrôle et de consigne analogique
6. Circuit d'acquisition des mesures
7. Carte de régulation électronique
8. Appareil de mesure de variations de volume ou pompes hydrauliques 64 MPa
9. Circuit électronique de pilotage des groupes hydrauliques
10. Groupe hydraulique 25 MPa
11. Electrovanne à commande proportionnelle
12. Circuit hydraulique
13. Groupes hydrauliques 45 MPa
14. Vérin linéaire
15. Vérin rotatif
- 16.17. Capteurs de pression
18. Capteurs de déplacement inductifs
19. Capteur de force et de couple

II 4 PREPARATION DE L'ESSAI

Réaliser un essai de torsion-compression sur cylindre creux est une opération très longue, qui nécessite une préparation délicate, principalement lors de la confection des éprouvettes, du collage et de l'assemblage de la cellule.

II 4 1 - Préparation des éprouvettes.

Un soin particulier est porté à la réalisation des échantillons. Les blocs de roches sont débités en éprouvettes tubulaires à l'aide d'un double carottier d'une longueur utile de 190 mm. L'utilisation d'un double carottier permet en effet d'obtenir un échantillon intact et une très bonne coaxialité des surfaces latérales intérieure et extérieure. (Photo II-11).

La mise à longueur de l'éprouvette est effectuée tout d'abord par tronçonnage, puis par surfaçage des deux extrémités sur une rectifieuse à meule diamantée précise au centième de millimètre. Au cours du surfaçage, l'échantillon est bloqué dans un étau en V prenant appui sur la quasi-totalité de la surface latérale extérieure. Les bases sont rectifiées l'une après l'autre par retournement de l'ensemble échantillon-étau. Ceci permet d'obtenir un parallélisme parfait des bases et leur perpendicularité par rapport aux génératrices (Photo II-12).

Enfin, un perçage de diamètre 3 mm à travers la paroi est effectué à l'aide d'un forêt diamanté à chaque extrémité du cylindre. Ce perçage, qui sera noyé dans la colle, permet le passage de celle-ci de l'extérieur du cylindre vers l'intérieur lors de la fixation sur l'enclume et le piston (Photo II-13).

II 4 2 - Collage de l'éprouvette

Cette opération est la plus difficile à réaliser, car elle nécessite l'assemblage préalable de tous les éléments en contact direct avec l'éprouvette, qui à ce stade est sèche. Il est impératif d'effectuer correctement les points suivants :

- positionnement des jauges sur l'échantillon avec passage de fils de cuivre verni à travers un perçage réalisé dans l'enclume,

- mise en place de l'échantillon sur l'enclume et le piston, membranes d'étanchéité positionnées, cônes et flasques d'étanchéité présentés.

Un dispositif de centrage en demi-coquilles permet ensuite de réaliser une parfaite coaxialité entre les trois éléments piston-échantillon-enclume.

Bien que le cylindre soit positionné au montage dans des pré-centrages usinés dans les deux pièces métalliques, il ne faut pas négliger le fait que les dimensions qui ont été indiquées pour les diamètres de l'échantillon ne sont pas fixes pour la durée d'utilisation du carottier. L'usure progressive des couronnes diamantées entraîne une modification légère des diamètres des échantillons.

L'étape suivante est le collage proprement dit de l'éprouvette. Sa durée est de deux jours, compte-tenu du temps de prise de la colle. Il reste enfin à serrer définitivement les dispositifs d'étanchéité des membranes (Photo II-14).

II 4 3 - Saturation de l'échantillon.

Après l'assemblage de la cellule et le raccordement des différents réseaux hydrauliques et extensométriques, il est nécessaire de réaliser la saturation de l'échantillon. En effet, celui-ci est collé à l'état sec afin d'obtenir un meilleur accrochage de la colle sur le matériau testé.

La méthode de saturation utilisée consiste en l'injection, en partie inférieure du cylindre creux, de liquide à une pression voisine de 0,1 MPa. La partie supérieure est, quant à elle, reliée à une pompe à vide qui permet, pendant les premières heures de saturation, un parfait dégazage de l'échantillon et une meilleure percolation du liquide.

De plus, afin d'éviter le passage des liquides entre l'échantillon et les membranes, le liquide de confinement intérieur et extérieur est maintenu à une pression légèrement supérieure à celle d'injection.

Cette méthode d'injection sous vide, qui peut durer 4 à 5 jours, permet d'obtenir un état de saturation très voisin (inférieur à 1 %) de l'état de saturation totale.

Il est cependant nécessaire, durant la phase de saturation, de bloquer axialement le piston. En effet, pour des raisons technologiques dues principalement au collage et à l'étanchéité, le diamètre extérieur du piston est nettement supérieur à celui de l'échantillon. Il en résulte, lors d'une mise en pression du liquide de confinement, un effort de poussée sur le piston qui tend à sortir celui-ci hors de la cellule. Ceci crée inévitablement une contrainte de traction axiale dans l'échantillon. Cette contrainte axiale se superpose, d'ailleurs, à celle induite par les efforts de compression latéraux, en cours d'essai.

Après purge complète des circuits de drainage, les mesures de variations de volume ou de pression interstitielle au cours de l'essai sont réalisées en connectant les canaux inférieur et supérieur à l'appareil de mesure adapté.

A travers cette description sommaire de la préparation de l'essai, il faut constater que l'ensemble de ces opérations nécessite une dizaine de jours avant réalisation de l'essai proprement dit. De ce fait, trois jeux de piston et d'enclume ont été fabriqués afin de réaliser "plus rapidement" les expérimentations.

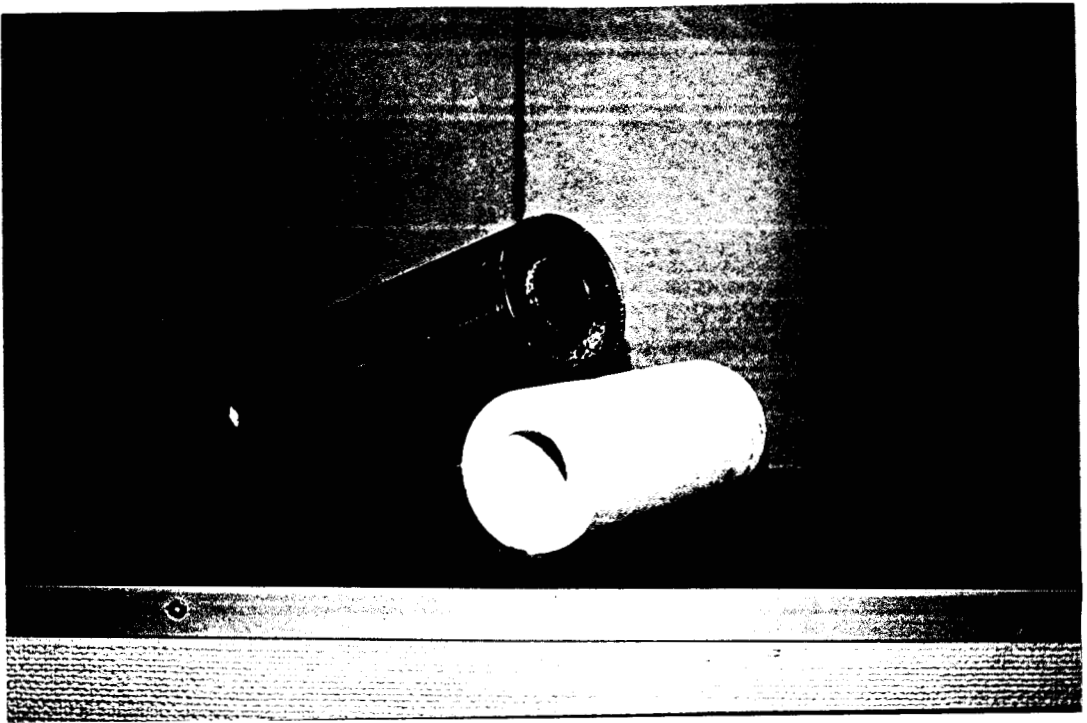


PHOTO II - 11 : DOUBLE CAROTTIER ET EPROUVETTE TUBULAIRE
DE 70/35 mm DE DIAMETRE

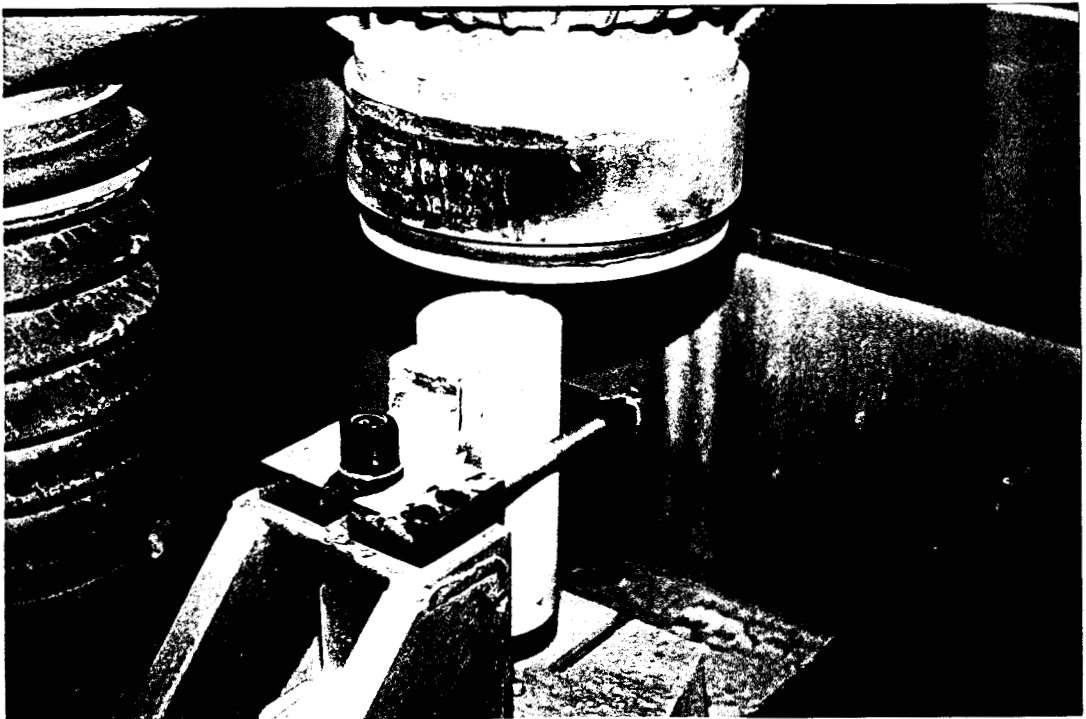


PHOTO II - 12 : RECTIFICATION DES EXTREMITES
DE L'EPROUVETTE TUBULAIRE

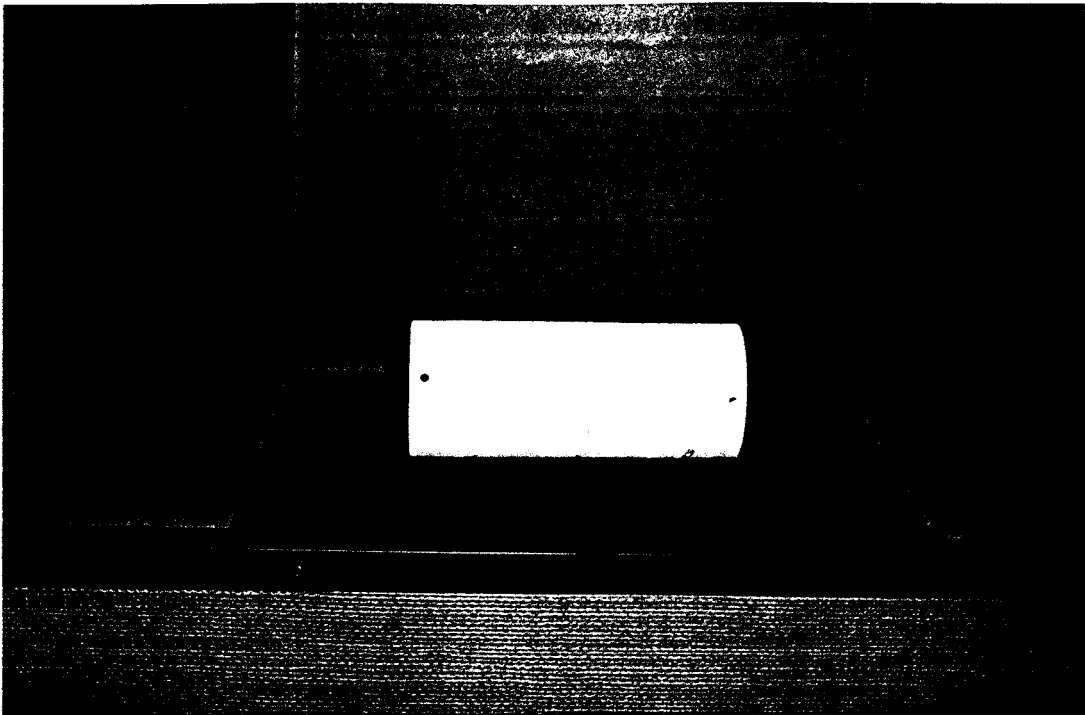


PHOTO II - 13 : PERCAGES A TRAVERS LA PAROI DU CYLINDRE

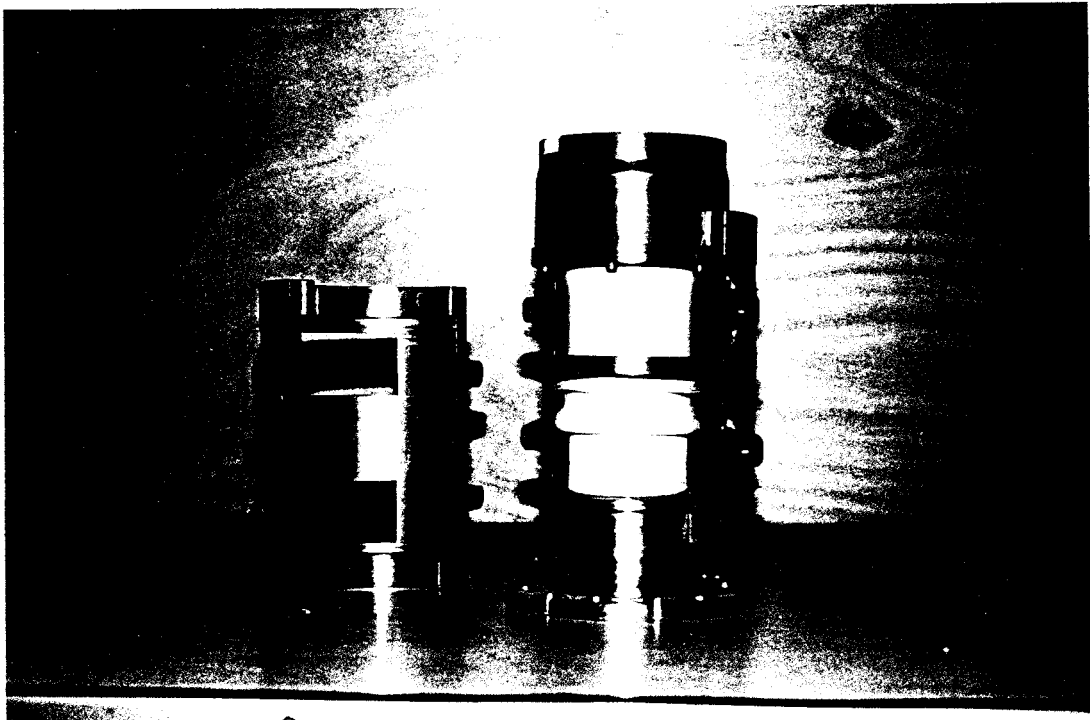


PHOTO II - 14 : COLLAGE DE L'ECHANTILLON AVEC DISPOSITIF DE CENTRAGE

II 5 CHEMINS DE CONTRAINTES ET ALGORITHMES DE PILOTAGE ET D'ACQUISITION

L'intérêt de cet appareillage de torsion-compression sur cylindre creux réside dans l'indépendance et les nombreuses combinaisons possibles des quatre efforts appliqués à l'échantillon. Ceci permet de réaliser de très nombreux chemins de contraintes, accompagnés ou non de la rotation de la direction de deux contraintes principales.

Les premiers algorithmes développés sur cet appareillage, par l'intermédiaire des centrales d'acquisition et de pilotage, permettent de soumettre l'échantillon à différents types de compression : hydrostatique, biaxiale, triaxiale, avant l'application de l'effort de torsion.

II 5 1 - Chemins de contraintes appliqués à l'échantillon

Les états de contraintes finaux, que nous avons définis, avant application du couple, font intervenir les sollicitations P_e , P_i , et F de la façon suivante :

- 1 : $P_e = P_i = \sigma_{zz}$
- 2 : $P_e = P_i < \sigma_{zz}$
- 3 : $P_e < P_i = \sigma_{zz}$
- 4 : $P_e < P_i < \sigma_{zz}$
- 5 : $P_e < \sigma_{zz} < P_i$

σ_{zz} représente ici la contrainte axiale de compression.

Le premier état de contrainte correspond à une compression hydrostatique, les contraintes radiale, tangentielle et axiale étant identiques à chaque instant et en chaque point de l'échantillon.

Le deuxième état permet d'obtenir une compression biaxiale, les contraintes principales radiale et tangentielle étant égales et inférieures à la contrainte axiale.

Enfin, les autres états représentent une compression véritablement triaxiale de l'échantillon, qui est due à la non-égalité des pressions de confinement latérale intérieure et extérieure, elles-même différentes de l'intensité de compression axiale.

Les chemins de contraintes 2 à 5 passent tous par celui de compression hydrostatique qui nécessite l'application simultanée des trois efforts. Les états de contraintes finaux sont obtenus ensuite, en fonction du type d'essai choisi, par l'augmentation soit simultanée de deux sollicitations, soit d'une seule d'entre-elles.

Ce choix d'états de contraintes finaux avant application du couple indique que, dans chaque cas, la pression de confinement extérieure constitue la sollicitation d'intensité minimale. Il faut en effet tenir compte de la surface d'application de cette pression sur le piston de la cellule, qui induit une contrainte de traction non négligeable au sein de l'échantillon.

II 5 2 - Algorithmes de pilotage et d'acquisition

La figure II-8 représente l'organigramme général du programme de pilotage et d'acquisition, développé sur les centrales, et qui permet automatiquement l'obtention de l'un des cinq états de contraintes définis précédemment.

Cet organigramme présente différentes procédures dont les fonctions sont les suivantes :

- la procédure d'initialisation, réalisée avant l'essai, permet d'introduire dans le programme toutes les données expérimentales. Elle effectue les initialisations des jauges et des divers appareils de mesure et d'acquisition, permet de définir l'état de contraintes final avant application du couple et de choisir entre un essai drainé ou non drainé.

- le contact constitue la première phase de l'essai. Il consiste à accoupler le piston en bronze de la cellule avec le capteur de force et de couple. Cette opération délicate entraîne une contrainte de compression axiale dans l'échantillon voisine de 0,1 à 0,15 MPa.

Il est possible à ce stade d'effectuer directement un essai de torsion pure.

- la procédure d'équilibrage consiste à égaler par petits incréments les pressions de confinement intérieure et extérieure avec la contrainte de compression axiale de contact. Ceci permet d'obtenir un très faible état de contrainte hydrostatique sur l'échantillon.

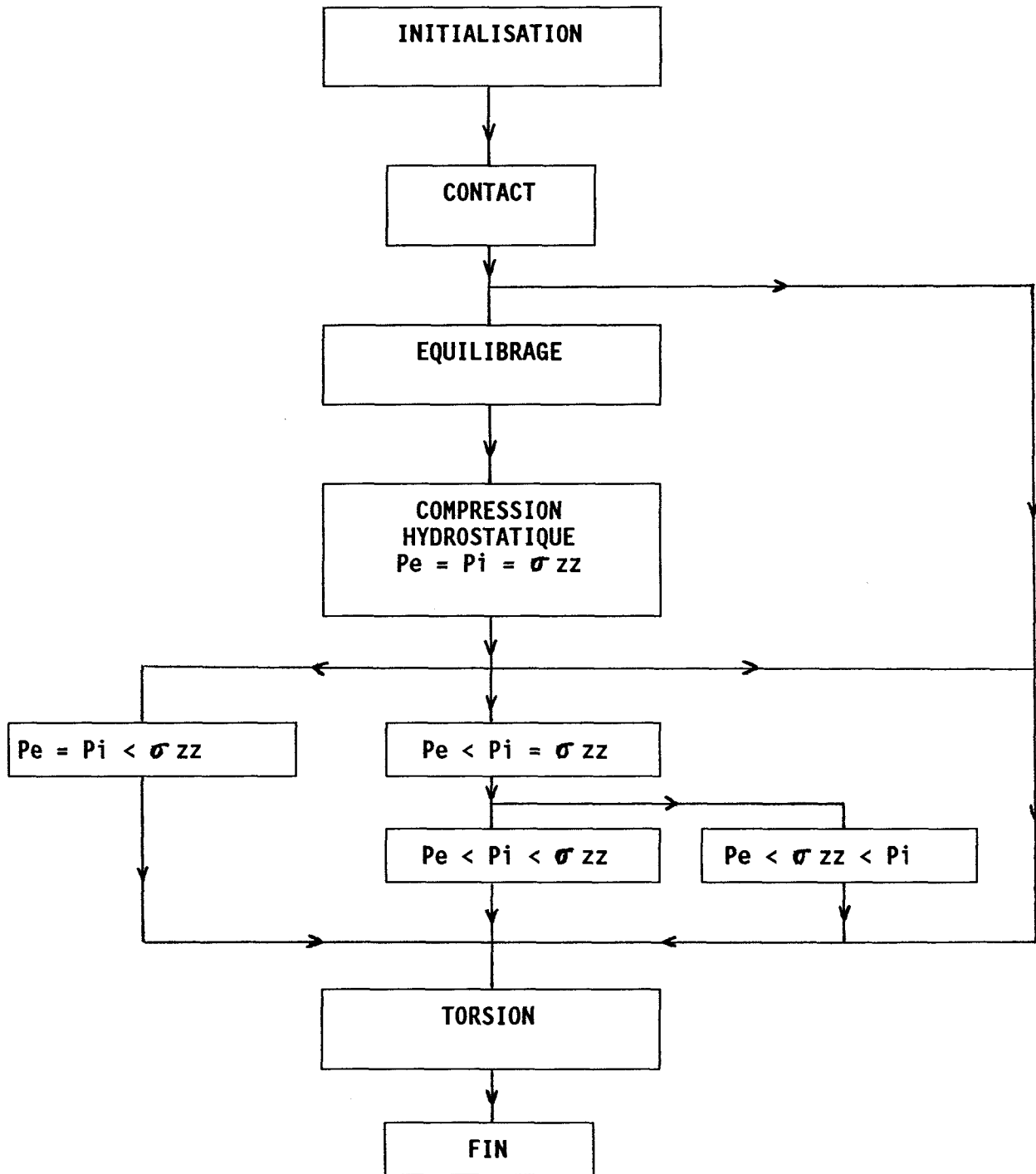


FIGURE II - 8 : ORGANIGRAMME GENERAL DU PROGRAMME DE TORSION-COMPRESSION

Application d'un état de contraintes hydrostatique, biaxial ou triaxial avant torsion.

- la compression hydrostatique se déroule ensuite de façon itérative jusqu'à l'obtention de l'effort souhaité. Chaque itération se décompose globalement en deux étapes. La première permet d'augmenter de façon identique les pressions de confinement P_e et P_i , puis d'attendre la stabilisation complète des pressions dans la cellule et de la force globale mesurée par le capteur de force et de couple. Cet accroissement de la force globale résulte de l'ensemble effort de poussée sur le piston - contrainte de traction dans l'échantillon induit par les pressions. Dans la seconde étape a lieu l'augmentation de l'effort axial, afin d'une part de compenser les efforts induits par l'incrément de pressions de confinement, et d'autre part d'appliquer une contrainte de compression pure égale à la valeur du confinement. Cette contrainte de compression axiale est déterminée en considérant la section de l'échantillon constante pendant la phase hydrostatique.

Ces augmentations incrémentales des pressions et de la contrainte axiale nécessitent un pilotage en force très précis où tous les paramètres sont enregistrés et exploités de façon permanente au niveau des deux centrales.

- les procédures suivantes, qui consistent en l'augmentation d'une ou de deux sollicitations, se déroulent de façon identique à la procédure de compression hydrostatique.

- la dernière étape est l'application de l'effort de torsion à l'échantillon. L'augmentation du couple est également réalisée par incréments de 1 m.N environ. A chaque étape, toutes les données expérimentales sont enregistrées sur fichier. Cependant, il est possible à chaque instant et de manière automatique de réaliser une phase de relaxation ou de fluage sur l'échantillon, avec un suivi graphique instantané qui permet de contrôler la stabilisation de l'effort ou de la déformation. L'étape de relaxation ou de fluage peut être suivie ou non d'une phase de décharge, avant réincrémentation de l'effort de torsion.

Les vitesses de mise en sollicitation de l'échantillon sont de l'ordre de 3,5 MPa/heure en compression et de 2 m.N/minute en torsion.

Enfin, à chaque augmentation incrémentale des pressions de confinement, de la contrainte axiale ou du moment de torsion, s'effectue, après stabilisation, une acquisition automatique des mesures expérimentales. Sur un fichier, sont stockées les mesures des jauges, du capteur de force et de couple, des capteurs de déplacement, les variations

de volume ou la pression interstitielle, et les valeurs des pressions de confinement.

CHAPITRE III

**COMPARAISON DE TECHNIQUES DE
MESURE EXPERIMENTALES DES DEFORMATIONS
DE L'ECHANTILLON**

Pendant l'application de l'effort de torsion à un échantillon de roche, interviennent, au cours de l'essai, des facteurs qui sont liés, soit au montage expérimental, soit aux techniques de mesure et d'acquisition. On peut citer, de façon non exhaustive, les frottements éventuels engendrés par le joint au niveau du piston, la tenue de la colle lors de l'application de l'effort de torsion, la validité des mesures de déplacement par capteurs inductifs extérieurs à la cellule, ou la représentativité des mesures de variation de volume par contrôleur GDS.

Lors du dépouillement des résultats expérimentaux, la détermination de la réponse réelle du matériau en torsion nécessite donc la prise en compte de l'influence éventuelle de ces facteurs.

Ce chapitre présente les essais réalisés sur un grès des Vosges, puis les résultats expérimentaux obtenus. Puis, des comparaisons et des remarques sont faites quant aux différentes techniques de mesure, d'acquisition et de dépouillement.

III 1 PRESENTATION DES ESSAIS

Les essais ont été réalisés sur des échantillons de grès des Vosges, qui constitue un matériau homogène, et dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- E voisin de 20 000 MPa,
- $\nu = 0,2$
- porosité ouverte $n = 17,5 \%$
- masse volumique apparente à l'état sec $\rho_{app} = 2,14 \text{ g/cm}^3$
- masse volumique absolue $\rho_{abs} = 2,60 \text{ g/cm}^3$

Deux essais de torsion sur le grès ont été réalisés sous confinement hydrostatique. Le premier consiste, avant l'application monotone de l'effort de torsion, en une compression hydrostatique de 2 MPa avec une contre-pression de saturation nulle. Le second correspond à une compression hydrostatique de 2,3 MPa avec une contre-pression de saturation de 0,3 MPa qui est appliquée lorsque le confinement hydrostatique atteint 0,8 MPa. Dans les deux cas, l'essai est réalisé en conditions drainées. La contre-pression de saturation est maintenue constante pendant la torsion par le contrôleur GDS qui, directement, indique la variation de volume globale (des vides) de l'échantillon.

Dans les deux cas, le confinement hydrostatique est suffisant pour assurer un placage correct des membranes d'étanchéité contre l'échantillon. Quant à l'essai réalisé avec une contre-pression de saturation de 0,3 MPa, il permet à priori de s'affranchir des problèmes de pression localement différentes, même faiblement, au sein de l'échantillon. Ces différences de pression sont en général dues à la présence de micro-bulles dans l'éprouvette qui, cependant, est saturée globalement de façon satisfaisante.

Le liquide de percolation utilisé dans les deux essais est de l'alcool méthylique.

La mesure des déformations de l'échantillon a été effectuée à l'aide de deux techniques. La première consiste en l'utilisation de capteurs de déplacements inductifs extérieurs à la cellule, et montés sur le capteur de force et de couple. Ces capteurs inductifs mesurent les déplacements globaux axiaux et tangentiels de l'embase de cellule.

Dans la deuxième technique de mesure, on utilise deux "rosettes" d'extensométrie collées dans le tiers central de l'échantillon. Ces deux "rosettes" sont positionnées sur deux génératrices diamétralement opposées. Cet ensemble de jauges indique, tout au long de la torsion, les déformations axiale, transversale et de distorsion de l'échantillon. La mesure de déformations par jauges du cylindre permet de faire abstraction des effets de bords dus aux encastremements... , alors que les capteurs inductifs ne permettent à priori qu'une mesure globale des déplacements subis par l'échantillon.

Tout au long de la phase de torsion réalisée par un pilotage en force, les pressions de confinement intérieure et extérieure ont été maintenues constantes par les contrôleurs GDS 64 MPa, de même que l'effort axial développé par le vérin linéaire. Enfin il a été effectué une acquisition permanente de la résultante axiale pendant la torsion, dont on peut déduire une contrainte axiale en supposant la section de l'échantillon constante tout au long de l'essai.

III 2 - RESULTATS EXPERIMENTAUX

III 2 1 Courbes couple-déformation angulaire spécifique

Les figures III-1 et III-2 représentent l'évolution du couple en fonction de la déformation angulaire qui est déterminée, soit directement à partir des mesures de déformation des jauges de distorsion ($w = 2.\epsilon\theta z/R_0$), soit à l'aide des mesures de déplacement des capteurs inductifs. Dans ce second cas, la hauteur d'échantillon prise en compte correspond à celle hors encastrement.

On constate pour chaque essai une bonne correspondance entre les résultats de déformation obtenus par jauges et par capteurs inductifs, qui, positionnés à l'extérieur de la cellule, indiquent correctement la réponse du matériau obtenue, tout au moins, dans la zone centrale de l'éprouvette. Ceci indique également que le collage de l'échantillon à ses extrémités remplit parfaitement son rôle d'encastrement. Il permet une parfaite transmission de l'effort de torsion sans subir de déformations.

La figure III-3 permet de comparer la réponse en torsion du grès pour chacun des deux essais, où le matériau est soumis à une compression hydrotatique effective de 2 MPa. On constate une bonne similitude de réponse du matériau, qui présente tout d'abord une petite phase de comportement élastique linéaire suivie d'une phase non linéaire d'ampleur plus importante que la première. La similitude de réponse du grès dans les deux essais indique également la fidélité expérimentale de l'appareillage.

III 2 2 - Courbes couple-déformation volumique

III 2 2 1 - Détermination de la déformation volumique par contrôleur GDS.

Les figures III-4 et III-5 représentent, pour chaque essai, l'évolution du couple en fonction de la déformation volumique de l'échantillon déterminée par contrôleur GDS. Le volume initial pris en compte dans la détermination de la déformation volumique correspond au volume d'échantillon situé hors encastrement. On constate des allures de courbe totalement différentes en fonction de la contre-pression de saturation. Lorsque celle-ci est nulle, le grès présente un comportement toujours contractant jusqu'à la rupture.

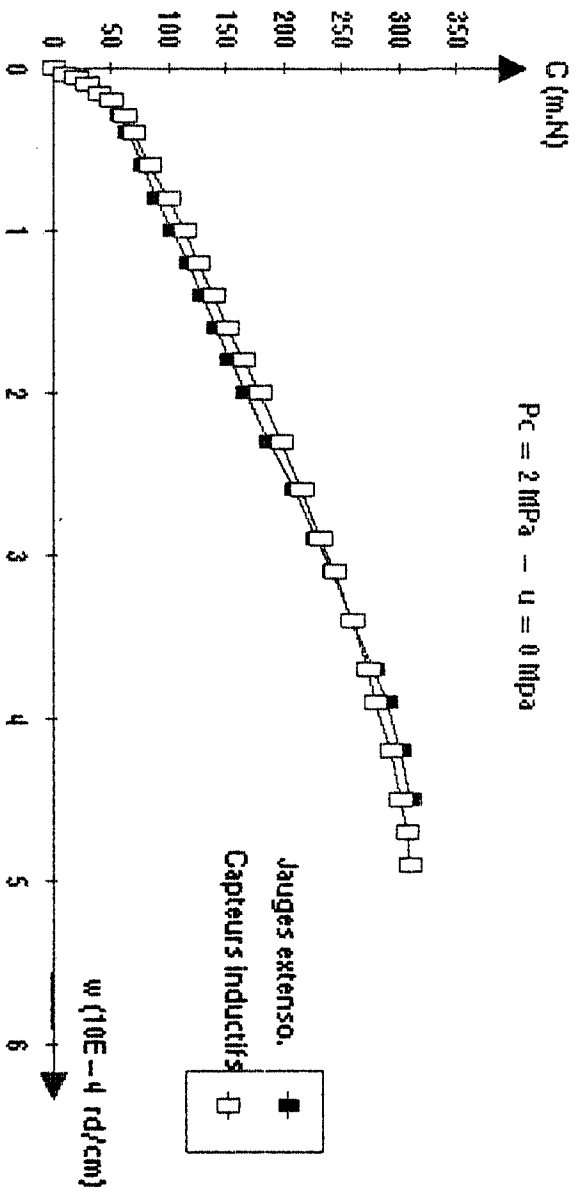


FIGURE I11 - 1 : Déformation angulaire en torsion du grès des Vosges

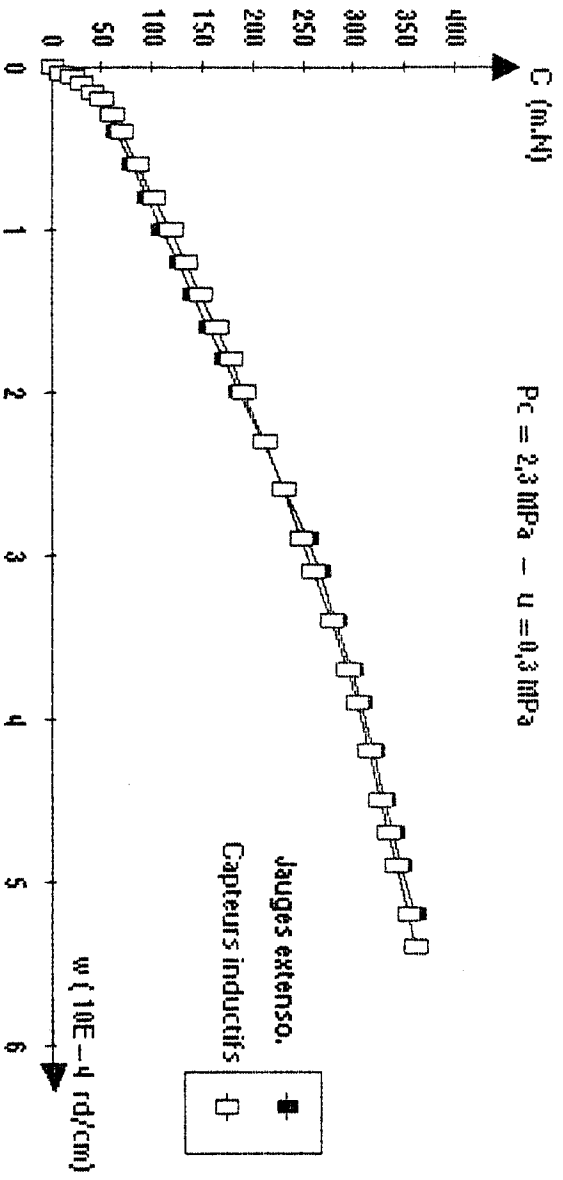


FIGURE I11 - 2 : Déformation angulaire en torsion du grès des Vosges

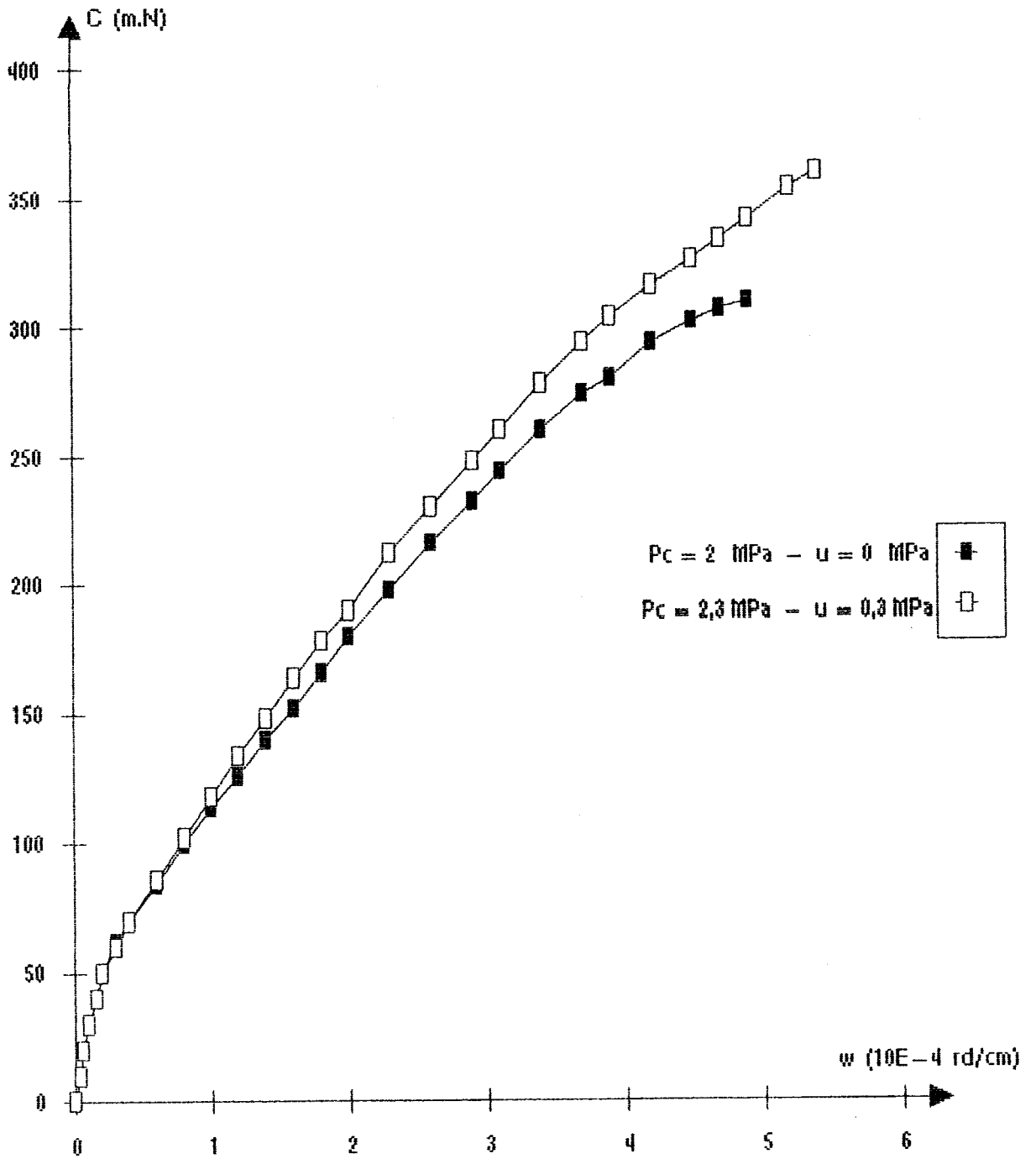


FIGURE III - 3 : Comparaison des essais de torsion - compression hydrostatique sur le grès des Vosges

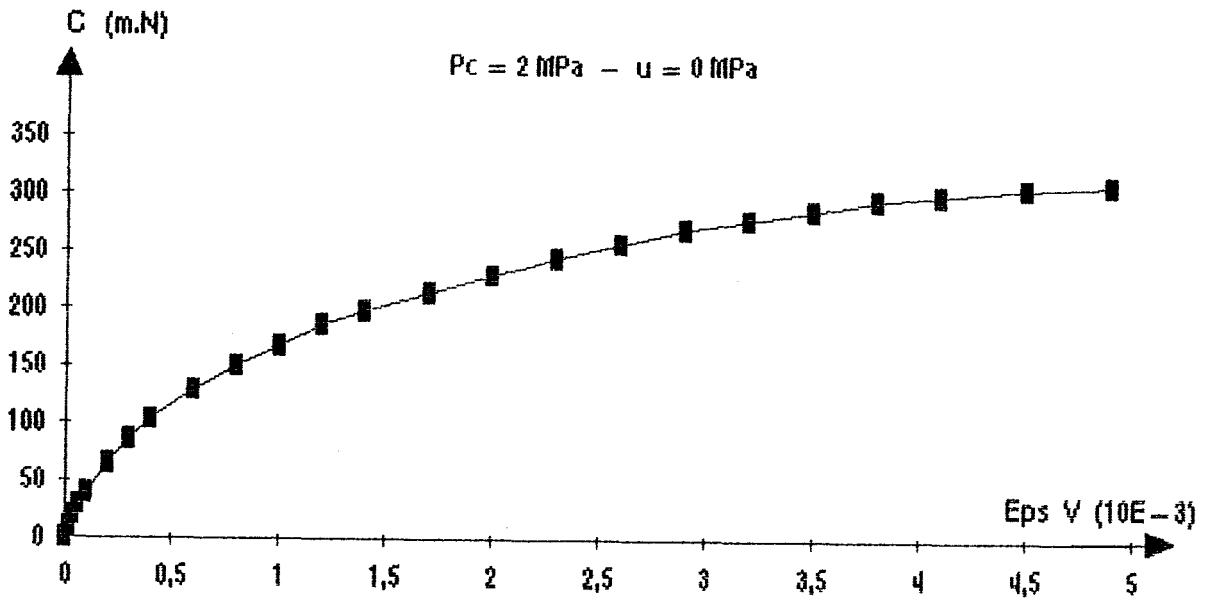


FIGURE III - 4 : Déformation volumique en torsion du grès des Vosges

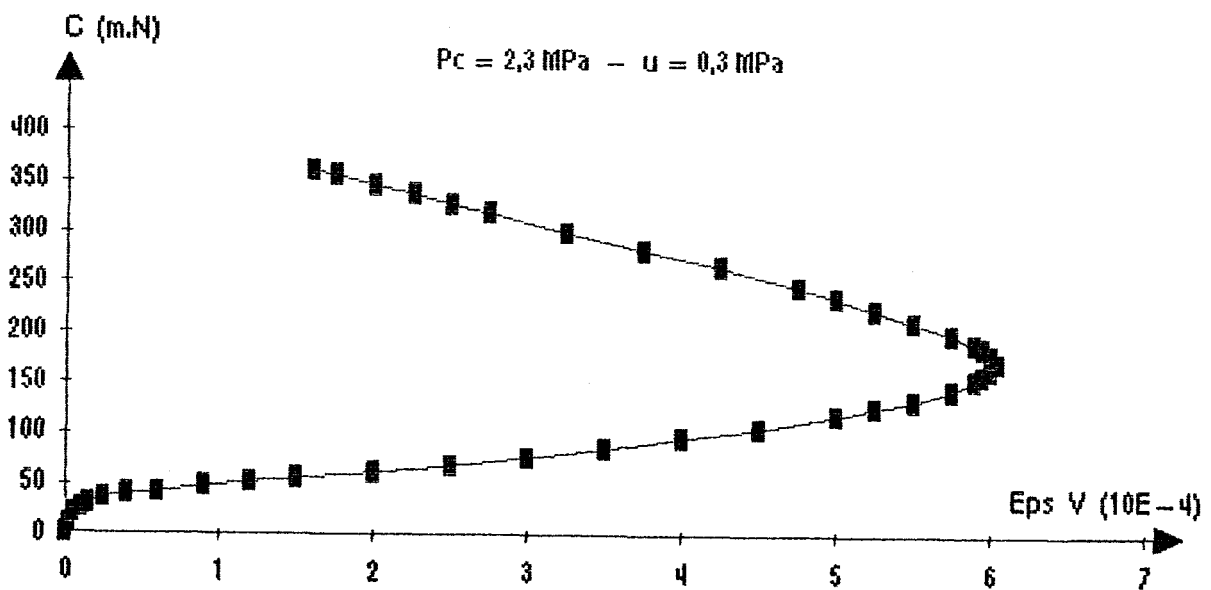


FIGURE III - 5 : Déformation volumique en torsion du grès des Vosges

Par contre, avec une contre-pression de saturation non nulle, le grès présente tout d'abord de la contractance, puis de la dilatance, phénomène que l'on retrouve sous sollicitations triaxiales classiques, le grès des Vosges étant par nature un matériau essentiellement dilatant. De plus, la variation volumique maximale obtenue pour $u = 0,3$ MPa est environ dix fois plus faible que celle à $u = 0$ MPa.

Il apparaît donc essentiel de réaliser des essais de torsion sous contre-pression de saturation non-nulle, afin d'éviter les disparités de pression au sein de l'échantillon au cours de l'essai, et de mesurer de façon correcte les déformations volumiques du matériau.

III 2 2 2 - Détermination de la déformation volumique par jauges et capteurs

Il serait intéressant de pouvoir comparer la déformation volumique déterminée par contrôleur GDS ($\epsilon_v = V/V_0$) avec celle obtenue à partir des mesures locales de déformation de l'échantillon (déformation du squelette : $\epsilon_v = \epsilon_{rr} + \epsilon_{\theta\theta} + \epsilon_{zz}$). Actuellement, seules les déformations axiale et transversale sont mesurées à l'aide des jauges. Il reste la mesure de la déformation radiale du cylindre, qui doit être effectuée sur les parois interne et externe du tube. Cette mesure pose de nombreux problèmes technologiques (système de mesure, présence des membranes d'étanchéité ...) qui n'ont pas à l'heure actuelle encore été résolus.

CONCLUSION

La mise au point d'un essai de torsion-compression sur cylindre creux nécessite la prise en compte, lors de l'étude, de nombreux facteurs, théoriques et technologiques. Il est donc essentiel de se référer aux expérimentations précédemment réalisées. Celles-ci permettent de mieux définir le cahier des charges technique de l'appareillage que l'on souhaite développer, en fonction des objectifs expérimentaux et des objectifs de modélisation que l'on désire atteindre.

Dans le cadre des matériaux fragiles, la possibilité de pouvoir associer, de façon indépendante, un effort de compression axial, des pressions de confinement latérales intérieure et extérieure différentes et un effort de torsion sur un cylindre creux présente un intérêt non négligeable. L'indépendance des quatre efforts appliqués à l'échantillon permet de réaliser un très grand nombre de chemins de contraintes. Le premier intérêt consiste en l'étude de l'influence de la contrainte intermédiaire, de la variation d'intensité et de la rotation des contraintes principales. Le second intérêt de tels essais est, par la suite, de pouvoir développer et valider les modèles rhéologiques, qui sont pour la plupart basés actuellement sur des essais bidimensionnels homogènes et développés dans le cadre de sollicitations sans rotation d'axes principaux.

C'est dans le but de répondre à ces diverses exigences, qu'a été développé un appareillage de torsion-compression sur cylindre creux de roche. Les dimensions retenues pour l'échantillon nous placent dans le cadre de matériaux homogènes, et permettent de limiter efficacement les effets de bords dus aux encastresments, nécessaires en torsion. Les diamètres extérieur et intérieur choisis entraînent la réalisation d'essais non homogènes sur cylindre à paroi épaisse, ce dont il faut tenir compte dans l'interprétation des résultats expérimentaux.

L'appareillage, qui permet d'appliquer indépendamment quatre efforts, permet de simuler l'état naturel de sollicitations subi par un matériau rocheux dans la gamme des petites et moyennes profondeurs. Cependant, la réalisation d'essais de torsion-compression sur cylindre creux de roche nécessite une préparation longue et délicate, tant au niveau de la confection des échantillons qu'au niveau du montage en cellule.

L'importante instrumentation, utilisée lors de la conduite de l'essai, ou lors des mesures et des acquisitions, permet de réaliser automatiquement les expérimentations dans de bonnes conditions de précision.

Actuellement, les algorithmes de pilotage et d'acquisition développés permettent d'étudier la réponse en torsion d'un matériau sous différents états de contraintes.

Les essais Torsion sous compression hydrostatique réalisés sur un grès des Vosges indiquent une très bonne corrélation entre les mesures effectuées par capteurs de déplacement inductifs et celles obtenues par jauges d'extensométrie. Ces essais, cependant, mettent en évidence la nécessité d'appliquer une contre-pression de saturation non nulle lors d'essais en conditions drainées. Dans ce cas, les mesures de variations volumiques de l'échantillon par contrôleur GDS sont représentatives du comportement du matériau. Enfin, il est nécessaire dans un proche avenir de pouvoir mesurer en torsion les déformations radiales de l'échantillon. Ceci permettra de pouvoir comparer les déformations volumiques globales avec les déformations locales de l'éprouvette, et de mieux appréhender les problèmes de couplage fluide-squelette.

SECONDE PARTIE

ESSAIS DE TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE
SUR UNE CRAIE BLANCHE

SIMULATION NUMERIQUE A L'AIDE DU MODELE DE LADE

INTRODUCTION

L'intérêt principal de l'appareillage de torsion-compression réside en la possibilité de réaliser, sur des matériaux rocheux, une multitude de chemins de sollicitations et de contraintes. Grâce à l'indépendance et à la superposition des quatre efforts appliqués, cet appareillage permet d'étudier, sur échantillon cylindrique creux, la réponse au cisaillement d'un matériau soumis, préalablement ou simultanément, à différents états de contraintes normales, dans des conditions drainées ou non drainées.

La conception et l'automatisation de cet appareillage facilite la réalisation d'essais délicats à mettre en oeuvre, essais qui peuvent s'avérer intéressants dans le développement de modèles rhéologiques dans le cadre d'une mécanique rotationnelle.

Il existe cependant quelques restrictions technologiques et expérimentales. Notons principalement la nécessité d'un matériau homogène, la non-homogénéité du champ de contraintes à travers la paroi du cylindre, la limitation des efforts normaux appliqués à l'échantillon à des efforts uniquement de compression.

Néanmoins, la gamme d'efforts développés par l'appareillage permet de tester la plupart des roches homogènes sous faibles et moyennes sollicitations.

De l'ensemble des roches homogènes que l'on peut rencontrer dans la nature, nous avons choisi la craie pour réaliser les premiers essais de torsion. En effet, la craie, qui est une roche tendre au comportement initialement fragile, est un matériau très répandu dans la région Nord de la France (carrières à ciel ouvert, carrières souterraines...), ou en Mer du Nord (forages pétroliers, exploitations de gisements...).

Dans la seconde partie de ce travail, le premier chapitre indique les premiers résultats des essais de torsion sous compression hydrostatique, qui sont réalisés sur une craie blanche provenant d'une carrière souterraine située dans le Nord de la France.

Cependant le but final de l'appareillage est de pouvoir modéliser le comportement des roches sous diverses sollicitations rotationnelles. Ainsi, nous présentons, dans le second chapitre, les résultats de la simulation numérique des essais précédents, simulation basée sur le modèle de LADE et réalisée sous certaines conditions et hypothèses simplificatrices.

CHAPITRE I

ESSAIS DE TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE
SUR UNE CRAIE BLANCHE

Les états de contraintes biaxiaux et triaxiaux, appliqués à l'échantillon avant application du couple, sont obtenus expérimentalement par des chemins dont la première étape consiste en une compression hydrostatique du matériau. Cette compression hydrostatique, de même que la compression biaxiale, crée un champ de contraintes homogène au sein du matériau.

Les états de contraintes triaxiaux entraînent, dès l'apparition d'une différence de valeur de pression de confinement intérieure et extérieure, une non-homogénéité du champ de contraintes à travers la paroi. Dans chaque cas, le tenseur de contraintes se décompose en une partie sphérique qui résulte de la compression hydrostatique, et en une partie déviatorique qui dépend de l'état de contraintes final désiré.

La première étude expérimentale, qui s'impose, est donc celle qui consiste à étudier le comportement en torsion d'un matériau soumis préalablement à un champ de contraintes hydrostatique. Cette étude permet, par la suite, de mieux préciser l'influence, sur la réponse en torsion, d'un champ de contraintes bi- ou triaxial et de la non-homogénéité de ce champ dans l'échantillon.

Ce chapitre présente les caractéristiques de la craie sur laquelle ont été réalisés des essais de torsion monotone sous champ de contrainte hydrostatique constant, puis les résultats expérimentaux obtenus. Cependant, il faut signaler que cette série d'essais a été réalisée avant les essais effectués sur le grès des Vosges. De ce fait, les résultats des mesures de variation volumique de la craie, effectuées par contrôleur GDS à contre-pression de saturation nulle, ne sont présentés qu'à titre indicatif. Les différents phénomènes observés quant au comportement en torsion de la roche testée sont analysés. Les différents types de rupture obtenus en fonction de la contrainte hydrostatique sont indiqués. Enfin, une comparaison des résistances mécaniques est faite entre l'essai de torsion pure et un essai à plan de cisaillement imposé du type LUNDBORG.

I 1 - ESSAIS DE TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE

I 1 1 - Présentation et caractéristiques du matériau testé

Les essais présentés dans ce chapitre concernent une craie blanche, provenant de la carrière souterraine de LEZENNES dans le Nord de la France. Cette carrière, aujourd'hui abandonnée, est de type "catiches" et située à faible profondeur.

La craie, classée géologiquement dans le Sénonien, présente les principales caractéristiques suivantes :

- une forte porosité voisine de 40 %,
- une masse volumique apparente à l'état sec $\rho_{app} = 1,65 \text{ g/cm}^3$,
- une masse volumique absolue $\rho_{abs} = 2,64 \text{ g/cm}^3$,
- une teneur en liquide de percolation à l'état saturé voisine de 23%,
- un module d'Young d'environ 1 500 MPa,
- un coefficient de Poisson égal à 0,2,
- une cohésion située entre 1,2 et 1,4 MPa.

Cette craie présente un comportement anélastique sous sollicitation de compression isotrope (Figure I-1). Sur la courbe $P_c - \epsilon_v$, on constate un comportement linéaire du matériau jusqu'à une pression hydrostatique de 14 MPa. Au delà de cette valeur, on observe tout d'abord une importante compaction plastique de la craie, due à la rupture des ponts entre les grains, puis une troisième zone présentant une diminution rapide du taux de déformation volumique. Ce comportement de la craie sous tenseur de contraintes sphérique est essentiellement lié à la porosité du matériau, porosité qui diminue avec l'augmentation de la pression isotrope (25).

Sous sollicitation de compression triaxiale de révolution (Figure I-2), la craie présente, avant le pic de résistance, un comportement élastoplastique accompagné d'une contractance du matériau fonction de la pression hydrostatique.

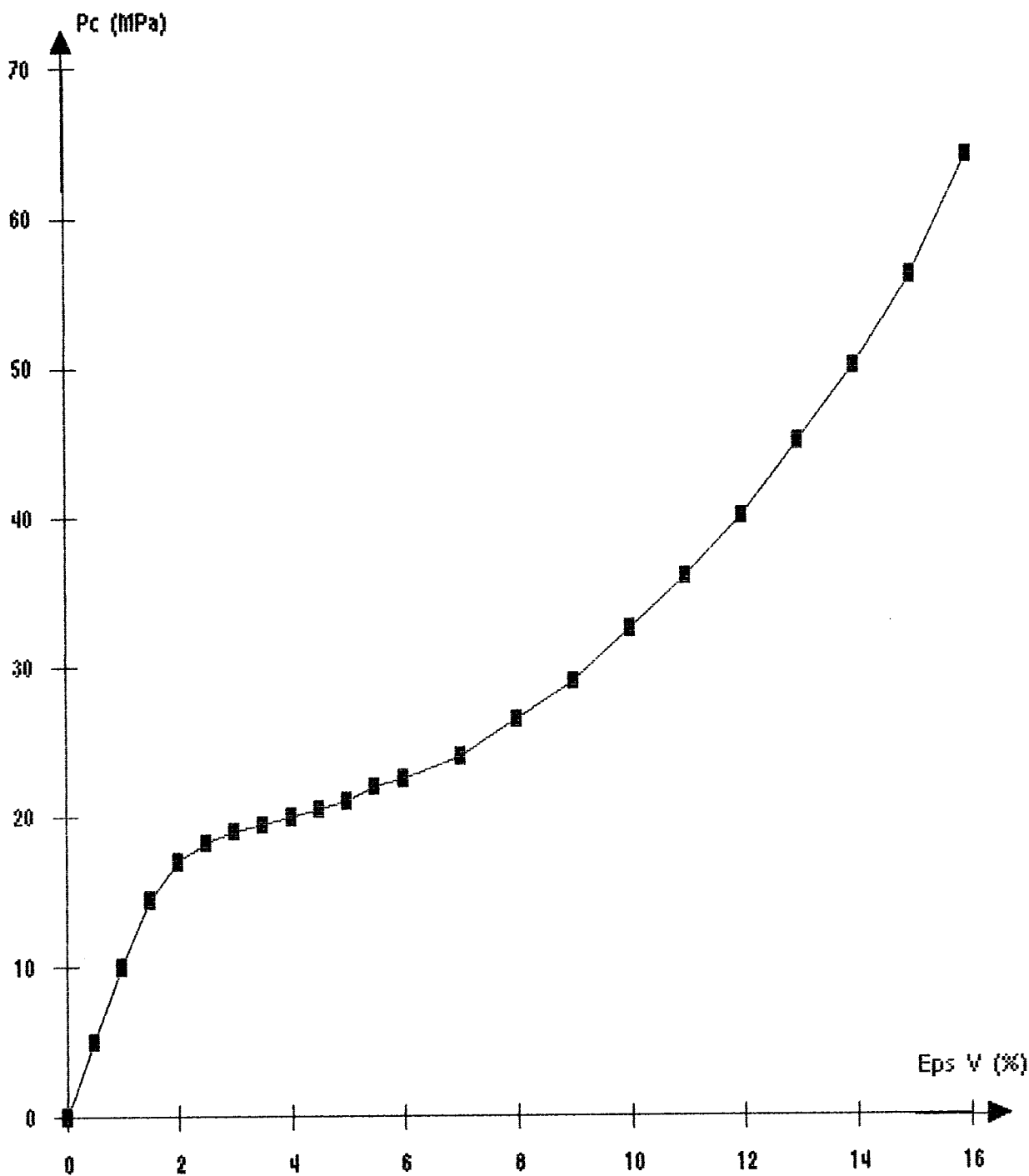


FIGURE I - 1 : Compression hydrostatique de la craie de LEZENNES

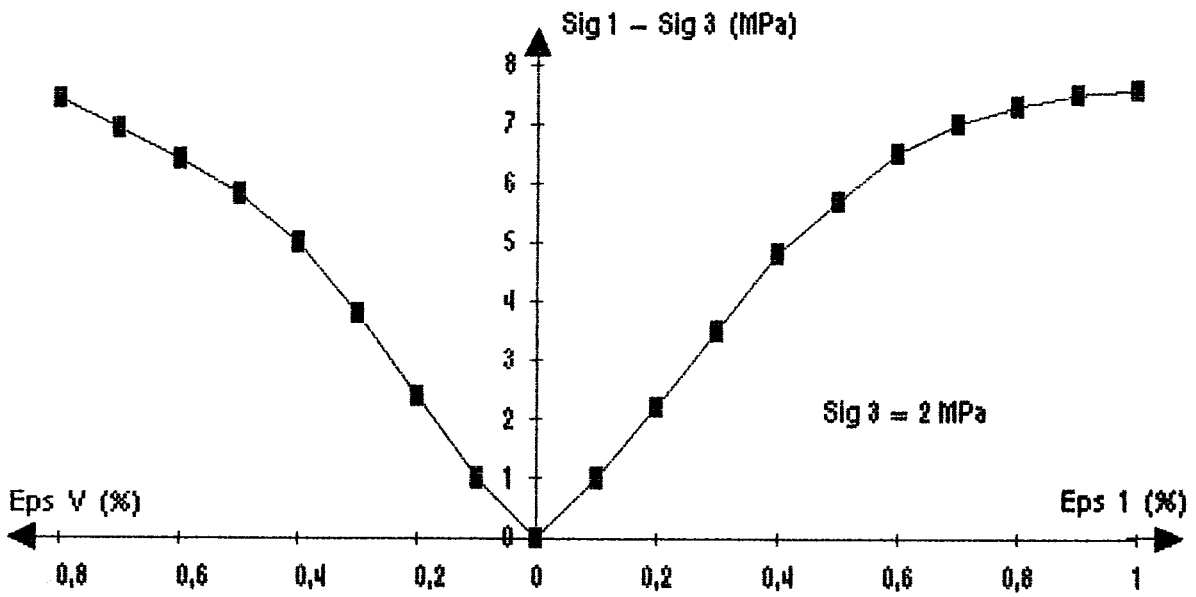


FIGURE I - 2 : Essais de compression triaxiale de révolution sur la craie de LEZENNES

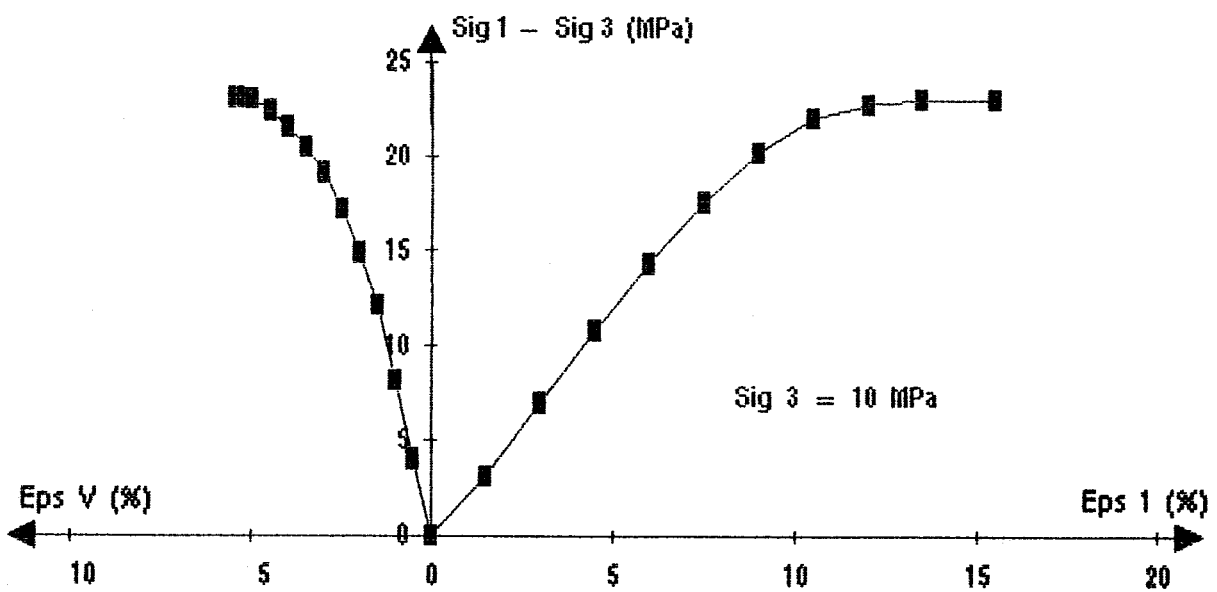


FIGURE I - 2 (suite)

I 1 2 - Résultats expérimentaux et analyse

Sur la craie ont été réalisés, par un pilotage en force, huit essais de torsion monotone précédés d'un chargement hydrostatique, ceci jusqu'à la rupture (29).

Les valeurs retenues pour le confinement initial avant torsion sont : 0, 1, 2, 5, 8, 11, 14 et 20 MPa.

Le premier de ces essais est donc un essai de torsion pure. Les sept premières contraintes hydrostatiques choisies se situent dans la première zone linéaire de la courbe de compressibilité du matériau. La dernière contrainte hydrostatique retenue se situe dans la deuxième zone de la courbe de compressibilité. Tous les essais ont été réalisés en condition drainée pendant la phase hydrostatique et l'application de l'effort de torsion. Cependant, du fait de la forte porosité du matériau, l'utilisation des jauges d'extensométrie pour la mesure des déformations s'avère délicate et n'a donc pas été retenue. La variation de volume de l'échantillon est calculée à partir de la mesure du volume de liquide expulsé des vides de l'éprouvette, ce qui implique comme hypothèse que la compressibilité des grains est négligeable devant celle des vides. Cette hypothèse semble satisfaisante en raison de la porosité du matériau et comme l'a constaté SHAO sur un matériau similaire (25). Le volume initial d'échantillon pris en compte dans le calcul de la déformation volumique correspond au volume de matériau situé entre les encastrements. Enfin, le liquide de percolation utilisé est de l'alcool éthylique afin d'éviter les phénomènes de dissolution-recristallisation de la craie qui sont observés lorsque celle-ci est saturée en eau.

I 1 2 1 - Courbes couple-déformation angulaire

Les figures I-3 et I-4 représentent l'évolution jusqu'à la rupture du couple en fonction de la déformation angulaire pour les différentes valeurs de pression hydrostatique. On constate immédiatement une importante différence de comportement entre l'essai réalisé à une pression hydrostatique de 20 MPa et les autres essais.

Pour les pressions hydrostatiques inférieures ou égales à 14 MPa, les courbes couple-déformation angulaire se décomposent en deux parties : la première caractérise un comportement linéaire du matériau, l'amplitude

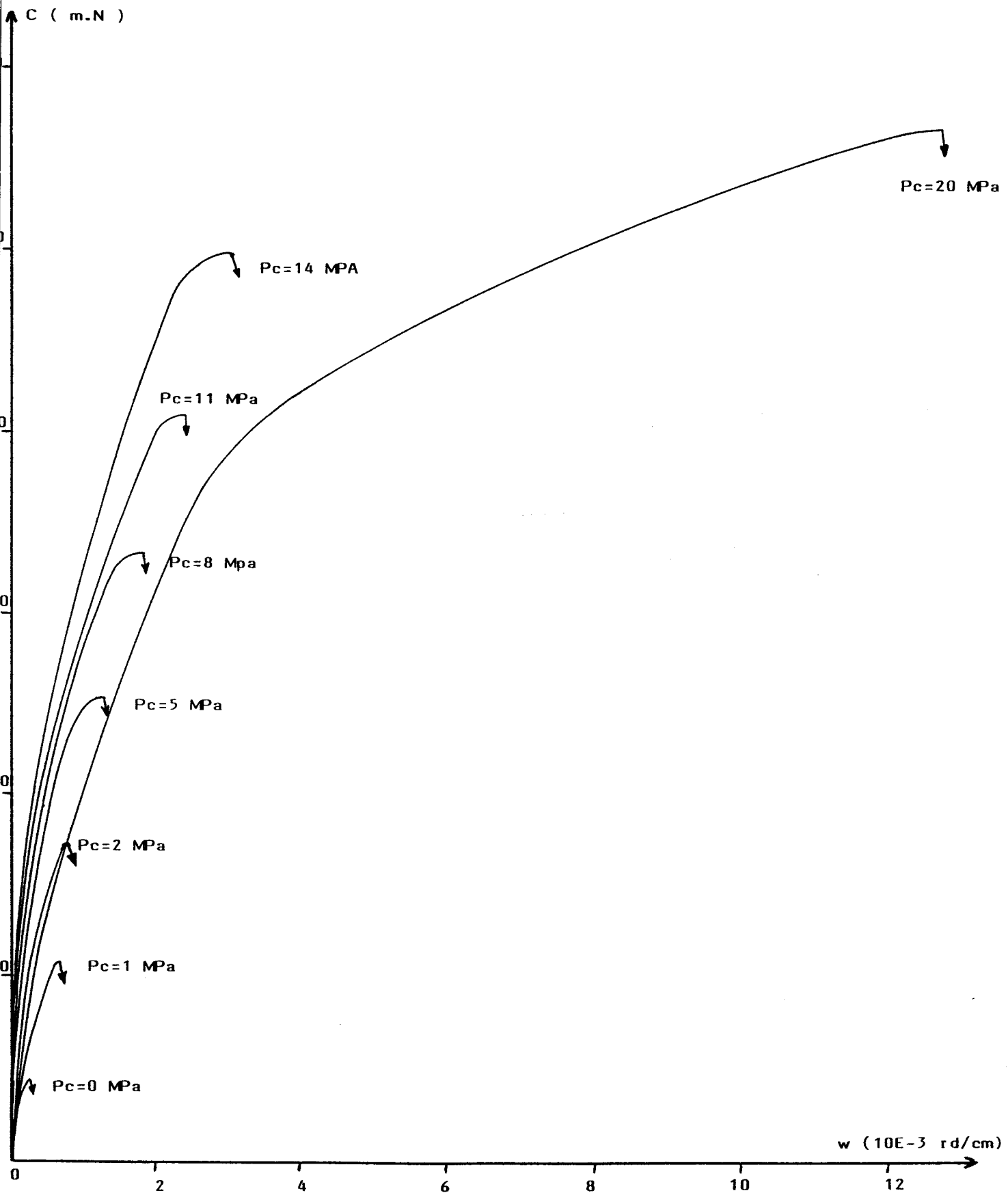


FIGURE I - 3 : Courbes couple-déformation angulaire de la craie sous contrainte hydrostatique

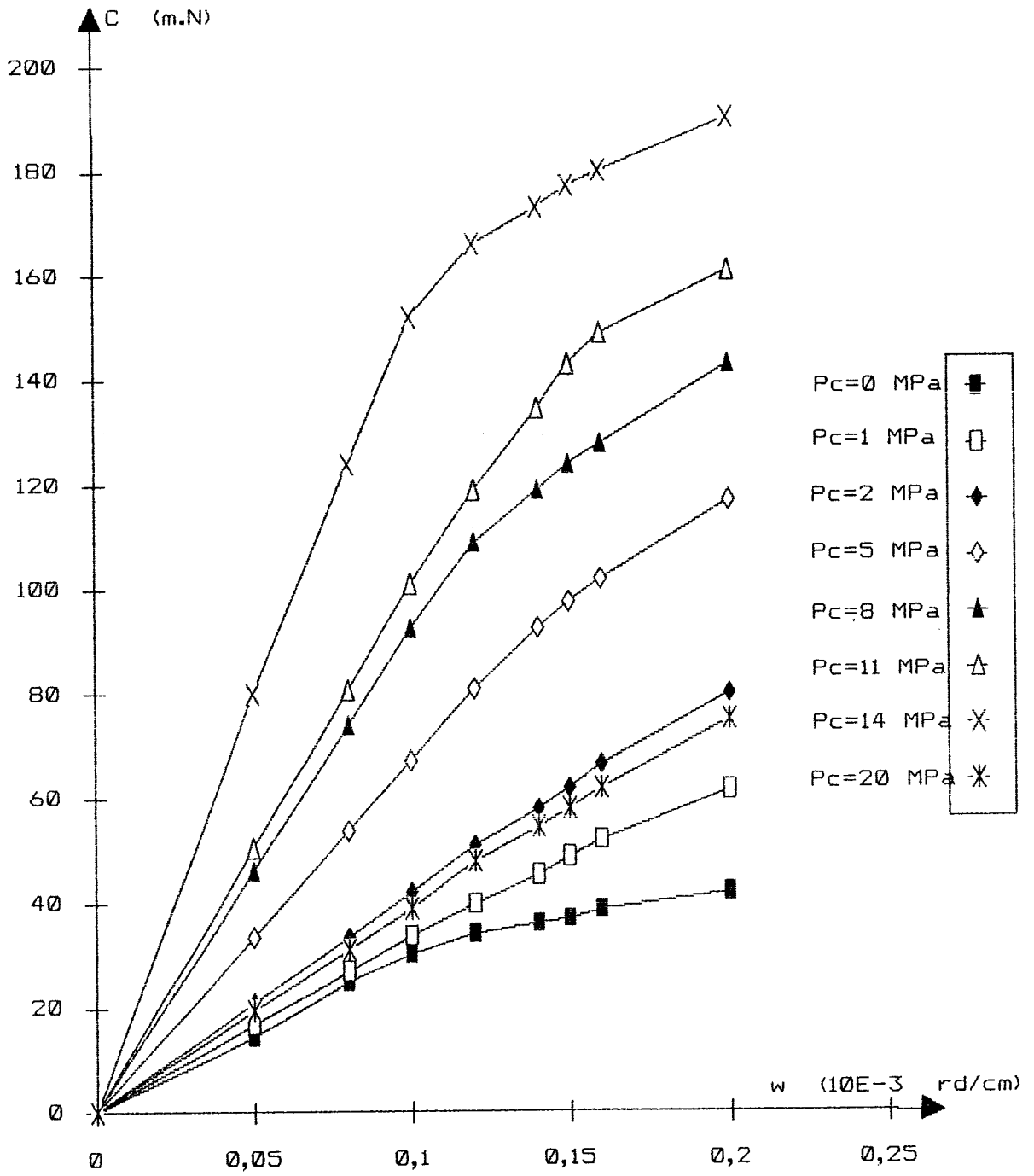


FIGURE I - 4 : Parties linéaires des courbes couple-déformation angulaire

(en valeur de couple) de cette zone augmentant avec le confinement. La deuxième partie représente une phase non linéaire d'ampleur plus importante que la première. Ce phénomène a déjà été constaté par **HANDIN** et **DURAND**. Le seuil entre phases linéaire et non linéaire semble indiquer une propagation de la fissuration de la périphérie vers l'intérieur du cylindre par rupture des ponts entre les différents grains.

On constate donc que le comportement en torsion de la craie dépend fortement de la pression hydrostatique. En dessous d'un certain seuil de contrainte hydrostatique, situé entre 2 et 5 MPa, la craie présente un comportement fragile. La rupture apparaît assez brutalement mais est précédée d'une légère courbure vers l'axe des déformations. Au-dessus de ce seuil de pression, la courbe s'infléchit davantage vers l'axe des déformations avec l'apparition de déformations plastiques importantes. La rupture est précédée d'un écrouissage qui est fonction du confinement. On observe donc le passage d'un comportement fragile à un comportement ductile de la craie. Selon **SHAO**, la forte porosité de la craie est un des facteurs essentiels dans le comportement anélastique de la craie soumise à un champ de contraintes hydrostatiques moyennes et élevées. Jusqu'à 14 MPa de confinement, les valeurs du couple et de la déformation angulaire à la rupture augmentent régulièrement avec la pression hydrostatique.

Quant à l'essai réalisé à 20 MPa de confinement, la courbe couple-déformation angulaire présente une zone linéaire de faible amplitude suivie d'une phase non linéaire très importante qui se décompose globalement en deux parties. La valeur du couple à la rupture est légèrement supérieure à celle obtenue à 14 MPa de confinement, alors que la valeur de la déformation angulaire augmente de façon très importante. Par rapport à la torsion pure, la rotation à la rupture à 20 MPa est près de 55 fois supérieure. Le matériau est alors soumis à un état de grande déformation.

L'influence de la pression de confinement sur le module d'élasticité transversal en torsion qui sera désigné par G_T ($M = G_T * I_0 * w$) est également significative. Pour les pressions hydrostatiques situées dans la première zone de la courbe de compressibilité de la craie, le module d'élasticité croît avec la pression.

Pour l'essai à 20 MPa de confinement (deuxième zone de la courbe de compressibilité), il y a inversion du phénomène précédent ; la valeur du module d'élasticité transversal diminue et se situe entre celles des essais

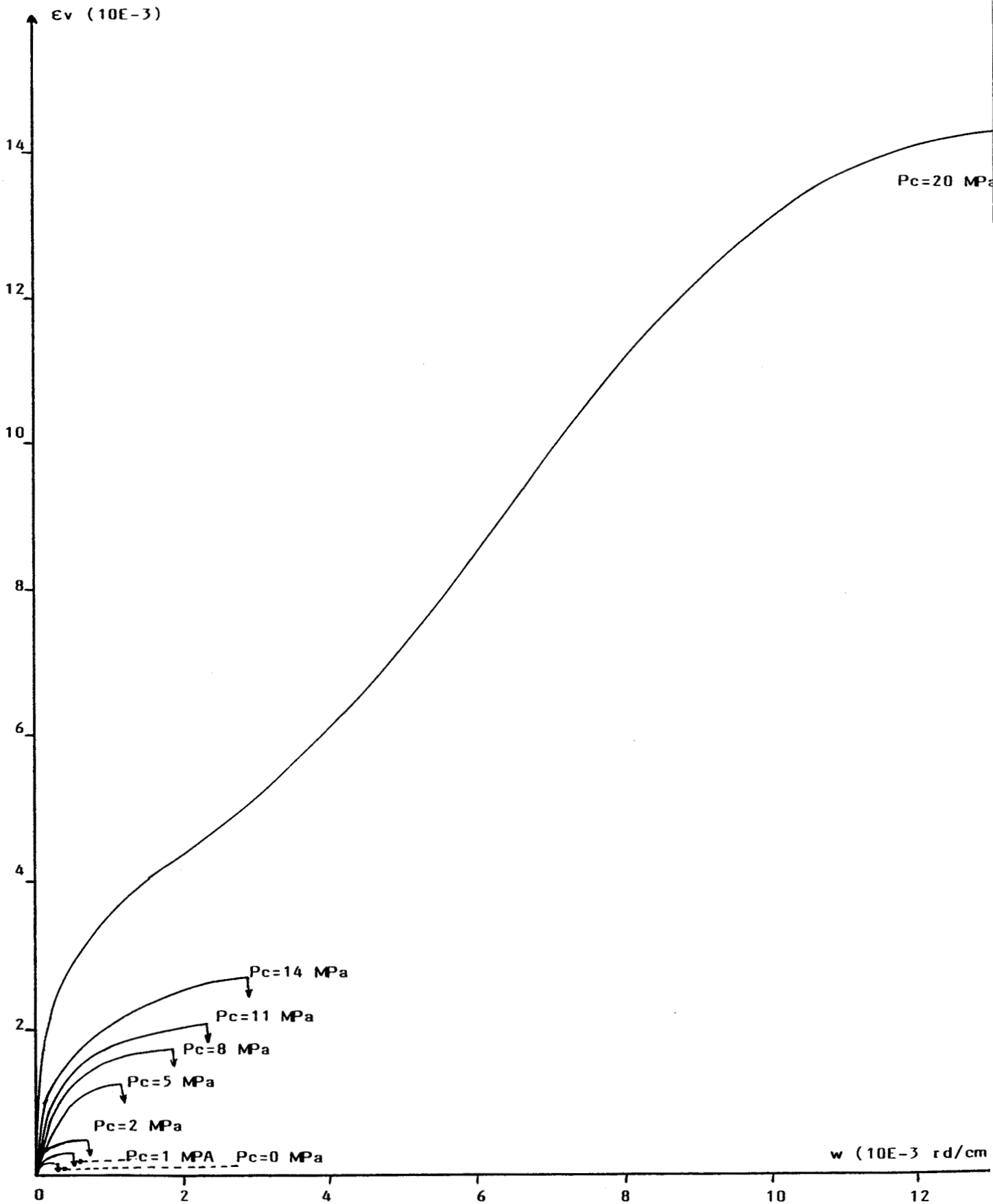


FIGURE I - 5 : Courbes déformation volumique-déformation angulaire de la craie sous contrainte hydrostatique

réalisés à 1 et 2 MPa de pression hydrostatique.

Le tableau I-1 récapitule les différentes valeurs de G_T en fonction du confinement.

P_C (MPa)	0	1	2	5	8	11	14	20
G_T (MPa)	1465	1599	1904	3350	4063	4762	7047	1810

Tableau I-1 :

Evolution du module d'élasticité transversal en torsion en fonction de la pression hydrostatique.

Il apparaît également une différence importante entre le module d'élasticité G_T déterminé en torsion pure et le module d'élasticité transversal G_C déterminé en élasticité à partir du module d'Young et du coefficient de Poisson obtenus par compression simple ($G_C = 625$ MPa).

Cette différence de module, déduite d'une analyse linéaire élastique, semble indiquer une différence de comportement de la craie entre les essais irrotationnels, où les contraintes restent fixes en direction, et l'essai de torsion qui induit la rotation de deux contraintes principales.

I 1 2 2 - Courbes déformation volumique-déformation angulaire

La figure I-5 représente les courbes déformation volumique-déformation angulaire pour les différentes pressions hydrostatiques. Rappelons que ces résultats ne sont présentés qu'à titre indicatif, les essais ayant été réalisés à contre-pression de saturation nulle. Ces courbes se décomposent également en deux parties : une partie linéaire fonction de la valeur du confinement suivie d'une seconde phase non linéaire jusqu'à la rupture.

Le comportement de la craie avant la rupture présente, pour les essais réalisés à une pression hydrostatique inférieure ou égale à 14 MPa, des variations de volume lors de l'application du couple nettement plus faibles que celles relevées lors de la phase hydrostatique. Cependant elles ne sont pas négligeables. Quant à l'essai de torsion réalisé à 20 MPa de

pression hydrostatique, la déformation volumique de l'échantillon augmente de façon considérable vis à vis de celles obtenues lors des essais précédents.

Enfin, il faut noter qu'il existe une variation volumique de l'échantillon en torsion pure, alors que la déformation de torsion pure est une distorsion simple. En théorie, si le matériau est parfaitement élastique, elle ne doit pas créer de variations volumiques de l'éprouvette.

I 1 2 3 - Modes de rupture

Le mode de rupture en torsion des échantillons est en général caractérisé par deux hélices diamétralement opposées. L'angle d'inclinaison de ces hélices par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe de l'éprouvette varie avec la pression hydrostatique.

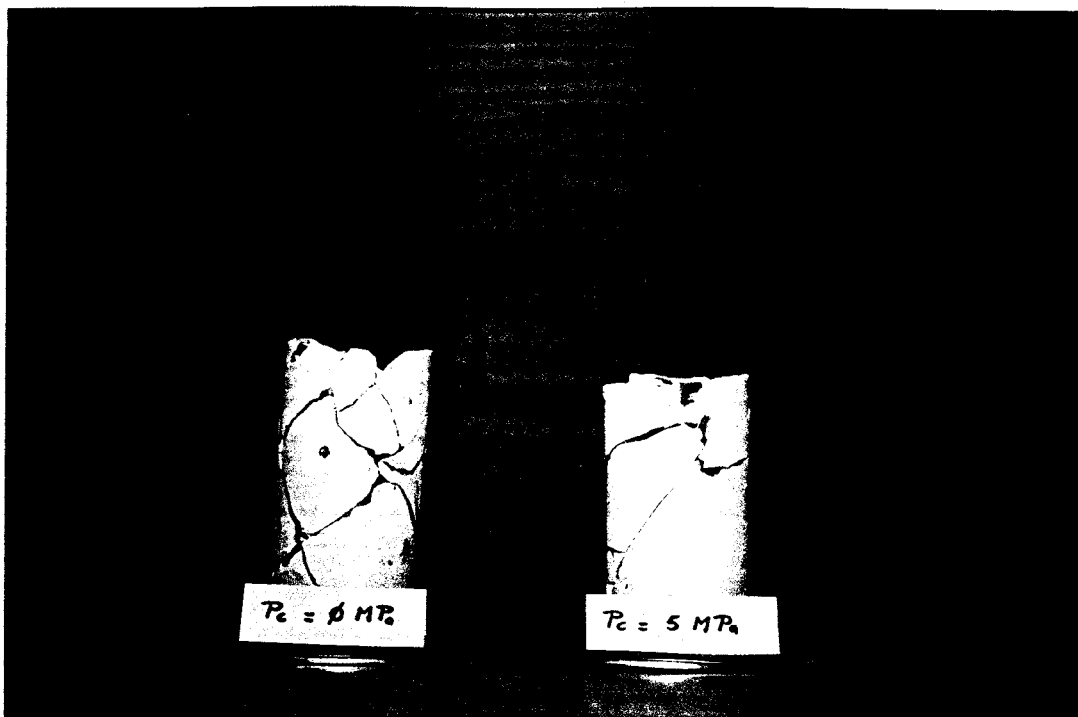
Cette variation est reportée sur le tableau I-2 suivant :

P_c (MPa)	0	1	2	5	8	11	14	20
angle d'inclinaison (degrés)	40	40 à 45	50 à 55	60 à 65	70	80	80 à 85	85

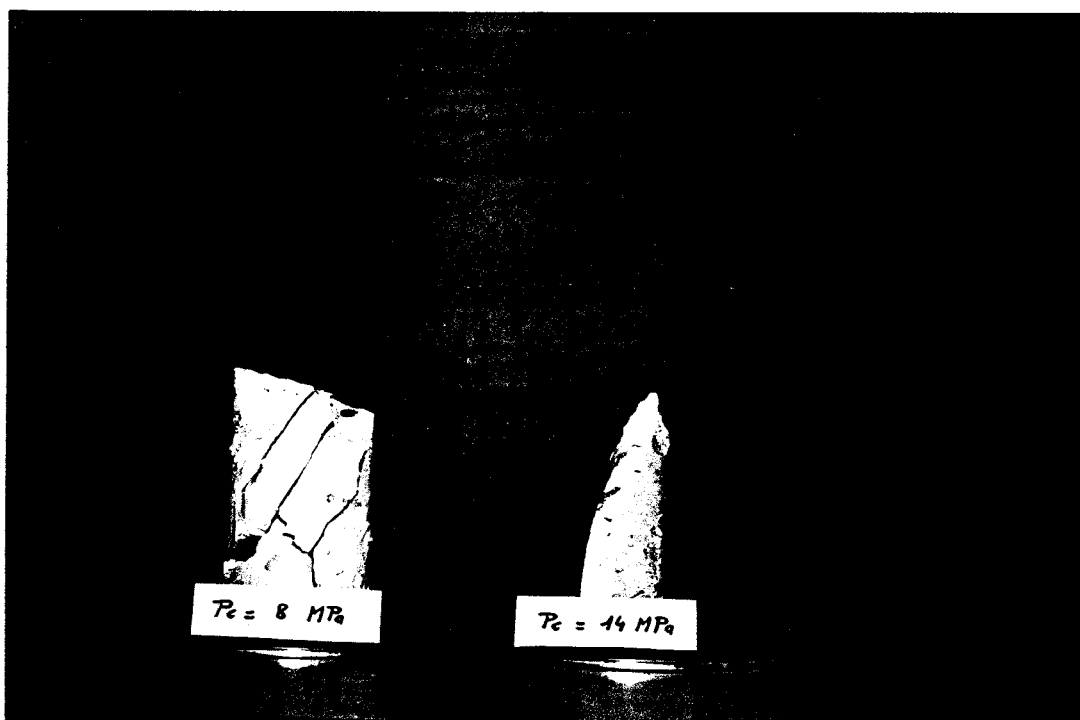
Tableau I-2 :

Evolution de l'angle d'inclinaison des hélices de rupture en torsion en fonction de la pression hydrostatique.

On voit également apparaître, avec l'augmentation de la pression hydrostatique, d'autres ruptures secondaires d'orientation variable, parfois parallèles aux hélices principales, parfois sécantes (photos I-1 et I-2). Ces constatations sont à rapprocher de celles faites par DURAND sur l'étude en torsion de matériaux homogènes.



**PHOTO I - 1 : RUPTURES EN TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE
D'ÉPROUVETTES TUBULAIRES DE CRAIE ($P_c = 0$ et 5 MPa)**



**PHOTO I - 2 : RUPTURES EN TORSION-COMPRESSION HYDROSTATIQUE
D'ÉPROUVETTES TUBULAIRES DE CRAIE ($P_c = 8$ et 14 MPa)**

I 1 2 4 - Conclusion

Les différents essais réalisés montrent l'influence importante de la pression hydrostatique sur le comportement en torsion de la craie. Pour les valeurs de confinement situées dans la première zone de la courbe de compressibilité, on constate tout d'abord un comportement linéaire d'amplitude faible suivi d'un important écrouissage plastique du matériau. Les valeurs à la rupture du couple, des déformations angulaire et volumique ainsi que la valeur du module d'élasticité transversal augmentent régulièrement avec la pression hydrostatique. Pour une valeur de confinement située dans la seconde zone de la courbe de compressibilité, on constate une très importante augmentation des déformations angulaire et volumique à la rupture, accompagnée d'une diminution notable du module d'élasticité transversal.

I 2 - COMPARAISON ENTRE L'ESSAI DE TORSION PURE ET L'ESSAI TYPE LUNDBORG.

Il est intéressant de pouvoir comparer l'essai de torsion pure, où le plan de cisaillement est libre, avec des essais à plan de cisaillement imposé, comme l'essai de type LUNDBORG. L'avantage de cet essai réside en la rapidité de sa mise en oeuvre.

L'essai de type LUNDBORG nécessite l'emploi d'une cellule spécifique placée entre les plateaux d'une presse. La cellule utilisée permet d'effectuer un double cisaillement sur des échantillons parallélépipédiques de 60 mm de côté et d'élanement égal à 2,7. Cette cellule est munie d'un vérin horizontal qui permet d'appliquer, le cas échéant, un effort normal aux plans de cisaillement. La contrainte tangentielle est directement développée par la presse, en l'occurrence une presse INSTRON de 1 200 kN de capacité asservie entièrement en force et en déplacement (photos I-3 et I-4). Les échantillons testés ont été mis, après séchage à 100° C en étuve pendant 48 heures, en saturation dans un bain d'alcool durant un minimum de trois semaines. La vitesse d'application de la contrainte de cisaillement est de 0,03 MPa/mn, ce qui correspond à la vitesse d'application de l'effort de torsion à la périphérie d'un cylindre creux.

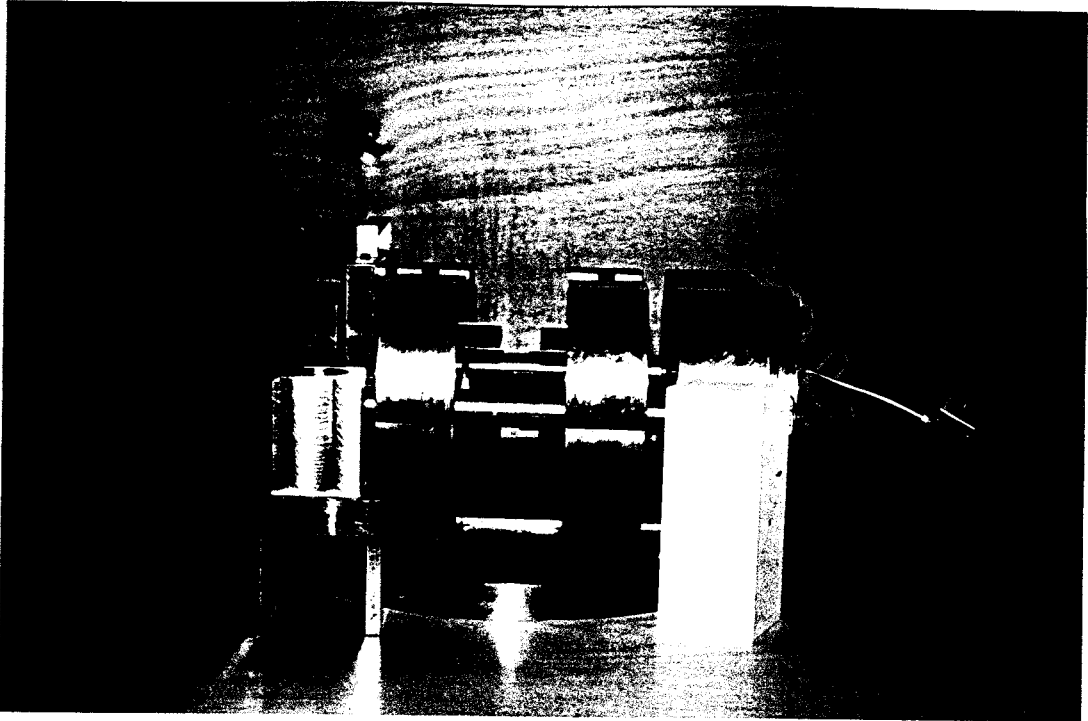


PHOTO I - 3 : CELLULE DE CISAILLEMENT TYPE LUNDBORG

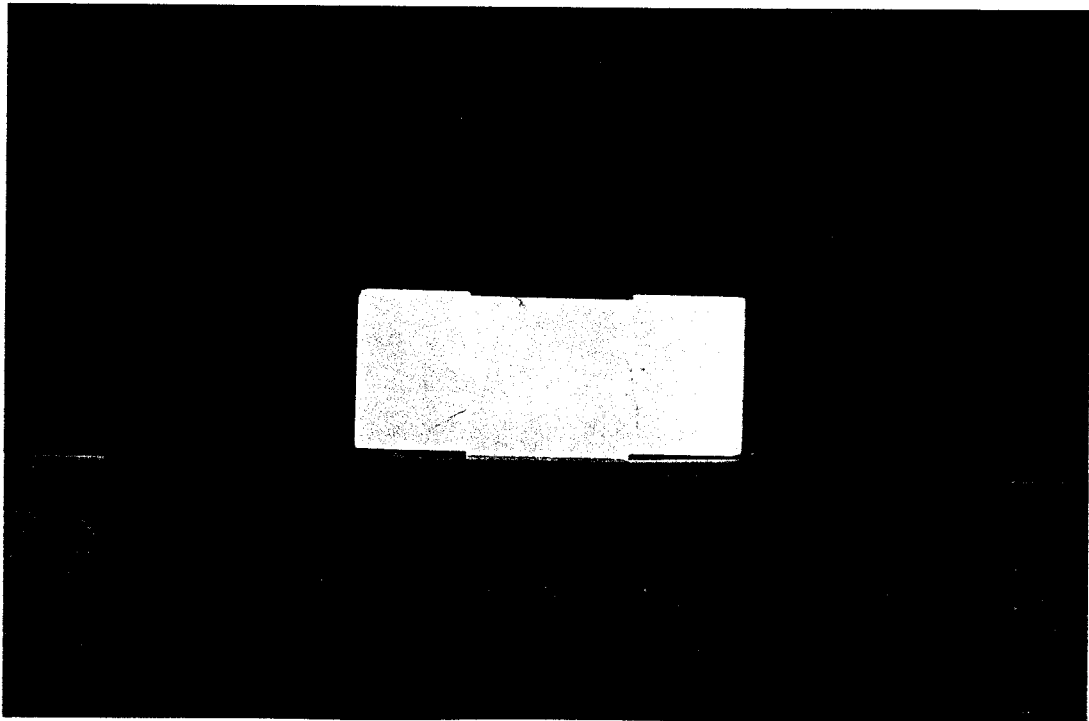


PHOTO I - 4 : ECHANTILLON DE CRAIE APRES UN ESSAI DE CISAILLEMENT
TYPE LUNDBORG

Les contraintes à la rupture pour les deux types d'essai sont les suivantes :

- torsion pure : $\tau_T = 0,53 \text{ MPa}$
- Essai LUNDBORG : $\tau_L = 0,68 \text{ MPa}$ (Moyenne de 4 mesures)

On note donc que l'essai à plan de cisaillement imposé présente une résistance supérieure à celle obtenue en torsion pure (environ 30 %). L'essai à plan imposé sollicite en effet, d'une part essentiellement la matrice rocheuse, et d'autre part une faible zone d'échantillon où se créent des concentrations de contraintes. Par contre, l'essai de torsion sur cylindre creux sollicite l'ensemble de l'échantillon où interviennent principalement des ruptures extracristallines dues à la forte porosité de la craie, ruptures qui se propagent suivant les zones les plus faibles au sein du matériau.

CHAPITRE II

**SIMULATION NUMERIQUE DE L'ESSAI DE TORSION
SOUS PRESSION HYDROSTATIQUE
A L'AIDE DU MODELE DE LADE**

Actuellement, de nombreux modèles rhéologiques utilisés en mécanique des roches sont de type élastoplastique. Pour traduire le comportement non linéaire des roches, certains modèles adoptent des critères de limite élastique du type MOHR-COULOMB ou DRUCKER-PRAGER pour décrire le comportement parfaitement plastique des matériaux. D'autres modèles, initialement développés pour interpréter les principaux comportements des sols pulvérulents, ont été adaptés pour l'étude des matériaux cohérents tels que roches et bétons (18). Cependant la validité de ces modèles est en général limitée en raison de la complexité et de la variété du comportement des matériaux rocheux. Peu d'études ont été réalisées pour modéliser le comportement rhéologique complexe de la craie, lié à sa forte porosité. On observe notamment une forte dépendance de la réponse en fonction de la pression hydrostatique (25) (26). Sous chargement déviatorique, le comportement de la craie est très différent de celui de la plupart des matériaux rocheux. Cependant, un modèle rhéologique basé sur le modèle de LADE a été récemment développé par SHAO dans le cadre des roches très poreuses, en l'occurrence la craie (27). Les objectifs de ce modèle élastoplastique sont principalement les problèmes de subsidence observés en Mer du Nord suite à l'exploitation des réserves pétrolières.

Ce chapitre présente le modèle de LADE adapté par SHAO pour traduire le comportement de la craie sous sollicitations quasi-monotones et irrotationnelles. Il précise les hypothèses et conditions numériques retenues dans la simulation de l'essai de torsion sous pression hydrostatique. Enfin, une comparaison est faite entre les résultats numériques obtenus et les courbes expérimentales.

II 1 - PRESENTATION DU MODELE ELASTOPLASTIQUE POUR CRAIE

L'adaptation du modèle de LADE par SHAO est basé sur une série d'essais de compressions hydrostatiques et de compressions triaxiales classiques de révolution réalisés sur une craie blanche provenant de la carrière d'HAUBOURDIN. L'hypothèse initiale de ce modèle consiste à supposer que la craie est un matériau homogène, isotrope et élastoplastique à écrouissage positif isotrope. Selon l'auteur, ce modèle permet de traduire le comportement rhéologique de la craie sous sollicitations quasi-monotones et sans rotation des axes principaux (26).

Il est basé sur le concept de deux mécanismes de déformations plastiques, concept appliqué par LADE dans le cas des matériaux pulvérulents. La formulation du modèle considère que la déformation totale est la somme d'une déformation élastique et de deux déformations plastiques. L'écriture incrémentale est la suivante :

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^c + d\epsilon_{ij}^d$$

Le terme $d\epsilon_{ij}^e$ représente l'incrément de déformation élastique calculé selon la loi de HOOKE. Il prend en compte l'élasticité initiale du matériau. Le module d'YOUNG est déterminé à partir du coefficient de POISSON ν et d'un pseudo-module de compressibilité K de la façon suivante :

$$E = 3 (1 - 2\nu)K$$

Le pseudo-module K s'exprime quant à lui en fonction des paramètres I_1, P_0 et K_0 :

$$K = K_0 (I_1 / 3.P_0)^n$$

- où :
- I_1 représente le premier invariant du tenseur des contraintes,
 - P_0 est la pression hydrostatique limite de la première zone linéaire de la courbe de compressibilité,
 - K_0 représente le module de la zone linéaire de compressibilité.

Dans l'écriture des deux champs de déformations plastiques, SHAO tient compte de la résistance à la traction de la craie en effectuant un changement de repère dans l'espace des contraintes :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} + R.P_a.\delta_{ij}$$

où R est le paramètre de résistance à la traction, P_a la pression atmosphérique et δ_{ij} le symbole de KRONECKER.

Le terme $d\epsilon_{ij}^c$ représente l'incrément de déformation plastique contractante et traduit le changement de structure de la craie accompagné d'une contractance du matériau. Ce mécanisme de déformation plastique est défini par une loi d'écoulement associative dont la fonction de charge s'exprime de la façon suivante :

$$F_c = Q_c = \bar{I}_1 - y_c = 0$$

avec, pour la fonction d'écrouissage :

$$y_c = y_c^0 + a.Pa.W_c^n \cdot \exp(c.W_c)$$

et
$$y_c^0 = 3 (P_0 + R.Pa)$$

W_c représente l'énergie dissipée contractante : $W_c = \int \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}^c$,
et a, n, c sont des paramètres sans dimension.

Le mécanisme de déformation contractant, associé à une surface de charge sphérique, traduit l'influence importante la pression hydrostatique sur le comportement contractant de la craie. Les paramètres P_0, K_0, a, n et c sont déterminés à partir de la courbe de compressibilité de la craie.

Le dernier incrément de déformation $d\epsilon_{ij}^d$ traduit le mécanisme de déformation plastique déviatorique qui décrit la distorsion plastique de la craie par cisaillement des ponts entre les grains, cisaillement influencé par le tenseur sphérique de contraintes (25). Ce mécanisme est défini par une loi d'écoulement non-associative, dont la fonction de charge et le potentiel plastique s'expriment de la façon suivante :

$$F_d = \left[\frac{\bar{I}_1^3}{\bar{I}_3} - 27 \right] \left[\frac{\bar{I}_1}{Pa} \right]^m - y_d = 0$$

et
$$Q_d = \bar{I}_1^3 - 27 \cdot \bar{I}_3$$

où \bar{I}_3 représente le troisième invariant du tenseur des contraintes, exprimé dans le nouveau repère.

La loi d'écrouissage déviatorique y_d , définie par SHAO, prend la

forme suivante :

$$y_d = y_d^0 + \frac{(y_d^r - y_d^0) Wd}{b + Wd.\gamma}$$

avec
$$y_d^0 = \frac{t}{Pa} (P_0 - \sigma_0)$$

et
$$b = \text{Ln} \left[\alpha + \beta \cdot \left[\frac{I_1}{3.Pa} \right] \right]$$

Dans ces expressions, le paramètre σ_0 , représente la contrainte hydrostatique initiale au début de l'essai et Wd l'énergie de dissipation déviatorique.

Les différents paramètres intervenant dans ce mécanisme déviatorique (m , y_d^r , t , γ , α et β) sont déterminés à partir des essais triaxiaux de révolution réalisés sur la craie.

Ce mécanisme déviatorique contrôle également le mécanisme de rupture du matériau à l'aide du critère tridimensionnel de LADE pour roches et bétons, et dont l'expression a la même forme générale que celle de la fonction de charge :

$$\left[\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right] \left[\frac{I_1}{Pa} \right]^m - y_d^r = 0$$

On constate donc, dans ce modèle, que les deux mécanismes de déformations plastiques font intervenir, dans leur formulation, l'influence de la pression hydrostatique. Le tenseur des contraintes apparaît sous la forme des premier et troisième invariants. Les différents paramètres du modèle, au nombre de treize, sont déterminés à partir de l'essai de compressibilité et des essais triaxiaux classiques de caractérisation réalisés sur le matériau.

II 2 - SIMULATION NUMERIQUE DE L'ESSAI DE TORSION SOUS PRESSION HYDROSTATIQUE

II 2 1 - Hypothèses et conditions de simulation numérique

Les valeurs des paramètres du modèle de LADE-SHAO, concernant la craie de LEZENNES, ont été déterminés à partir de l'essai de compressibilité et des essais triaxiaux présentés au chapitre I. Les valeurs obtenues par l'application de la théorie des problèmes inverses (28), sont les suivantes :

ν	0,2	m	0,15
K_0	933 MPa	y_d^r	76
P_0	14 MPa	α	0,98
R	3	β	0,00052
a	2360	γ	0,95
n	0,64	t	0,5
c	21,8		

La simulation de ces essais de sollicitations simples est représentée sur les figures II-1 et II-2. On peut constater une bonne correspondance entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique.

A partir de ces paramètres déterminés par des essais élémentaires de caractérisation du matériau, la simulation numérique des essais de torsion consiste en l'application incrémentale, jusqu'à la rupture, d'une déformation de cisaillement, sous un champ de contraintes hydrostatique constant. Le résultat numérique consiste donc en la détermination de l'ensemble des contraintes s'exerçant dans l'échantillon, et plus particulièrement de la contrainte de cisaillement.

Il faut cependant préciser que cette première simulation des essais de torsion a été réalisée numériquement en considérant le rayon moyen R_m de l'échantillon comme rayon d'application des incréments de déformation.

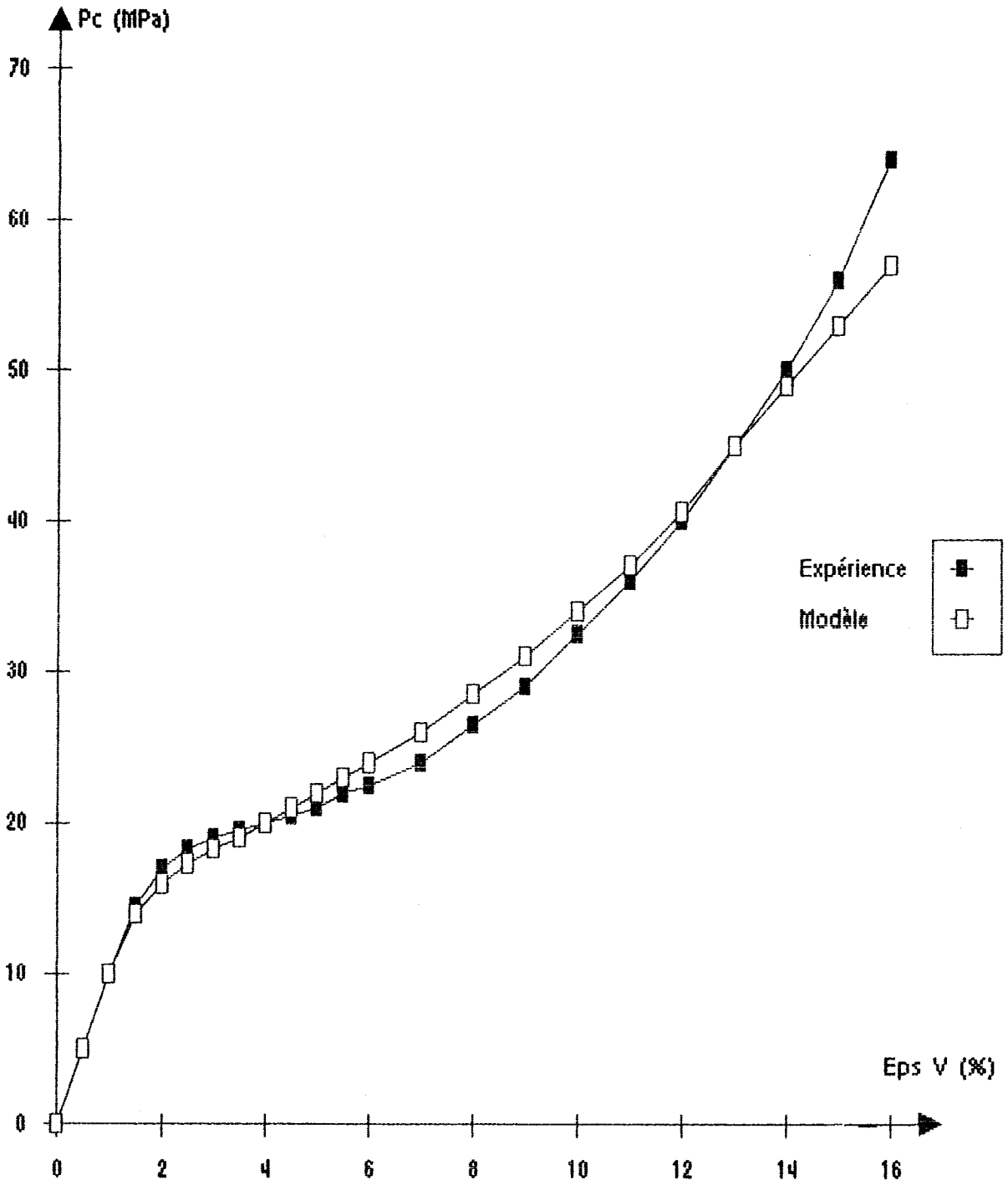


FIGURE II - 1 : Simulation de l'essai de compression hydrostatique

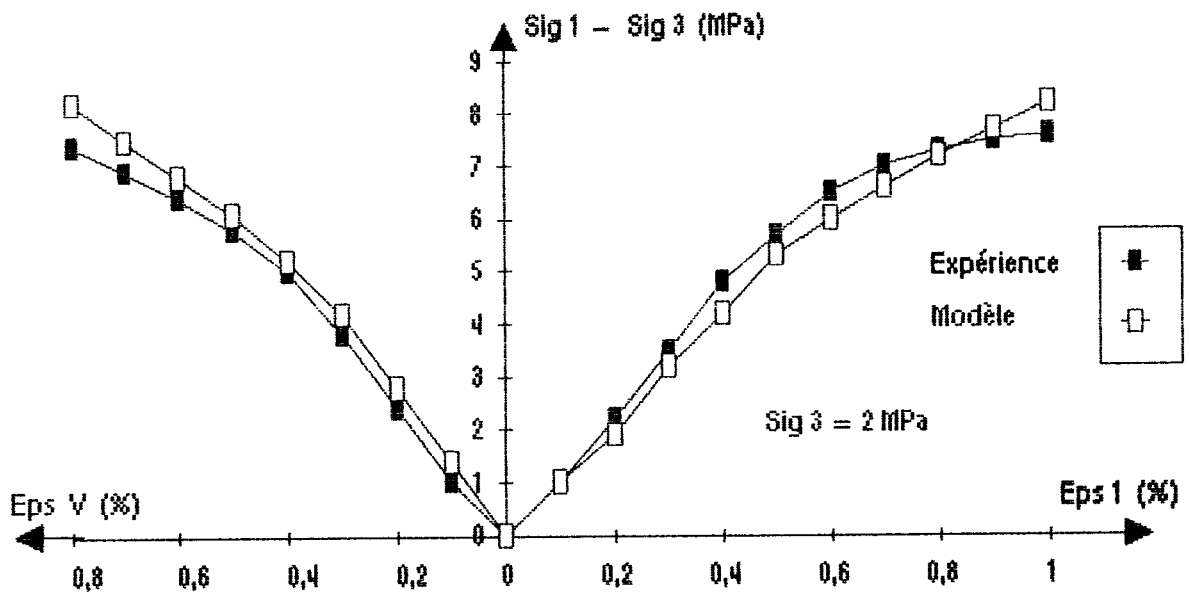


FIGURE 11 - 2 : Simulation des essais de compression triaxiale

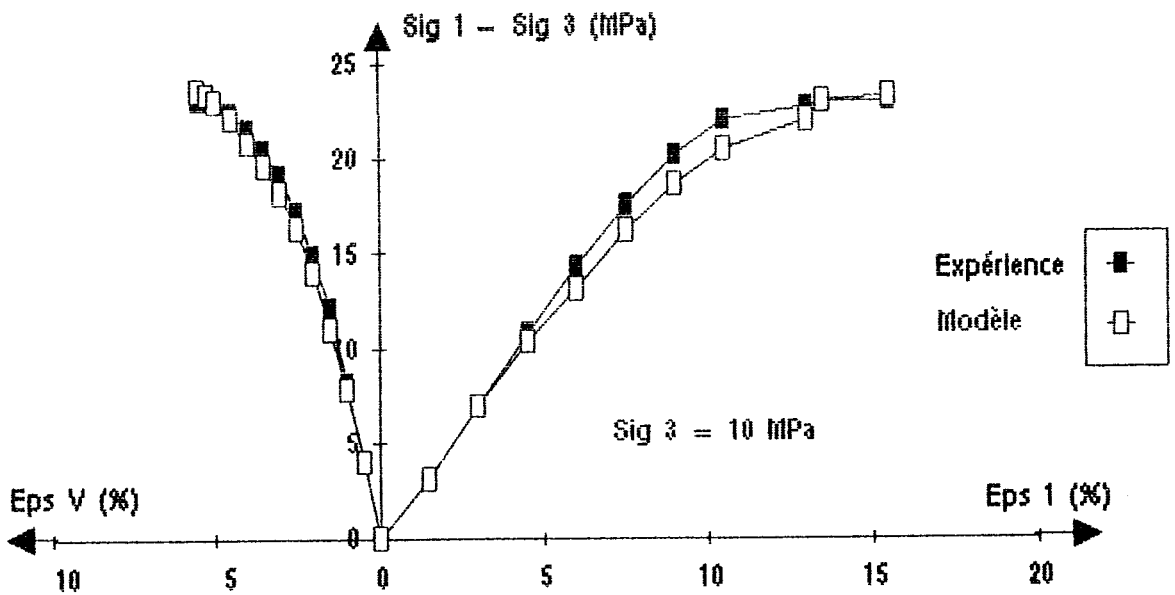


FIGURE 11 - 2 (suite)

Les essais sur le grès des Vosges ayant montré une augmentation de σ_{zz} et une non-variation de ϵ_{zz} pendant le cisaillement, chaque essai de torsion a été simulé, d'une part en imposant une déformation axiale nulle de l'échantillon, et d'autre part en imposant une contrainte de compression axiale constante égale à la pression hydrostatique.

En outre, cette contrainte hydrostatique restant constante (ou quasiment) pendant la simulation, seul le champ plastique déviatorique a une influence lors de la modélisation numérique. En effet, le champ plastique "sphérique" contractant, dont la formulation est totalement liée à la pression isotrope, n'intervient pas. Enfin, les déformations volumiques sont déduites par sommation des déformations normales obtenues.

II 2 2 - Comparaison simulations numériques-résultats expérimentaux

Les simulations numériques, réalisées soit en contrainte axiale imposée, soit en déformation axiale nulle, n'ont pas montré de différences significatives de résultats. Sur la figure II-3, nous avons représenté les courbes contrainte de cisaillement-déformation angulaire et contrainte de cisaillement-déformation volumique pour chaque pression hydrostatique appliquée.

On constate une différence notable d'allure entre les résultats expérimentaux et numériques.

Pour les courbes contrainte de cisaillement-déformation angulaire, le résultat numérique présente initialement une pente nettement plus faible que celle obtenue expérimentalement, sauf pour l'essai à $P_C = 20$ MPa où elles sont voisines. Pour les essais réalisés jusqu'à $P_C = 14$ MPa, la courbe numérique se situe sous la courbe expérimentale, avec une différence importante des valeurs de contraintes de cisaillement à la rupture. On peut noter que ce phénomène s'inverse pour $P_C = 20$ MPa, avec cependant toujours la même différence de valeurs de contraintes à la rupture.

Quant aux courbes contrainte de cisaillement-déformation volumique, on peut constater, en tenant compte des conditions de mesures expérimentales, une différence importante de valeur de déformation volumique à la rupture et la seule similitude de comportement contractant de la craie pour l'essai réalisé à $P_C = 20$ MPa.

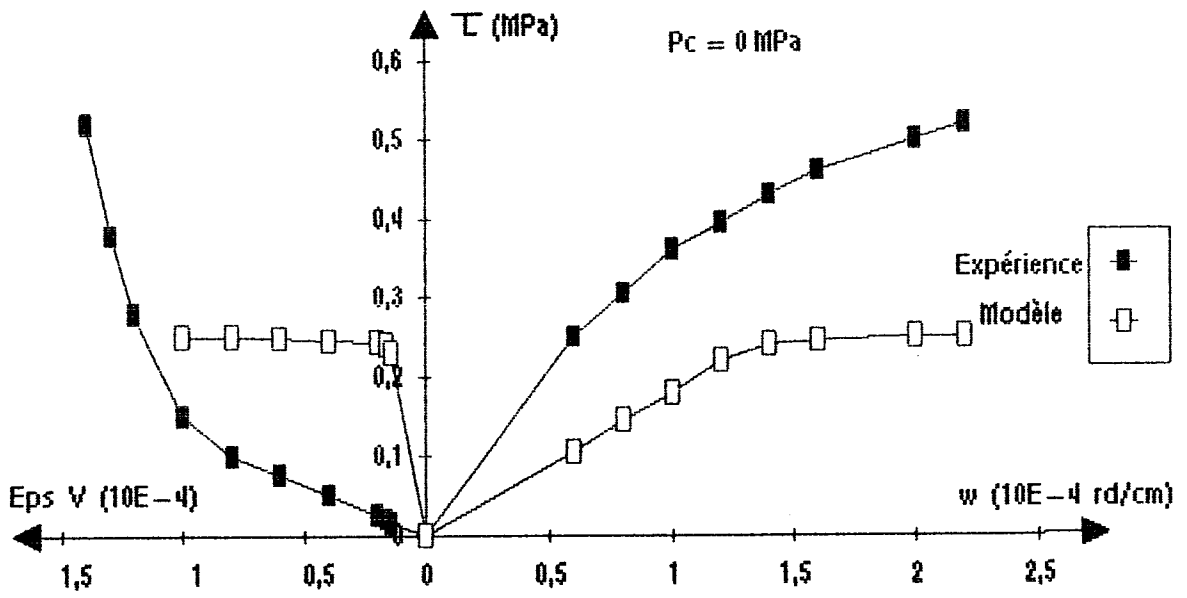


FIGURE 11 - 3 : Simulation des essais de torsion - compression hydrostatique

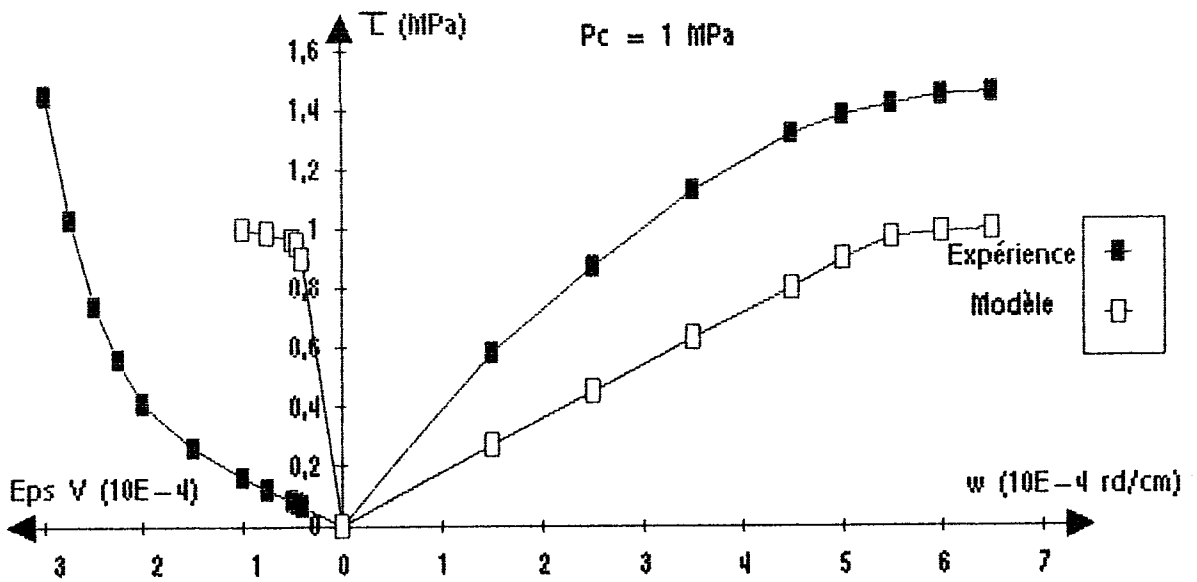


FIGURE 11 - 3 (suite)

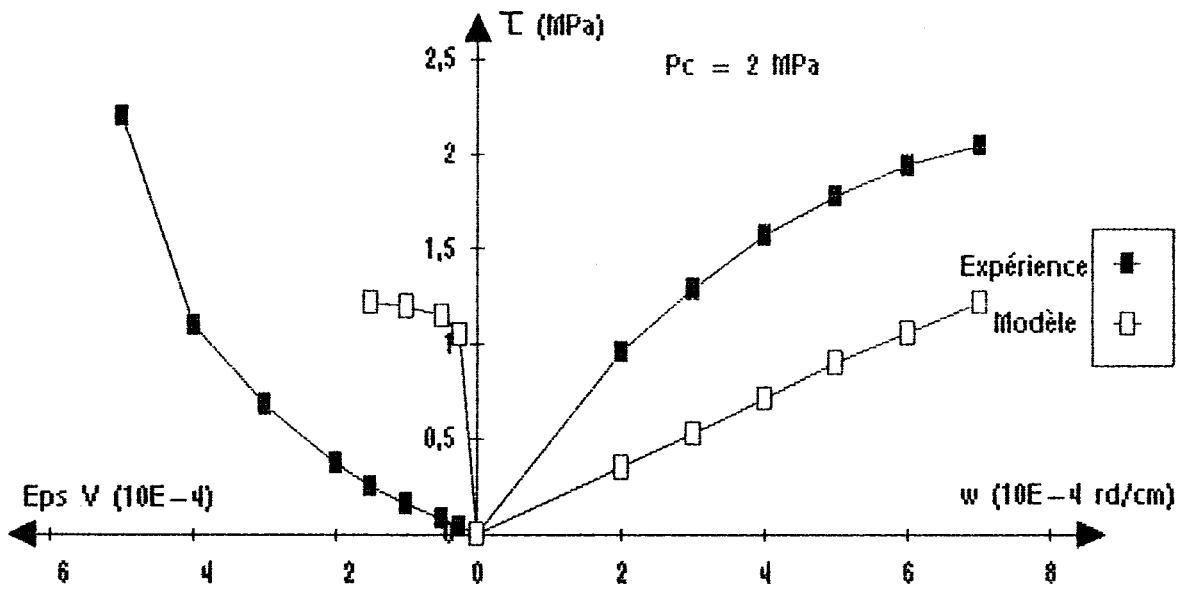


FIGURE 11 - 3 (suite)

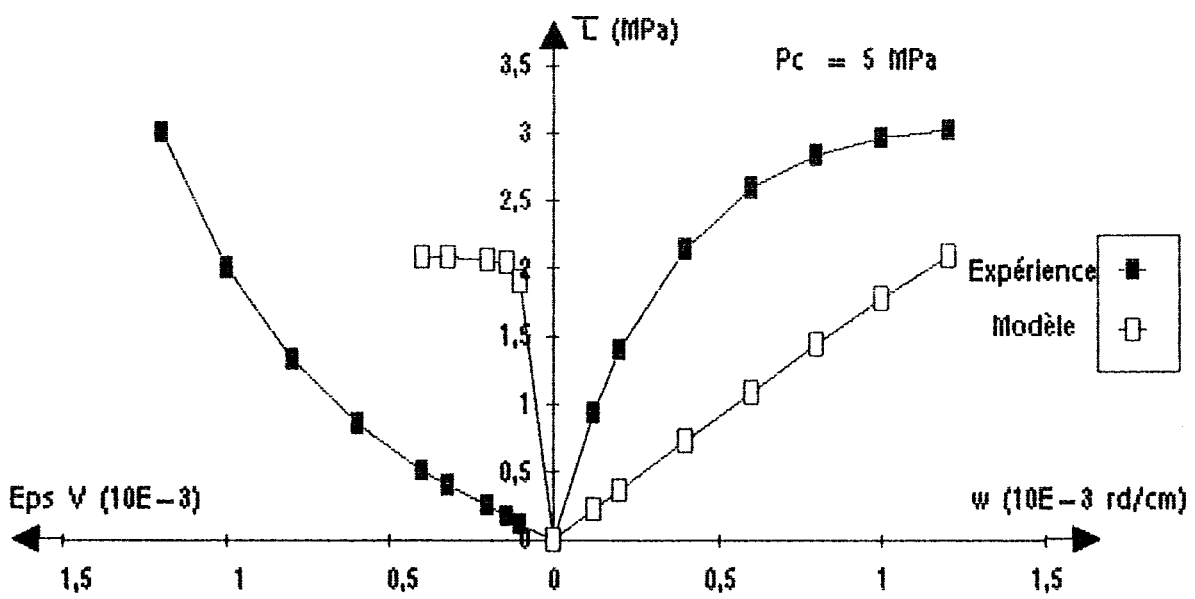


FIGURE 11 - 3 (suite)

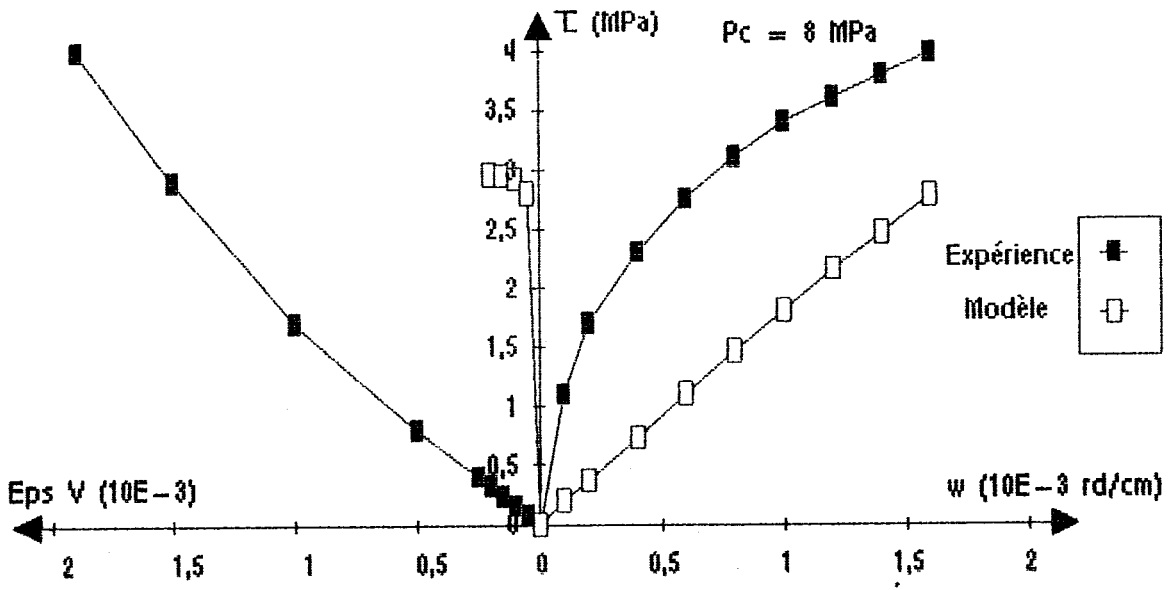


FIGURE 11 - 3 (suite)

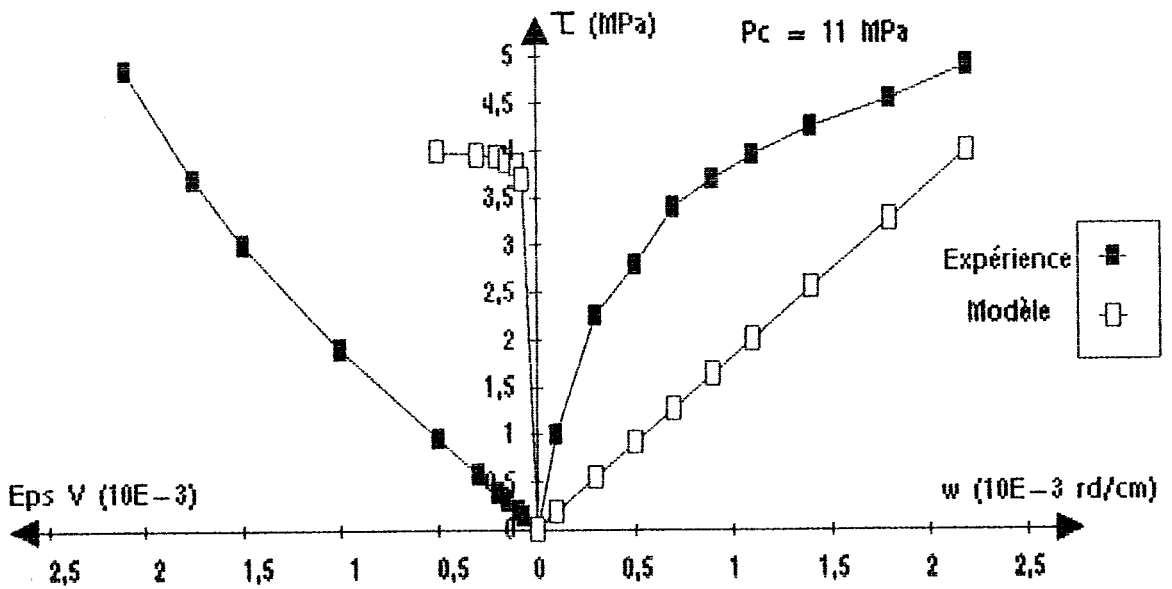


FIGURE 11 - 3 (suite)

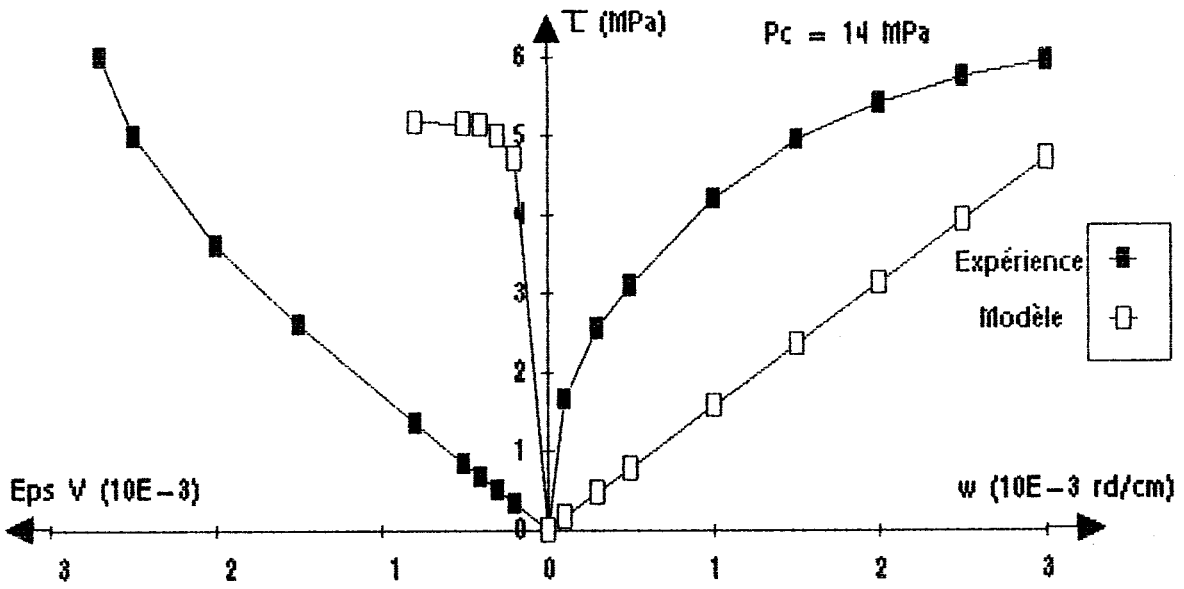


FIGURE 11 - 3 (suite)

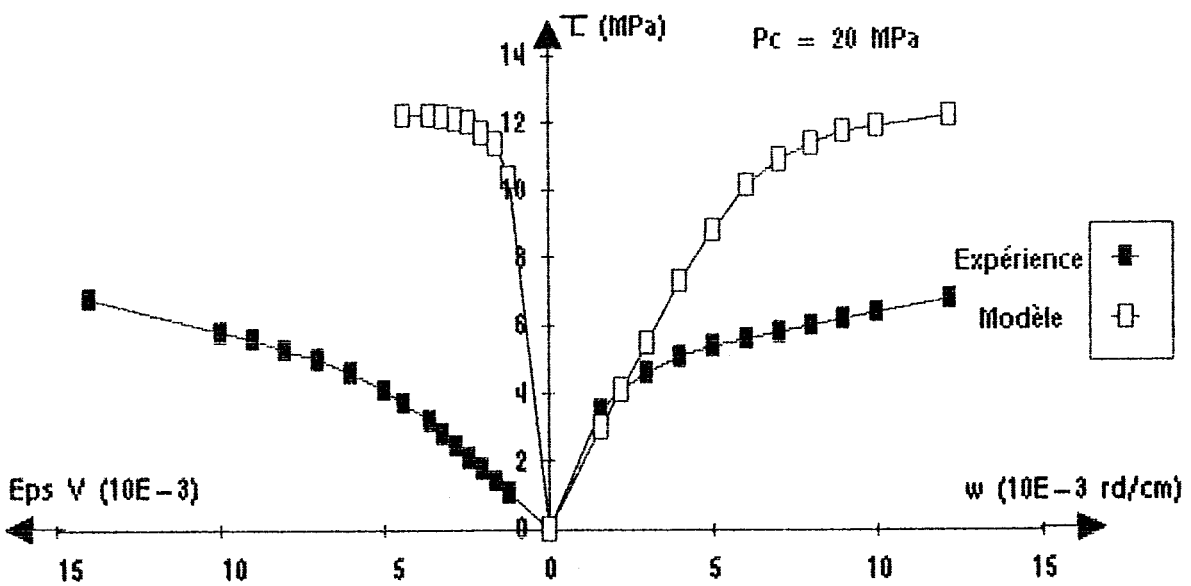


FIGURE 11 - 3 (suite)

II 2 3 - Remarques

A la suite de ces différentes simulations numériques, qui présentent des différences vis à vis des résultats expérimentaux, il ne faut pas négliger le fait que le modèle de LADE a été modifié par SHAO sur la base d'essais ne faisant intervenir que des sollicitations irrotationnelles. De plus, ces sollicitations ne font intervenir en général que les composantes normales du tenseur des contraintes ou des déformations, et non les composantes tangentielles.

Il est également important de souligner que la simulation numérique en torsion est faite suivant le rayon moyen, alors que l'expérimentation, réalisée sur cylindre épais, rend l'essai non homogène et entraîne la rotation de deux contraintes principales.

La formulation du modèle ne fait apparaître le tenseur des contraintes que sous la forme des premier et troisième invariants et ne prend pas en compte de façon explicite la relation contrainte-déformation de cisaillement. L'influence de la contrainte principale intermédiaire ne l'est pas davantage. Elle prend toute son importance dès que l'état de contrainte initial, avant application du couple, n'est plus isotrope.

Dans le cas général de l'essai de torsion, les sollicitations appliquées sont tridimensionnelles. Les coefficients d'élasticité, module d'Young, coefficient de Poisson, sont déduits d'essais triaxiaux classiques; il en va de même du module de cisaillement G qui est en relation directe avec le module d'Young. Or la valeur de ce dernier paramètre diffère si l'on se trouve en état de cisaillement. Il est donc important d'introduire une relation directe entre les contraintes de cisaillement et les déformations correspondantes et de définir la loi d'évolution du module de cisaillement qui, au vu des résultats expérimentaux, est non linéaire.

Les variations de volume enregistrées pendant la phase de torsion ne sont pas nulles voire non négligeables. Or si l'on se place en cinématique rotationnelle avec une loi de comportement élastique en petites perturbations, elles sont nulles. Mais elles apparaissent dès que l'on tient compte de la partie quadratique du tenseur des déformations comme l'a montré MURNAGHAN (32).

DESAI (33) et NATEGALL (34) montrent, que pour tenir compte de la non-linéarité matérielle observée, une approche par une méthode de Lagrangien est plus "réaliste" pour retranscrire le comportement en déformation. Quant à la description des rotations et des déformations volumiques, il est vraisemblable qu'il faille introduire dans la cinématique la composante rotationnelle, c'est-à-dire la partie antisymétrique du tenseur des déformations, et la notion de dérivée matérielle. Le choix de cette dernière est fonction du comportement observé et du matériau. Qui plus est, cette phase modélisation et simulation du comportement des géomatériaux en torsion ne peut s'entendre que par le biais d'une méthode numérique comme celle des éléments finis en 3 dimensions.

CONCLUSION

La première série d'essais réalisés sur l'appareillage de torsion-compression concerne une craie blanche du Nord de la France. La craie, en général, est un matériau au comportement rhéologique complexe lié principalement à sa forte porosité.

Une étape expérimentale importante dans l'étude de ce matériau, qui apparaît de plus en plus au coeur des problèmes géotechniques, consiste en la réalisation d'essais de torsion sous compression hydrostatique. Les premiers résultats ainsi obtenus doivent permettre par la suite de mieux comprendre l'influence d'un champ de contraintes normales déviatorique et non-homogène sur le comportement au cisaillement d'une roche.



Les essais réalisés sur la craie de LEZENNES montrent une forte dépendance du comportement en torsion avec l'intensité de pression hydrostatique. Lorsque celle-ci se situe dans la première zone linéaire de la courbe de compressibilité, on constate une augmentation progressive du couple et des déformations angulaire et volumique à la rupture avec la pression isotrope. Il en est de même pour le module d'élasticité transversal qui croît de façon sensible. Dans le cas d'une pression hydrostatique supérieure, le matériau subit alors un état de grandes déformations sans augmentation significative de l'effort de cisaillement à la rupture. Enfin, on obtient des hélices de rupture dont l'angle varie et croît avec l'état hydrostatique initial.

Un essai de cisaillement à plan imposé, du type LUNDBORG, donne des résistances à la rupture supérieure à l'essai de torsion pure, où le plan de rupture est libre.

L'application numérique directe du modèle de LADE, adapté par SHAO à l'étude de la craie, donne des résultats différents de ceux obtenus expérimentalement. Ces différences peuvent être dues à l'assimilation numérique du cylindre épais à un rayon de calcul qui correspond au rayon moyen, et aux objectifs initiaux du modèle, qui sont de simuler le comportement de la craie sous sollicitations normales et irrotationnelles.

CONCLUSION GENERALE

Le but de l'expérimentation en laboratoire est de pouvoir reproduire le mieux possible l'état naturel des sollicitations subies par un matériau. Dans le cas des roches, la plupart des essais ne font intervenir que deux contraintes principales différentes dans le cadre de sollicitations irrotationnelles. Or il existe, lors de la réalisation de certains ouvrages, des chemins particuliers, pour lesquels le matériau subit des états de contraintes biaxiaux ou triaxiaux associés à la rotation de contraintes ou de déformations principales. Il apparaît donc nécessaire de développer en laboratoire des essais qui permettent de simuler le plus fidèlement possible ces chemins de contraintes ou de déformations particuliers. L'appareillage de torsion-compression, développé à l'École des Mines de DOUAI, permet désormais de soumettre un matériau rocheux à des sollicitations multiaxiales rotationnelles quasi-statiques. Son principe consiste à appliquer, indépendamment et simultanément, sur un échantillon cylindrique creux, un effort de compression axial, un moment de torsion et des pressions latérales intérieure et extérieure pouvant être différentes. Cette indépendance des quatre efforts et la souplesse d'utilisation de l'appareillage par programmation rendent possible la description de très nombreux chemins de contraintes tridimensionnels. Ces chemins permettent d'obtenir la variation des trois contraintes principales et la rotation de deux d'entre elles.

Les diamètres de l'échantillon cylindrique permettent de s'affranchir des problèmes d'échantillonnage et de confection d'éprouvettes. La paroi épaisse du cylindre permet de concilier l'encastrement de l'échantillon, nécessaire en torsion, et la réalisation des essais en conditions drainées ou non drainées.

Cependant, l'épaisseur de la paroi rend l'essai non homogène, tout au moins en torsion, ce dont il faut tenir compte dans le dépouillement des résultats expérimentaux. L'élançement de l'éprouvette permet de limiter de façon appréciable les effets de bords dus aux encastrements.

La gamme d'efforts maximum développés par l'appareillage permet de couvrir la plupart des applications à petites et moyennes profondeurs dans le cadre de la mécanique des roches. Cependant, la réalisation d'un tel essai de torsion-compression sur cylindre creux reste une opération délicate qui nécessite une très longue préparation. La confection des

éprouvettes et leur montage en cellule nécessitent un soin particulier.

L'asservissement de l'appareillage, basé sur un nombre important d'appareils de mesure et de contrôle, permet, par un pilotage précis, de réaliser automatiquement les essais avec une acquisition permanente de la réponse du matériau aux sollicitations appliquées.

Les premiers chemins de contraintes, développés par programmation sur l'appareillage, consistent à solliciter l'échantillon sous différents types de compression : hydrostatique, biaxiale ou triaxiale, avant l'application de l'effort de torsion.

Les essais de torsion-compression hydrostatique, réalisés sur un grès des Vosges, ont permis de comparer différentes techniques de mesure des déformations du matériau. Cette calibration indique une mesure correcte des déformations axiale et angulaire de l'échantillon, et la nécessité de réaliser les essais, en condition drainée, avec une contre-pression de saturation non nulle.

La première série d'essais de torsion a été réalisée sur une craie du Nord de la France qui présente une forte porosité. Le matériau est soumis à une compression hydrostatique avant l'application monotone jusqu'à la rupture d'un moment de torsion. Il se dégage des résultats expérimentaux une forte dépendance de la réponse en torsion avec la pression hydrostatique. La craie présente, lors du cisaillement, une faible zone de comportement linéaire suivie d'un important écrouissage du matériau jusqu'à la rupture. Pour de faibles contraintes hydrostatiques, la craie présente un comportement fragile. L'augmentation de la pression isotrope entraîne, en torsion, un comportement ductile de la craie accompagné d'un état de grandes déformations. Ces essais mettent également en évidence l'influence, au niveau de la courbe de compressibilité du matériau, de la zone dans laquelle se situe l'intensité de compression hydrostatique.

Un essai à plan de cisaillement imposé, du type **LUNDBORG**, donne des résistances à la rupture supérieures à celles obtenues en torsion pure où le plan de cisaillement est libre.

La simulation des essais de torsion-compression hydrostatique précédemment réalisés, à l'aide du modèle de **LADE-SHAO**, a nécessité la

détermination des paramètres du modèle sur la base des essais de caractérisation de la craie. Cette simulation présente une différence avec les résultats expérimentaux obtenus en torsion. Cette différence peut s'expliquer, d'une part par les conditions géométriques retenues lors de la simulation numérique, et d'autre part par le fait que le modèle est initialement prévu pour simuler le comportement de la craie sous sollicitations normales et irrotationnelles. Il sera certainement nécessaire, ultérieurement, de simuler les essais de torsion sur cylindre épais à l'aide de la méthode des éléments finis développée de manière tridimensionnelle et dans le cadre d'une cinématique rotationnelle.

Enfin, des améliorations sont à apporter à cet appareillage. La première consiste en une modification du piston de la cellule, afin de supprimer totalement l'étape de rééquilibrage de l'effort de la pression de confinement sur le piston. Ce rééquilibrage nous limite actuellement à un effort de compression hydrostatique de 20 MPa. Cette modification permettra d'utiliser alors pleinement la puissance de compression du vérin axial. Une autre amélioration consiste à instrumenter l'intérieur de la cellule, afin de mesurer les déformations radiales intérieure et extérieure de l'échantillon, et de pouvoir comparer les déformations volumiques globales avec les déformations locales de l'éprouvette.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) **ALARCON A., CHAMEAU J.L., LEONARDS G.A.**
A new apparatus for investigating the stress strain characteristics of sand.
Géotechnical Testing Journal G.TJODT. Vol19 N°4
(1986)
- (2) **BAZANT Z.P. & AL**
Large triaxial Torsional machine with
hygrothermal Control.
Matériaux et Constructions Vol 19. N° 112
(1981)
- (3) **BAZANT Z.P., HESS J.D. and NEIRI S.**
Hight temperature triaxial-torsional testing
machine for concrete and rock.
Geophysical Research Letters Vol 8 N°7 (1981)
- (4) **BÖKER R.**
Die Mechanick der bleibenden Formänderungen
in kristallinisch aufgebauten Körpern.
Ver. Deut. Ing. MH Forshungsarbeiten (1915)
- (5) **BRICE L.P.**
Etude des conditions de formation des fissures
de glissement et de décohésion dans le solides.
TRAVAUX (Juin 1954)
- (6) **CHEHADE R.**
Contribution à l'étude du comportement
des matériaux pulvérulents sous des
sollicitations rotationnelles.
Réalisation d'un appareillage de
torsion.
Thèse de Doctorat - USTL (1989)

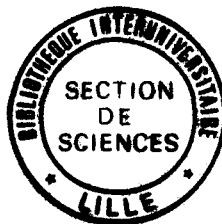
- (7) **F. DARVE**
Une formulation incrémentale des lois
rhéologiques.
Applications aux sols.
Thèse Doctorat es Sciences - GRENOBLE (1978)
- (8) **DESAI C.S., SALAMI M.R.**
A constitutive model and associated testing for
soft Rock.
Int J.T.M. - Vol. 24 N°5 - P 299-307 (1987)
- (9) **DUC J., BELLET D.**
Problèmes d'élasticité.
CEPADUES Editions (1977)
- (10) **DURAND E.**
Comportement des roches à la torsion.
Application à l'étude de la stabilité des exca-
vations souterraines.
Thèse Docteur Ingénieur - NANCY I (1973)
- (11) **GOODE C.D. & HELMY S.A.**
The strenght of concrete under combined tensile
and compression stress.
Mag. of Concrete Research N° 19 (1967)
- (12) **GRIGGS D.T.**
Deformation of Rocks under high confining
pressure.
J.Geology - Vol 44 N°5 (1936)

- (13) **HANDIN J., HIGGS D., O'BRIEN J.**
Torsion of Yule Marble under confining pressure.
Publication N° 132. Shell Development Company
TEXAS (1960)
- (14) **HIGHT D.W., GENS A. and SYMES M.J.**
The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress-rotation in soils.
Géotechnique Vol 33 N°4 (1982)
- (15) **KERGUIGNAS M., CAIGNAERT G.**
Résistance des matériaux.
DUNOD Université (1977)
- (16) **KHARCHAFI M.**
Contribution à l'étude du comportement des matériaux granulaires sous sollicitations rotationnelles.
Thèse de Doctorat - Ecole Centrale Paris (1988)
- (17) **LADE P.V.**
Elastoplastic stress strain model, parameter evaluation, and predictions for dense sand.
Mechanics and structures department.
University of California - LOS ANGELES (1979)
- (18) **LADE P.V.**
Three parameter failure criterion for concrete.
J.E.M. - Vol. 104 - P 850 - 863 (1982)

- (19) **LEBLANC A.- BOUMADHI M.- HENRY J-P.**
Etude et réalisation d'un triaxial vrai de grande capacité.
Journées AUM Nantes (1987)
- (20) **MROZ Z.- NORRIS V.A.- ZIENKIEWICZ O.C.**
An anisotropic, critical state model for soils subject to cyclic loading.
Géotechnique 31.N°4. P 451-469 (1981)
- (21) **PANET M.**
Analyse de la stabilité d'un tunnel creusé dans un massif rocheux en tenant compte du comportement après la rupture.
Rock Mechanics - Vol 8 - P209 - 223 (1976)
- (22) **PREVOST J., SIWAK J.M.**
Le développement d'un appareillage de torsion-compression sur cylindres creux de roches.
9ème Congrès Français de Mécanique
METZ (Septembre 1989)
- (23) **SALENCON J.**
Mécanique des milieux continus Tome I.
Editions Ellipses (1988)
- (24) **Y.SATO, F.NAGAI**
Influences of hydrostatic pressure and stress distribution on rupture of Marble cylinder in torsion.
Bulletin of the J.S.ME. Vol17 N° 107
(Mai 1974)

- (25) **SHAO J.F.**
Etude du comportement d'une craie blanche
très poreuse et modélisation.
Thèse de Doctorat - U S T L (1987)
- (26) **SHAO J.F., HENRY J.P.**
Comportement et modélisation d'une roche
poreuse (craie) jusqu'à des pressions de
confinement de 50 MPa.
20 ans du Groupe Français de Rhéologie
Paris (1985)
- (27) **SHAO J-F., HENRY J-P.**
Validation of an elastoplastic model for chalk.
Computers and Geotechnics 9 - P 257 - 272
(1990)
- (28) **SHAO J-F, DAHOU A., HENRY J-P.**
Application de la théorie des problèmes
inverses à l'estimation des paramètres
des modèles rhéologiques.
Revue Française de Géotechnique (1991)
- (29) **SIWAK J-M., PREVOST J.**
Essais de torsion sur cylindre creux de
roche.
GRECO - Géomatériaux
LE PRADET (Décembre 1990)
- (30) **SYMES M.J., HIGHT D.W. and GENS A.**
Investigating anisotropy and the
effects of principal stress rotation
and the intermediate principal stress
using a hollow cylinder apparatus.
IUTAM Conference on deformation and
failure of granular materials.
DELFT (1982)

- (31) **SYMES M.J., GENS A., HIGHT D.W.**
Discussion géotechnique Vol 35 N° 1
(1935)
- (32) **MURNAGHAN F.D**
Finite Deformation of an Elastic Solid.
John Wiley and Sons, INC - (1951)
- (33) **DESAI C.S. - PHAN H.V.**
Three dimensional finite element analysis
including material and geometric non
linearities
Computational methods in Non Linear
Mechanics edited by J.T. ODEN - North
Holland
- (34) **J.C. NAGTEGAAL - J.E. de JONG**
Some computational aspects of elastic plastic
large strain analysis
Computational methods in Non Linear
Mechanics edited by J.T. ODEN - North
Holland



RESUME :

Un nouvel appareillage de torsion-compression sur échantillon de roche a été développé. Il permet d'appliquer sur un cylindre creux, de façon indépendante et simultanée, un moment de torsion, un effort de compression axial et des pressions de confinement latérales intérieure et extérieure.

L'instrumentation importante de l'appareillage permet de réaliser avec précision un pilotage en force ou en déplacement. Les essais peuvent être effectués en conditions drainées ou non drainées, avec une acquisition permanente des mesures expérimentales.

Les premiers chemins de contraintes développés consistent en une compression hydrostatique, biaxiale ou triaxiale de la roche avant l'application de l'effort de torsion.

Des essais de torsion-compression hydrostatique, effectués sur un grès des Vosges, ont permis de comparer différentes techniques de mesure et d'acquisition.

La première série d'essais de torsion-compression hydrostatique a été réalisée sur une craie blanche du Nord de la France. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence de la pression hydrostatique sur le comportement en torsion de la craie.

La simulation des essais effectués sur la craie a été réalisée à l'aide du modèle élastoplastique à deux surfaces de charge de LADE, modèle adapté par SHAO à l'étude de la craie. La comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation numérique a été effectuée.

ABSTRACT :

A new torsion-compression equipment on a rock sample was developed. It makes it possible to apply independently and simultaneously on a hollow cylinder a torsional moment, an axial compression stress and lateral inside and outside confinement pressures.

The important instrumentation of the equipment makes it possible to have a precise piloting in strength or displacement. The tests can be carried out in drained or undrained conditions with a permanent acquisition of the experimental measures.

The first developed paths of stresses consist in a hydrostatic, biaxial or triaxial compression of the rock before applying the torsional stress.

Hydrostatic torsion-compression tests, carried out on a sandstone from the Vosges, made it possible to compare different techniques of measurement and acquisition.

The first series of hydrostatic torsion-compression tests was made on a white chalk from the North of France. The results obtained have shown the influence of the hydrostatic pressure on the torsion behaviour of chalk.

The simulation of the tests carried out on the chalk was made thanks the two load surfaces model of LADE, adapted by SHAO for the study of chalk. The comparison between the experimental results and those obtained by numerical simulation was made.

MOTS CLES :

TORSION-COMPRESSION
CYLINDRE CREUX
SOLLICITATIONS ROTATIONNELLES

NON HOMOGENEITE
CRAIE
LOI DE COMPORTEMENT