

Titre: Détermination de la résistance en compression uniaxiale et du
Title: module d'élasticité d'un matériau poreux à l'aide d'un essai de poinçonnement

Auteur: François Ferland
Author:

Date: 1999

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Ferland, F. (1999). Détermination de la résistance en compression uniaxiale et du
Citation: module d'élasticité d'un matériau poreux à l'aide d'un essai de poinçonnement
[Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/8567/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie:
PolyPublie URL: <https://publications.polymtl.ca/8567/>

**Directeurs de
recherche:** Maria-Helena Leite
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

**DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE ET
DU MODULE D'ÉLASTICITÉ D'UN MATÉRIAU POREUX À L'AIDE D'UN
ESSAI DE POINÇONNEMENT**

**FRANÇOIS FERLAND
DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL,
GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
AVRIL 1999**



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-42905-9

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

**DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE ET
DU MODULE D'ÉLASTICITÉ D'UN MATÉRIAU POREUX À L'AIDE D'UN
ESSAI DE POINÇONNEMENT**

présenté par: **FERLAND François**

en vue de l'obtention du diplôme de: **Maîtrise ès sciences appliquées**

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. **TANGUAY Marc G.**, Ph.D., président

Mme **LEITE Maria Helena**, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. **GILL Denis E.**, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier M^{me} Maria-Helena Leite, professeur au département des génies civil, géologique et des mines. Sa patience et son sens de l'enseignement ont grandement contribué à la réalisation de ce projet. Le support financier s'est avéré fort apprécié, j'en suis reconnaissant.

Mes sincères remerciements à M. André Ducharme, technicien et responsable du laboratoire de mécanique des sols de l'École, pour m'avoir appris à travailler convenablement, rien de moins.

Finalement je voudrais remercier M. Francis Gagnon pour ses conseils tout à fait à propos dans le domaine de la programmation.

RÉSUMÉ

L'objectif de ce mémoire est de vérifier l'applicabilité, sur un matériau ductile et poreux, d'un modèle d'interprétation de l'essai de poinçonnement pour déterminer le module d'élasticité et la résistance en compression uniaxiale. Un paramètre de déformabilité, le module d'enfoncement permanent, est présenté pour des fins de corrélation avec des valeurs de résistance en compression uniaxiale déterminées par l'essai de compression conventionnel.

La méthode fait l'usage d'un poinçon sphérique obtus et implique une mise en charge cyclique, à incrément constant, qui permet de mesurer les déplacements élastiques et plastiques qui sont associés à l'enfoncement du poinçon. Le module d'élasticité est calculé en faisant la moyenne des modules sécants au déchargement alors que la résistance en compression uniaxiale est obtenue à partir d'un modèle faisant intervenir l'enfoncement permanent du poinçon. Le module d'enfoncement permanent (MEP) est présenté comme un paramètre pouvant être utilisé pour estimer la résistance en compression uniaxiale essentiellement à partir de la géométrie du poinçon et de son enfoncement permanent.

Un programme de 214 essais de poinçonnement et 39 essais de compression uniaxiale effectués sur un matériau dont la porosité variait de 40% à 70% a été mené en laboratoire. Les valeurs de résistance en compression uniaxiale prédites par l'essai de poinçonnement se confondent aux valeurs obtenues par les essais conventionnels. Le rapport entre le module d'enfoncement permanent et la résistance en compression uniaxiale déterminé par l'essai conventionnel est à toutes fins pratiques constant pour le fuseau de porosités testé. Les résultats indiquent que l'essai de poinçonnement sous-estime le module d'élasticité par rapport à l'essai de compression uniaxiale.

ABSTRACT

The purpose of this research is to verify the applicability, on a very porous and ductile material, of an indentation test that can estimate the Young's modulus and the uniaxial compressive strength. A parameter, the *module d'enfoncement permanent* (MEP), is presented in this research for the purpose of establishing a possible correlation between indentation test results and uniaxial compressive strength determined by standard test methods.

The proposed test method implies cyclic loading using a constant load increment throughout the test procedure. In this manner indenter penetration can be analyzed in its elastic and plastic components. The Young's modulus is obtained by calculating the average secant modulus of the unloading part of the load-penetration curve while the unconfined compressive strength is determined by a model of interpretation that makes use of the permanent penetration caused by indenter loading. The permanent penetration modulus (MEP) is presented in this research as a mean to properly estimate the unconfined compressive strength of rock by resorting mainly on indenter geometry and its permanent penetration.

A laboratory test program consisting in 214 indentation tests and 39 unconfined compressive tests was performed on a material for which the porosity would range from 40% to 70%. Good agreement between the unconfined compressive strength results determined by both conventional and indentation tests was found. The ratio between MEP and unconfined compressive strength was practically constant for the range of porosity tested indicating a possible correlation. However the proposed indentation test tends to underestimate the Young's modulus in comparison to values obtained by the conventional method.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xii
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
LISTE DES ANNEXES	xvii
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Mise en situation.....	1
1.2 Objectif de la recherche.....	3
1.3 Méthodologie.....	5
CHAPITRE 2 : REVUE DE LA LITTÉRATURE	6
2.1 Préambule.....	6
2.2 Comportement de la roche en poinçonnement.....	8
2.2.1 Roches fragiles.....	8
2.2.2 Roches poreuses.....	11
2.3 Enfouissement permanent.....	17
2.4 Enfouissement élastique.....	20
2.5 Résistance en compression uniaxiale et essais de poinçonnement.....	22
CHAPITRE 3 : MODÈLE D'INTERPRÉTATION UTILISÉ.....	25
3.1 Généralités.....	25
3.2 Modèle d'interprétation proposé.....	26
3.2.1 Détermination du module d'élasticité.....	26

3.2.2 Module d'enfoncement permanent.....	28
3.2.3 Résistance en compression uniaxiale	31
CHAPITRE 4 : MÉTHODE EXPÉRIMENTALE	39
4.1 Généralités.....	39
4.2 Description des échantillons.....	39
4.3 Déroulement des essais.....	46
4.3.1 Essais de compression uniaxiale	46
4.3.2 Essais de poinçonnement	47
CHAPITRE 5 : RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	50
5.1 Résultats des essais de compression uniaxiale conventionnels.....	51
5.2 Résultats des essais de poinçonnement	55
5.2.1 Module d'enfoncement permanent (MEP).....	56
5.2.2 Module d'élasticité (E).....	58
5.2.3 Résistance en compression uniaxiale (C_0).	59
CHAPITRE 6 : DISCUSSION	62
6.1 Module d'élasticité.	62
6.2 Résistance en compression uniaxiale	65
6.3 Module d'enfoncement permanent.	69
6.4 Effet de confinement.	71
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	76
BIBLIOGRAPHIE	79

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Représentation schématique du poinçonnement d'un roche fragile	12
Figure 2.2	Courbe charge-enfoncement d'une roche fragile	12
Figure 2.3	Représentation schématique de poinçonnement d'une roche poreuse	16
Figure 2.4	Courbe charge-enfoncement pour un essai de poinçonnement modifié	19
Figure 2.5	Détermination du rayon de l'aire projetée sur la surface de poinçonnement par un poinçon sphérique	21
Figure 3.1	Courbe contrainte-déformation pour matériau poreux	32
Figure 3.2	État des contraintes sous un poinçon cylindrique, matériau poreux	33
Figure 3.3	Photo d'essai de poinçonnement. Zone d'écoulement plastique	38
Figure 4.1	Échantillons de compression uniaxiale et de poinçonnement	45

Figure 4.2	Mise en évidence de la porosité des échantillons testés	45
Figure 4.3	Montage de l'essai de compression uniaxiale	49
Figure 4.4	Montage de l'essai de poinçonnement	49
Figure 5.1	Résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité, essais conventionnels	54
Figure 5.2	Module d'élasticité en fonction de la porosité, essais conventionnels	54
Figure 5.3	Variation du MEP en fonction du cycle de chargement, essais BC_1 à BC_10	57
Figure 5.4	MEP en fonction de la porosité	57
Figure 5.5	Variation du module d'élasticité en fonction du cycle de chargement, essais BC_1 à BC_10	58
Figure 5.6	Module d'élasticité en fonction de la porosité	59
Figure 5.7	Variation de la résistance en compression uniaxiale en fonction du cycle de chargement, essais BC_1 à BC_10	60
Figure 5.8	Résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité, essais de poinçonnement	61

Figure 6.1	Module d'élasticité en fonction de la porosité. Résultat de tous les essais de compression uniaxiale	63
Figure 6.2	Module d'élasticité en fonction de la porosité. Discrimination de six essais de compression uniaxiale	63
Figure 6.3	Coefficient de variation du module d'élasticité en fonction de la porosité	65
Figure 6.4	Résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité, essais conventionnels et essais de poinçonnement	66
Figure 6.5	Coefficient de variation de la résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité	67
Figure 6.6	MEP et résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité	70
Figure 6.7	Coefficient de variation du MEP en fonction de la porosité	71
Figure 6.8	Effet du confinement sur des roches de porosités différentes	75

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 4.1 Proportions des composantes utilisées pour les mélanges	42
Tableau 4.2 Porosité et volume de polystyrène par mélange	42
Tableau 5.1 Résultats des essais de compression uniaxiale	53
Tableau 5.2 Résultats des essais de poinçonnement	56
Tableau 6.1 Effet d'échelle. Rapport entre la résistance en compression uniaxiale obtenue par l'essai de poinçonnement et la résistance en compression uniaxiale obtenue par l'essai conventionnel, Wagner et Schümann (1971)	68
Tableau 6.2 Indice de pénétration pour différentes contraintes de confinement, Pichette (1979)	72
Tableau 6.3 Indice de pénétration pour différentes contraintes de confinement, Rochon (1979)	73

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

- a :** Rayon d'un cylindre plat, rayon de l'aire chargée projetée d'un poinçon conique sur la paroi poinçonnée.
- C_0 :** Résistance en compression uniaxiale.
- c.v. :** Coefficient de variation.
- D :** Enfoncement permanent associé à l'indice de pénétration de Handewith.
- D_r :** Densité relative des grains solides.
- d :** Enfoncement permanent utilisé pour le calcul de C_0 .
- d_e :** Enfoncement élastique utilisé pour le calcul de E.
- d_p :** Enfoncement permanent utilisé pour le calcul du MEP.
- d_t :** Enfoncement total.
- E :** Module d'élasticité.
- F :** Force appliquée sur un poinçon pour déterminer l'indice de pénétration de Handewith.
- h :** Profondeur de la zone de déformation plastique.

L : Longueur d'un poinçon cylindrique.

MEP: Module d'enfoncement permanent.

M_{pl} : Masse de plâtre.

M_s : Masse du matériau sec.

M_{sa} : Masse de sable.

M_{sat} : Masse de l'échantillon à l'air libre.

M_{sub} : Masse de l'échantillon dans l'eau.

n : Porosité.

n : Nombre de cycles.

P_c : Charge appliquée sur un poinçon conique ou sphéconique.

q_f : Contrainte ultime nécessaire à la progression du faux nez.

R : Rayon de courbure de la pointe sphérique d'un poinçon sphéconique.
Rayon d'un poinçon cylindrique.

V_s : Volume de la phase solide.

V_t : Volume total de l'échantillon.

- V_v : Volume occupé par les vides.
- w : Déplacement élastique d'un poinçon absolument rigide dans un corps semi-infini parfaitement élastique.
- α : Demi angle au sommet d'un poinçon dièdre, conique ou sphéroidal.
Angle sous-tendu par l'arc de cercle formé par la zone plastique.
- β : Demi angle au sommet du faux nez.
- δ : Angle de frottement entre la roche broyée et la roche intacte.
- δ_h : Indice de pénétration de Handewith.
- $\overline{\delta}_h$: Indice de pénétration de Handewith modifié.
- δ_i : Indice de pénétration de Rochon (1979).
- $\delta_{i\text{ mod.}}$: Indice de pénétration modifié de Pichette (1979).
- ν : Coefficient de Poisson.
- ϕ : Angle de frottement interne.
- ρ_t : Masse volumique totale de l'échantillon.
- ρ_w : Masse volumique de l'eau.

σ_1 : Contrainte principale majeure.

σ_2 : Contrainte principale intermédiaire.

σ_3 : Contrainte principale mineure.

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Courbes de compression uniaxiale84

Annexe B : Courbes de poinçonnement124

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en situation

Toute conception d'ouvrage en rocher nécessite la connaissance des propriétés mécaniques du massif et ce, peu importe l'envergure du projet. La résistance de la roche et ses paramètres de déformabilité, l'état des contraintes naturelles ou encore l'état général du massif rocheux (degré de fracturation et résistance de ses discontinuités) sont des paramètres qui peuvent être quantifiés de différentes façons. Cependant la qualité des échantillons, la disponibilité de l'équipement nécessaire, l'importance du budget et le temps pouvant être accordé à de telles investigations sont des problèmes auxquels les ingénieurs sont régulièrement confrontés.

Afin d'optimiser les ressources disponibles, plusieurs méthodes d'investigation de site faisant appel à différents types d'instrumentations ont été développées. Il importe toutefois que leur fonctionnement demeure fiable, que les résultats obtenus soient justes et précis et que la théorie d'interprétation qui leur est associée résiste à la critique.

En 1974 le laboratoire de mécanique des roches de l'École Polytechnique de Montréal a développé, sous la direction de Denis E. Gill, un appareil qui permet d'estimer *in situ* certaines propriétés mécaniques de la roche (Gill et Ballivy, 1976).

Initialement conçue pour prédire la vitesse d'avancement de tunneliers dans les formations géologiques de l'île de Montréal, la sonde procède au poinçonnement de parois de forages. L'essai consiste à mettre en charge un poinçon sphéroidal et d'enregistrer son déplacement. Par des modèles basés sur le mécanisme d'enfoncement du poinçon dans la paroi rocheuse, la résistance à l'enfoncement du poinçon peut être déterminée. En utilisant un modèle mathématique qui permet de décrire l'expansion, dans un milieu fragile et infini (Ladanyi, 1967) d'une cavité sphérique soumise à une pression interne, la résistance à la compression uniaxiale de matériaux fragiles peut être déterminée (Cruz, 1989).

L'appareil est aujourd'hui commercialisé par la compagnie ROCTEST Ltée. sous le nom de BOLO-75 et a été récemment utilisé pour la réalisation d'essais dans le béton (Rancourt, 1996 ; Leite *et al.*, 1997). En effet depuis quelques années, des techniques d'investigation de sites originellement développées pour les roches, notamment des techniques de mesures de contraintes, ont été appliquées avec succès aux ouvrages en béton (Leite *et al.*, 1996 ; Corthésy *et al.*, 1997). Or il existe au Québec un grand nombre d'ouvrages en béton qui datent des années 50 à 70, les barrages faisant partie des complexes hydroélectriques viennent en tête de liste. Un certain nombre de ces composantes de retenues d'eau en béton ont commencé à montrer des signes de détérioration à un point tel que des travaux de réparation se sont avérés nécessaires. Aujourd'hui le monitoring et l'entretien sont plus que jamais essentiels pour assurer la stabilité de ces structures.

La déformabilité et la résistance en compression du béton sont normalement déterminées au laboratoire par des essais de compression uniaxiale et triaxiale d'éprouvettes cylindriques obtenues à partir de forages au diamant. Le matériau de construction en place peut toutefois présenter un comportement ductile suite

à sa détérioration, l'obtention de carottes de forages devient alors problématique ce qui peut mettre en péril un programme d'essais en laboratoire et du même coup compromettre la caractérisation de l'ouvrage.

En 1996 des essais de poinçonnement, à l'aide du BOLO-75, ont été effectués dans la structure de retenue d'eau de la centrale Rapide-des-Quinze (région administrative de La Grande Rivière) pour l'obtention des propriétés mécaniques du béton (Leite *et al.*, 1997). Ces essais ont été réalisés dans des zones de la structure où le prélèvement d'échantillons pour la réalisation d'essais conventionnels au laboratoire s'est avéré impossible.

La campagne d'essais réalisée à la centrale Rapide-des-Quinze a démontré le grand potentiel de cette technique en tant qu'outil d'investigation in-situ pour les ouvrages en béton. Comme il avait été anticipé, le comportement mécanique du béton de mauvaise qualité s'apparentait d'avantage à celui d'un matériau ductile et poreux ayant une résistance à la compression faible qu'à un béton sain, résistant et fragile.

1.2 Objectif de la recherche

À la demande d'Hydro-Québec, lors des travaux à la centrale Rapide-des-Quinze, les essais de poinçonnement au BOLO-75 se sont concentrés dans les zones considérées problématiques. Dans ces zones, il a été impossible de préparer des éprouvettes cylindriques à partir de carottes de forages afin d'effectuer des essais conventionnels. De plus, très peu d'essais au BOLO-75 ont été effectués dans les zones où des échantillons cylindriques ont pu être prélevés pour la réalisation d'essais conventionnels.

Une méthodologie d'interprétation pour le BOLO-75 a été proposée par Cruz (1989) pour calculer le module d'élasticité (E) et la résistance en compression uniaxiale (C_0) mais dans des conditions où la roche encaissante était fragile et non poreuse. À ce jour très peu de modèles dans la littérature s'intéressent au poinçonnement de matériaux poreux. Leite *et al.* (1997) ont proposé l'existence d'une corrélation entre un paramètre appelé le module d'enfoncement permanent (MEP) obtenu par les essais de poinçonnement effectués au BOLO-75 et la résistance en compression uniaxiale obtenue par des essais conventionnels. Toutefois, compte tenu du nombre limité d'essais conventionnels effectué sur le matériau en question, cette corrélation doit être validée. À l'exception du coefficient de Poisson, le calcul du MEP ne requiert pas la connaissance a priori de paramètres intrinsèques du matériau testé tel l'angle de frottement. Le MEP pourrait s'avérer un paramètre utile à la caractérisation in situ de matériaux ductiles et poreux dont l'échantillonnage est difficile à effectuer.

L'objectif de cette recherche est de vérifier, pour un matériau ne présentant pas de rupture fragile et ayant une faible résistance en compression uniaxiale, la validité de différents modèles d'interprétation associés à des essais de poinçonnement pouvant être effectués au BOLO-75. Pour ce faire le module d'élasticité (E) d'un matériau ductile et poreux est évalué selon la méthodologie présentée par Cruz (1989), méthode qui à ce jour n'a été appliquée qu'à des matériaux rigides-fragiles. Ensuite, pour des échantillons de même porosité, le module d'enfoncement permanent (MEP) proposé par Leite *et al.* (1997) est comparé à la résistance en compression uniaxiale déterminée par l'essai conventionnel. Finalement la résistance en compression uniaxiale est calculée directement par l'essai de poinçonnement en appliquant un modèle destiné aux mousses contractantes.

1.3 Méthodologie

Des programmes d'essais de poinçonnement et de résistance en compression uniaxiale ont été élaborés au laboratoire de mécanique des sols de l'École Polytechnique de Montréal afin de déterminer le comportement des trois paramètres étudiés, soit le module d'élasticité, le module d'enfoncement permanent et la résistance en compression uniaxiale, dans un milieu ductile-poreux ayant une faible résistance en compression.

Les essais ont été effectués sur un matériau ductile préparé au laboratoire et dont la porosité, variant de 40% à 70% était contrôlée. Il aura ainsi été possible d'obtenir des matériaux ayant une résistance en compression uniaxiale semblable à celle montrée par les échantillons provenant des zones problématiques de la centrale Rapides-des-Quinze. De plus, le matériau ainsi fabriqué a présenté lors des essais de poinçonnement des courbes charge-enfoncement semblables à celles obtenues in situ pour le béton de la centrale Rapides-des-Quinze.

Au total 214 essais de poinçonnement et 39 essais de compression uniaxiale ont été réalisés.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

2.1 *Préambule*

Les publications relatives aux essais de poinçonnement sont nombreuses et leurs objectifs de natures différentes. Une large part de la littérature traite le sujet dans un contexte de rentabilité économique pour des travaux d'excavation et de forage. Ce type d'article fait appel à des modèles mécaniques sur l'enfoncement d'un poinçon dans un matériau encaissant et tente de prédire un taux de pénétration optimal selon la nature de la roche et la géométrie du poinçon (Handewith, 1970 ; Gill et Ballivy, 1976). Un second groupe d'articles analyse le sujet sur une base fondamentalement descriptive où les contraintes sous le poinçon sont analysées et l'évolution des fissures menant à l'écaillage est décrite. Les auteurs de ces publications développent un modèle mathématique qui repose sur certaines hypothèses (nature du matériau et type de rupture) et procèdent par la suite à un programme expérimental dont les résultats sont comparés à la théorie préalablement proposée (Miller et Sikarskie, 1968 ; Wagner et Schümann, 1971 ; Dutta, 1972 ; Ladanyi, 1968). Finalement on trouve dans la littérature, en moins grande quantité cependant, des articles qui étudient les essais de poinçonnement à des fins comparatives. Ce genre d'essai pouvant être avantageusement comparé aux essais de laboratoire traditionnels, certains auteurs ont tenté de corréler des résultats de poinçonnement avec des résultats de résistance à la compression, tension ou abrasion (Szlavin, 1974 ; Muromachi *et al*, 1988 ; Szwedzicki et Donald, 1996). Les résultats de ces études sont toutefois variables. Ils sont d'ailleurs traités plus en détail à la section 2.5.

La ligne directrice des différentes études sur l'indentation demeure que le matériau testé, dans la majorité des cas, est rigide-fragile. La description physique de la rupture en poinçonnement des milieux poreux est bien documentée mais les références faisant un parallèle avec la résistance en compression de ces matériaux sont rares.

Comme il a été déjà spécifié, la présente recherche traite des déformations élastiques et des déformations plastiques obtenues par le poinçonnement d'un matériau poreux. De plus, l'étude tente de déterminer la résistance en compression uniaxiale obtenue par un essai de poinçonnement en utilisant un modèle qui s'applique à des mousses de polyuréthannes (matériaux très poreux) démontrant un écoulement plastique et un gain en résistance lors des essais de compression conventionnels (Wilsea *et al.*, 1975).

Ce chapitre fait appel aux références qui :

- 1) décrivent le comportement général des matériaux fragiles et ductiles en poinçonnement (section 2.2.)
- 2) ont une application reliée aux déformations plastiques produites par l'enfoncement d'un poinçon (section 2.3)
- 3) ont une application reliée aux déformations élastiques produites par l'enfoncement d'un poinçon (section 2.4)
- 4) font un parallèle entre des résultats obtenus suite à des essais de poinçonnement et des résultats de résistance en compression uniaxiale (section 2.5)

2.2 Comportement de la roche en poinçonnement

Différents mécanismes de rupture, basés sur des critères de résistance linéaire (Pariseau et Fairhurst ; 1967) ou parabolique (Cheatham, 1964), ont été proposés dans le but d'étudier le principe de fracturation d'une roche poinçonnée. Il a été établi que l'enfoncement d'un poinçon dans la roche dépend largement de la géométrie du poinçon et des paramètres intrinsèques de la roche (Miller et Sikarskie, 1968 ; Johnson, 1970 ; Dutta, 1971 ; Kou *et al*, 1998). L'expérience en laboratoire démontre que la résistance d'une roche à son poinçonnement varie selon la nature de la roche, son environnement et le taux de chargement appliqué. Or si le travail de laboratoire est rigoureusement contrôlé et que seule la nature du matériau testé varie, il en découle que le comportement d'une roche en poinçonnement est fonction de sa fragilité (ou ductilité) et de sa porosité (Ladanyi, 1968).

2.2.1 Roches fragiles

Le poinçonnement des roches fragiles est abondamment documenté. La géométrie des poinçons utilisés est soit sphérique (Miller et Sikarskie, 1968 ; Chenevert et Dwarakanath, 1993), conique (Ladanyi, 1968 ; Lundberg, 1974 ; Szlavín, 1974), cylindrique (Ladanyi, 1968 ; Wagner et Schumann, 1970), dièdre (Johnson, 1969) ou sphéconique (Cruz, 1989 ; Swedzicki et Donald, 1996).

Il existe cependant un consensus quant à la description qualitative du poinçonnement d'une roche fragile. Cette représentation ne semble pas être associée à l'enfoncement d'un poinçon à géométrie précise mais plutôt comme l'application d'une charge concentrée.

Selon Kou (1998), Chenevert et Dwarakanath (1993) et Gill *et al.* (1980) on assiste, dès les premiers instants de l'application de la charge, à l'écrasement des irrégularités à la surface de poinçonnement suivit d'une étape où la roche est déformée élastiquement. Alors que la charge augmente et que les déformations élastiques prennent de l'importance, il se forme, directement sous le poinçon, une zone de matériau broyé appelé "faux nez". Cette zone, qui est le centre des premières déformations permanentes, se crée à un niveau de charge relativement faible et augmente en volume si on intensifie la charge appliquée.

La forme de ce faux nez, en 2 dimensions, est décrite par certains auteurs comme étant arrondie (Ladanyi, 1968) ou dièdre (Gill *et al.*, 1980). Dutta (1972) propose une forme intermédiaire où les deux plans de part et d'autre de l'axe de symétrie seraient légèrement courbés, conséquence de l'angle de frottement entre le faux nez et le poinçon. Plus la charge appliquée augmente et que le volume de la zone broyée prend de l'importance, plus les contraintes communiquées à la roche intacte augmentent. Au delà d'une certaine limite, le faux nez (zone broyée) cesse de prendre de l'envergure et se comporte à nouveau comme un matériau rigide et transmet la totalité des contraintes à la roche encaissante toujours intacte (Dutta, 1972 ; Gill *et al.*, 1980 ; Kou, 1998). À ce moment un incrément de charge sur le poinçon provoque un état d'instabilité dans la zone intacte créant des fissures de tension autour du faux nez (voir figure 2.1). Tan *et al.* (1994) décrivent la propagation des premières fissures à l'aide d'un modèle constitutif bidimensionnel. Ils en déduisent que les fissures se développent initialement à une distance critique du poinçon, soit à l'extérieur du faux nez. La distribution des contraintes sous le poinçon, fonction de la géométrie de celui-ci, déterminerait le patron de fissuration.

Quand les fissures atteignent la surface libre, la roche encaissante ne peut plus appliquer une contrainte de confinement latérale de sorte qu'il y a rupture par tension et écaillage de la roche entourant le poinçon.

Si après un premier écaillage on poursuit le chargement, le même processus prendra place jusqu'à ce qu'il y ait un deuxième écaillage et ainsi de suite.

Sur la courbe charge-enfoncement obtenue à partir d'un essai de poinçonnement en continu (voir figure 2.2) on peut facilement identifier les étapes d'écaillage qui sont représentées par des discontinuités.

Paul et Sikarskie (1965) ont proposé un modèle permettant de prédire la charge nécessaire à l'écaillage d'un matériau fragile lorsqu'un poinçon dièdre était utilisé. Ce modèle a été repris par Miller et Sikarskie (1968) et appliqué à des poinçons sphériques, coniques et pyramidaux. Lundberg (1974) a également repris le modèle de Paul et Sikarskie pour l'appliquer à une série de poinçons coniques dont l'angle au sommet variait de 60° à 150° . Tous ces modèles utilisent un critère de rupture de type Mohr-Coulomb et il est admis que la charge au premier écaillage est fonction de la géométrie du poinçon et de l'angle de frottement du matériau (ϕ).

Dutta (1972) a repris le modèle de Paul et Sikarskie et développé une théorie permettant de prédire les charges associées aux différentes étapes d'écaillage lors d'un essai de poinçonnement en continu. Les charges nécessaires à l'écaillage sont estimées à partir des valeurs de résistance en compression uniaxiale de la roche.

Gill *et al.* (1980) font toutefois remarquer que même si les modèles proposés par Miller, Sidarskie et Dutta surestiment largement les valeurs de chargement à l'écaillage, il serait en principe possible de définir des indices obtenus à partir d'essais de poinçonnement en fonction de la résistance en compression uniaxiale.

2.2.2 Roches poreuses

Des chercheurs liés à l'industrie du pétrole ont développé des modèles constitutifs qui permettent de prédire les comportements pré-effondrement et post-effondrement des roches poreuses typiquement rencontrées dans les réservoirs de pétrole.

Zaman *et al.* (1994) proposent un modèle constitutif qui se base sur des concepts d'élasto-plasticité et de durcissement isotrope. Suite à une série d'essais triaxiaux, de compression uniaxiale et de compression hydrostatique sur des échantillons de calcaire poreux, Zaman *et al.* décrivent sommairement les trois étapes qui se déroulent avant, pendant et après l'effondrement des pores.

Initialement, une roche poreuse répondra aux contraintes imposées de façon élastique. L'étape pré-effondrement peut être décrite par le module d'élasticité (E) et le coefficient de Poisson (ν) du matériau. À un niveau de contrainte plus élevé les pores commencent à se briser. La compaction des pores se fait pour une contrainte déviatorique quasi constante, les déformations étant dues à la rupture des liens de cimentation intergranulaires. Finalement, après l'étape de compaction, suit une période de durcissement du matériau, période pendant laquelle une légère augmentation de la résistance est observée.

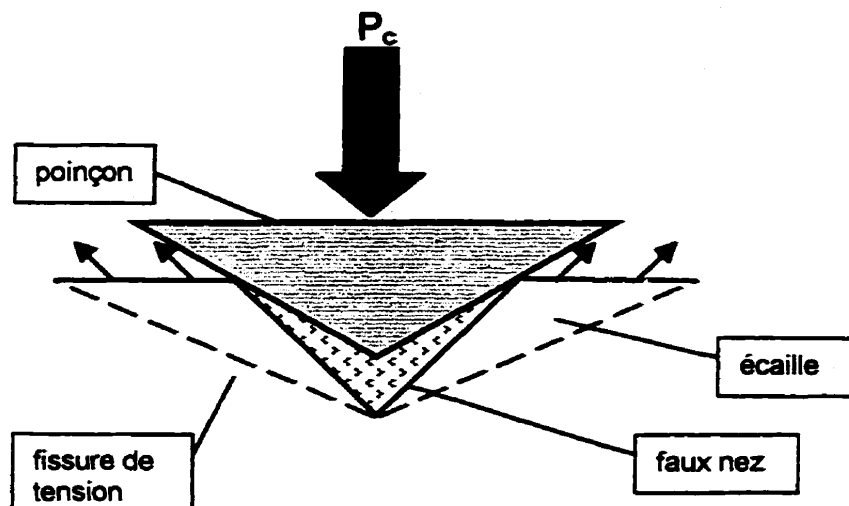


Figure 2.1 Représentation schématique du poinçonnement d'une roche fragile.

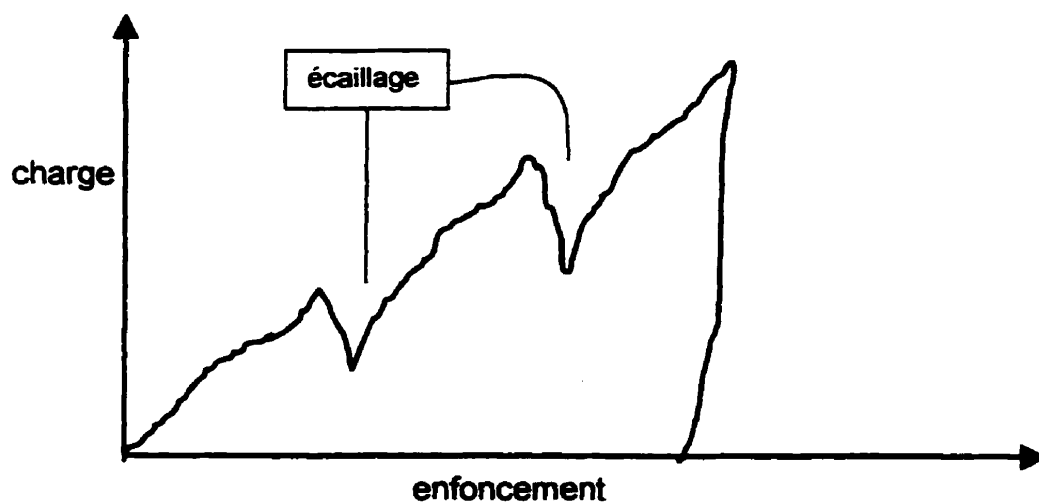


Figure 2.2 Courbe charge-enfacement d'une roche fragile. Poinçonnement continu.

Suite à des essais de poinçonnement réalisés sur des calcaires poreux, Thiercelin et Cook (1988) ont décrit les zones élastique et plastique qui sont associées à l'enfoncement d'un poinçon dièdre effilé. Les descriptions ont été faites à partir d'observations au microscope à balayage électronique d'échantillons préalablement saturés de résine d'époxy.

Selon Thiercelin et Cook (1988), la zone élastique subit un champ de contrainte qui est communiqué par une zone de compression plastique située directement sous le poinçon. Elle renferme d'importantes fissures de tension qui se propagent entre les grains parallèlement à l'orientation de la contrainte principale majeure.

La zone plastique quant à elle comprend deux sous régions qui présentent des comportements différents. Loin du poinçon, des microfissures de tension intragranulaires sont observées. Leur direction est similaire à celle observée pour les fissures de tension présentes dans la zone élastique. Ces microfissures, qui provoquent une dilatance de la roche, ne cheminent pas de sorte à former plusieurs grandes fissures puisque la géométrie du problème ne le permet pas. Ces conditions géométriques font que la contrainte principale mineure de cette région augmente. La rupture des grains provoque une perte de cohésion. Plus près du poinçon, des bandes de cisaillement aux directions aléatoires sont formées. Les grains de cette région sont complètement pulvérisés et la cohésion, tout comme la porosité, est pratiquement nulle.

Selon Suarez-Rivera *et al.* (1991) les modèles appliqués aux roches poreuses doivent tenir compte d'une expansion radiale de la zone plastique car un modèle rigide-plastique ne peut expliquer convenablement les déformations obtenues en poinçonnement. Ce développement radial de la zone de compaction dépend de la pénétration du poinçon et des déformations élastiques de la matrice encaissante. Il décrit le mode de rupture sous le poinçon comme étant une compaction due à l'effondrement des pores. À l'intérieur de la zone plastique (de compaction), les contraintes augmentent jusqu'à ce que la porosité minimale soit atteinte. À ce stade il n'y a plus de compaction possible et la zone plastique transmet la totalité des contraintes du poinçon à la roche encaissante. Le champ de contraintes et le mode de rupture sont alors indépendants de la géométrie du poinçon. Finalement, si la charge du poinçon est augmentée, il y aura formation de fissures de tension macroscopiques à la limite entre les zones plastique et élastique. Ces fissures progresseront dans la zone poreuse de la roche dans une direction parallèle à la contrainte principale majeure (voir figure 2.3).

Toujours selon Suarez-Rivera *et al.* (1990), des essais de poinçonnement ont été effectués sur des briques réfractaires dont la porosité s'établissait à 65% en utilisant différents poinçons (cylindrique plat, demie sphère et conique). Le poinçonnement d'un matériau de ce type ne génère pas d'écaillage ni aucun autre type de déformation macroscopique en surface. Le volume de matériau déplacé par le poinçon est compensé par le broyage de la matrice encaissante et par le remplissage de ses pores. La zone de compaction (plastique) sous chaque type de poinçon est de forme généralement sphérique et d'apparence claire, distincte de la zone élastique. Près du poinçon la structure poreuse du matériau disparaît pour faire place à une zone compactée. À proximité de la limite entre les zones broyée et élastique on note une augmentation rapide de la porosité jusqu'à sa valeur originale.

Les courbes charges-enfoncement obtenues suite à des essais faisant usage de différentes formes de poinçons confirment qu'à mesure où celui-ci s'enfonce et que la zone de compaction se développe, la géométrie du poinçon ne semble pas influencer le processus d'enfoncement qui, à ce stade, est contrôlé par la zone de compaction.

Wilsea *et al.* (1975) ont procédé à des essais de poinçonnement sur des mousses de polyuréthane dont le coefficient de Poisson variait de 0.04 à 0.10 avec des poinçons cylindriques et sphériques. Les auteurs développent un modèle qui permet d'évaluer la contrainte principale majeure caractérisant le seuil d'écoulement à partir des essais de poinçonnement. Le modèle se base sur le comportement d'un matériau contractant lorsque sollicité en compression uniaxiale. Un tel matériau doit présenter les caractéristiques suivantes à mesure que les déformations sont enregistrées :

1. Un régime élastique linéaire pour de faibles déformations.
2. Écoulement lorsque la contrainte principale majeure atteint une valeur critique (σ_y).
3. Déformation continue du matériau pour une valeur de contrainte principale majeure constante $\sigma_1 = \sigma_y$. La déformation est indépendante des contraintes principales intermédiaire et mineure. À ce stade-ci il y a effondrement de la structure poreuse du matériau.
4. Durcissement prononcé du matériau lorsque celui-ci est complètement compacté. Gain appréciable de la résistance en compression.

Selon le modèle proposé la géométrie de la zone de compaction située immédiatement sous le poinçon est, dans le plan de la section droite, de forme sphérique. Au contact de cette zone avec matériau encaissant, la contrainte principale majeure est égale à la limite d'écoulement σ_y .

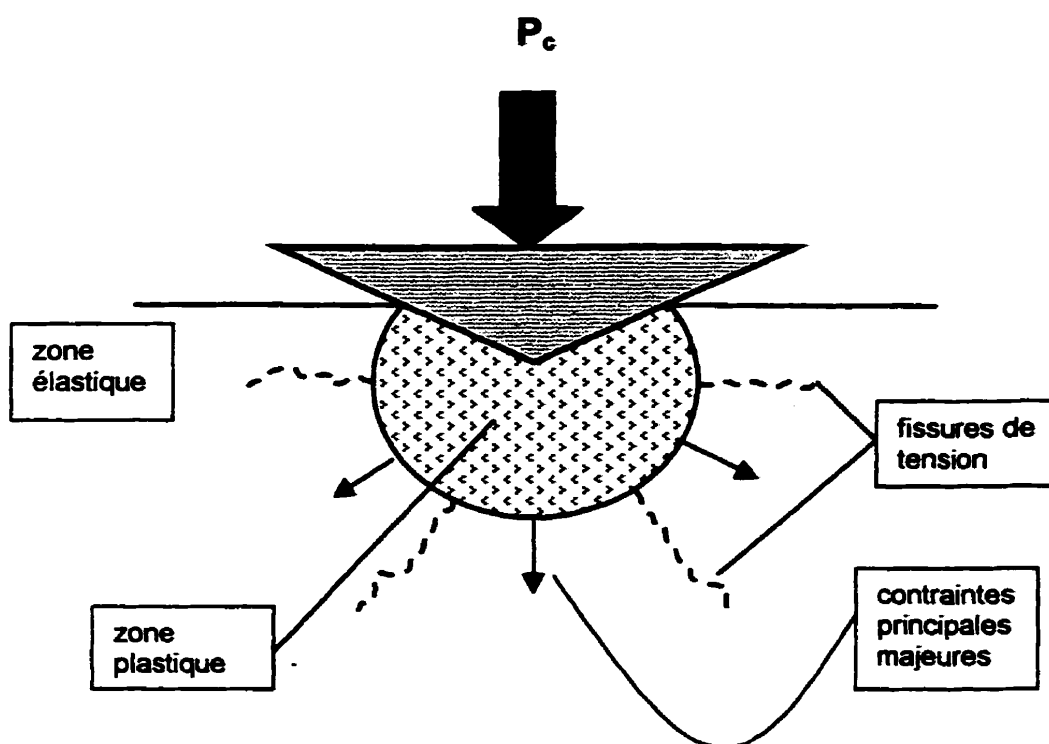


Figure 2.3 Représentation schématique du poinçonnement d'une roche poreuse.

2.3 *Enfoncement permanent*

Le paramètre d'enfoncement permanent associé aux différents essais de poinçonnement a été utilisé à quelques reprises dans des modèles analytiques liant la charge appliquée sur le poinçon au comportement plastique d'une roche. Cheatham (1964) procède à une analyse qui permet d'évaluer la charge nécessaire pour que l'enfoncement d'un poinçon dans une roche provoque un écoulement plastique. Le modèle de Cheatham suppose que le seuil d'écoulement plastique de la roche est défini par une enveloppe de Mohr parabolique. Pariseau et Fairhurst (1967) proposent un modèle pouvant prédire la courbe caractéristique de la relation charge-déplacement d'un poinçon dièdre dans un milieu plastique ayant une enveloppe de rupture linéaire et qui ne présente pas de durcissement post-pic. Les relations développées par Cheatham (1964) et Pariseau et Fairhurst (1967) ne permettent pas d'estimer la résistance en compression du matériau poinçonné.

L'enfoncement permanent d'un poinçon a également été considéré pour des applications plus pratiques, relevant du domaine de la forabilité des roches pour des ouvrages d'excavation. Handewith (1970) propose un essai dont le chargement d'un poinçon sphéroidal se fait par cycles et pour lequel l'enfoncement à atteindre, pour chaque cycle, est déterminé d'avance et augmente d'une valeur constante. Un indice de pénétration est défini comme suit :

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{D_i} \quad (2.1)$$

où F_i est la charge maximale pour chaque cycle, D_i est l'enfoncement permanent de chaque cycle et n est le nombre de cycles.

Gill et Ballivy (1976) ont développé une sonde qui permet de reprendre l'essai de Handewith. La méthode utilisée est toutefois différente en ce sens qu'un incrément de charge plutôt que d'enfoncement est appliqué à chaque cycle. L'essai est terminé lorsque la charge maximale de l'appareil est atteinte ou si le poinçon a parcouru sa course totale.

En se référant à de nombreux résultats expérimentaux (Lafrance, 1978 ; Pichette, 1978 et Rochon, 1980), Gill *et al.* (1980) ont modifié l'indice de pénétration proposé par Handewith (équation 2.1). Afin d'éliminer l'effet de contact, les premiers cycles de l'essai sont ignorés. De plus, l'essai de poinçonnement se limite à tenir compte des cycles obtenus avant le premier écaillage. La formule de l'indice de pénétration devient :

$$\overline{\delta}_n = \frac{1}{m-l} \sum_{k=l}^m \frac{P_{ck} - P_{c(k-1)}}{d_{pk} - d_{p(k-1)}} \quad (2.2)$$

où l est le premier cycle considéré, m est le dernier cycle considéré, P_{ck} est la charge pour le cycle k et d_{pk} est l'enfoncement permanent pour le cycle k .

Pour le même indice de pénétration, Cruz (1989) propose de poser un incrément de charge qui permet d'obtenir au moins une dizaine de cycles avant l'écaillage afin de calculer une moyenne arithmétique représentative (figure 2.4)

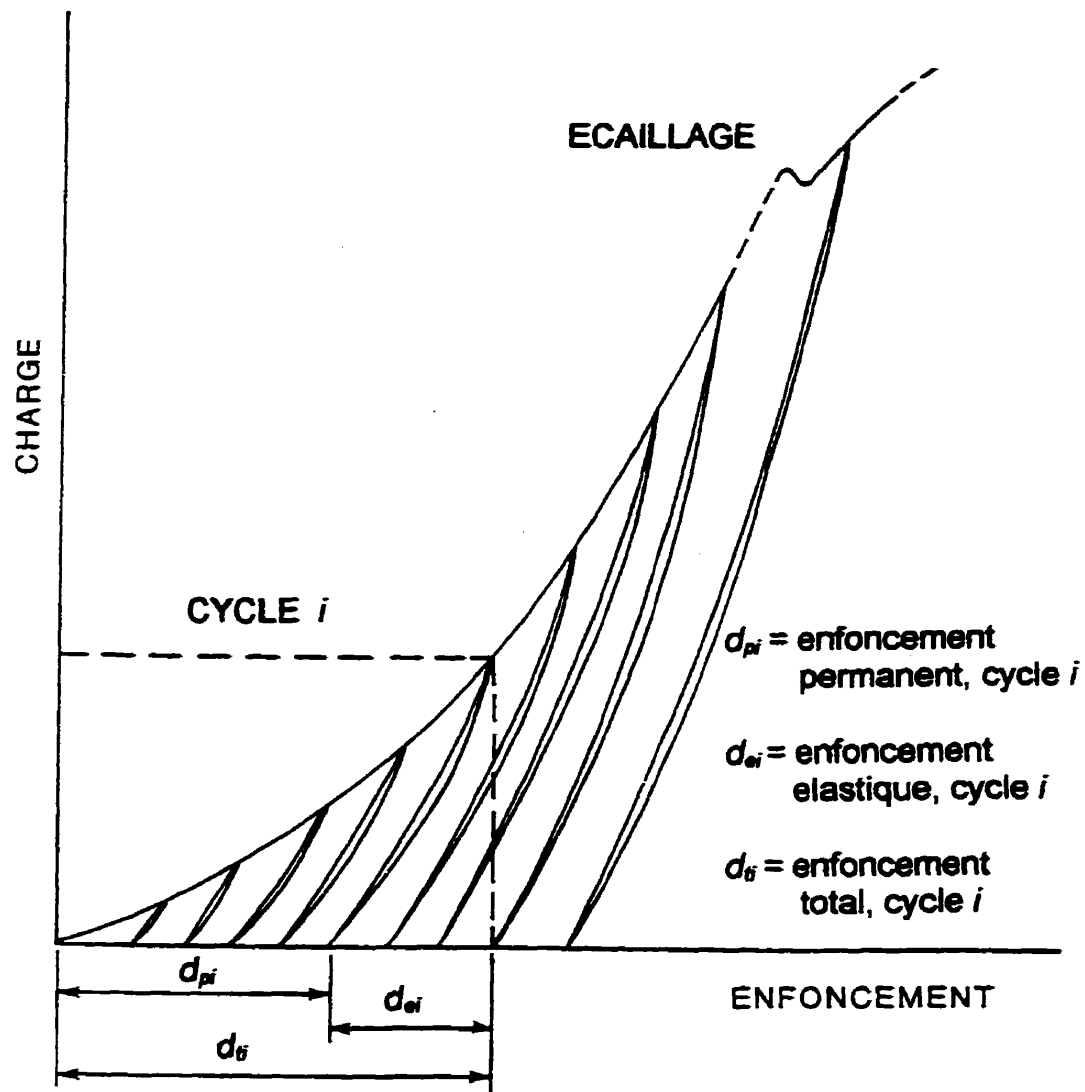


Figure 2.4 Courbe charge-enfoncement pour un essai de poinçonnement modifié, Cruz (1989).

2.4 Enfoucement élastique

Il est possible de déterminer l'enfoncement élastique d'un poinçon cylindrique plat, dans une masse homogène et continue. En faisant appel à la théorie classique de l'élasticité (Timoshenko et Goodier, 1951), la relation s'écrit :

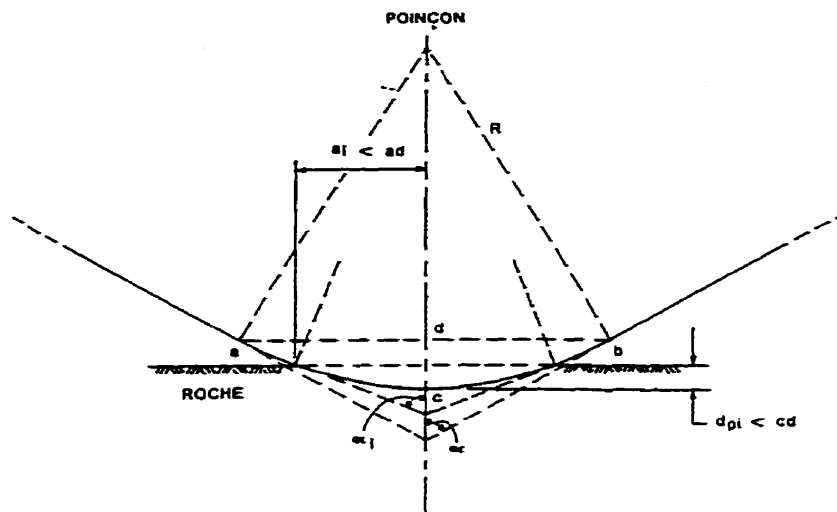
$$d_e = \frac{F (1 - \nu^2)}{2 E a} \quad (2.3)$$

où d_e est l'enfoncement élastique, F est la charge appliquée par le poinçon, ν est le coefficient de Poisson, E est le module d'élasticité et a est le rayon de l'aire de projection du cylindre plat. Cette équation a été reprise par Wagner et Schümann (1971) et Johnson (1970) et modifiée par Cruz (1989) afin de l'adapter à un poinçon de géométrie sphéconique.

Cruz propose d'utiliser l'enfoncement élastique associé à chaque cycle de l'essai de poinçonnement et d'en calculer la moyenne afin d'obtenir une valeur moyenne du module d'élasticité pour un certain nombre de cycles considérés.

La géométrie du poinçon étant sphéconique, il importe de définir le rayon de l'aire chargée (a_i) en fonction de l'enfoncement du poinçon. Au début de l'essai seule la partie sphérique du poinçon est en contact avec le matériau (voir figure 2.5). Pour que la partie conique entre en contact avec le matériau, une valeur précise de déformation permanente doit être atteinte. Les équations permettant de calculer le rayon de l'aire chargée (a_i) en fonction de l'enfoncement du poinçon et de sa géométrie sont présentées au chapitre 3.

a)



b)

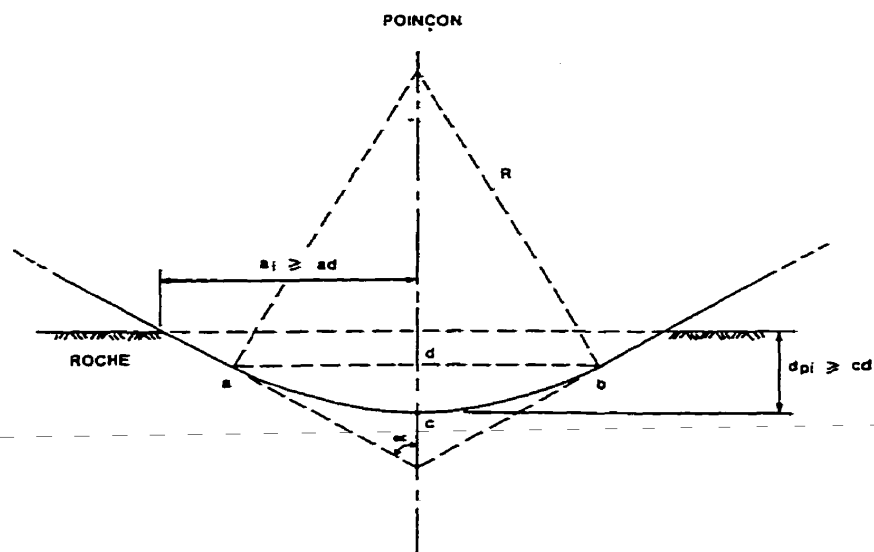


Figure 2.5 a) Détermination du rayon de l'aire chargée projetée sur la surface poinçonnée dans le cas où la pointe sphérique n'est pas entièrement enfoncée. b) La pointe sphérique est complètement enfoncée. Tiré de Cruz (1989).

2.5 Résistance en compression uniaxiale et essais de poinçonnement

L'essai de poinçonnement devient particulièrement avantageux lorsque la caractérisation d'un matériau doit être réalisée in situ et que ces essais doivent être effectués en grand nombre dans un voisinage rapproché. L'importance pratique d'établir une corrélation entre la résistance en compression uniaxiale et un paramètre de résistance au poinçonnement est mentionnée dans la littérature scientifique, cependant les résultats varient sensiblement selon la nature des matériaux testés.

Ladanyi (1968) conclut, suite à une revue de la théorie relative aux roches poreuses et à différentes données expérimentales, que les matériaux très poreux, lorsque mis en charge par un poinçon cylindrique plat, subissent les premières déformations plastiques quand cette charge atteint une valeur voisine de la résistance en compression uniaxiale.

Wilsea *et al.* (1975) mettent en relation la dureté effective au poinçonnement de mousses rigides contractantes avec la limite d'écoulement en compression simple en utilisant des poinçons cylindriques et sphériques. Leur modèle implique une zone de compression de forme circulaire en plan sous le poinçon qui se développe lorsque la contrainte principale majeure qui se trouve à la limite entre les domaines plastique et élastique atteint la limite d'écoulement du matériau en compression simple. Il devient possible d'estimer la résistance en compression uniaxiale d'un matériau très poreux selon ce modèle si l'on considère que les déformations plastiques se produisent lorsque la charge appliquée par le poinçon se rapproche de la résistance en compression uniaxiale du matériau (Ladanyi, 1968) en considérant la limite d'écoulement égale à la résistance en compression uniaxiale. Le modèle de Wilsea *et al.* (1975) est présenté en détails au chapitre 3.

Des cylindres plats dont le diamètre variait de 3.8 à 30.5mm ont été utilisés par Wagner et Schumann (1971) dans le but d'illustrer l'effet d'échelle entre la résistance en compression obtenue en poinçonnement (σ_{st}) et la résistance en compression uniaxiale (σ_c) de roches fragiles et de roches poreuses (grès). Les résultats expérimentaux démontrent que, pour des roches fragiles, le rapport (σ_{st} / σ_c) tend vers quatre si le diamètre du poinçon est augmenté et que pour des roches plus poreuses, ce rapport se maintient à des valeurs voisines de quatre peu importe les dimensions du poinçon. De plus seules les roches poreuses montrent un durcissement post-pic en poinçonnement.

Des programmes d'essais de laboratoire ont été réalisés par Szlavin (1974) et Swedzicki et Donald (1996) dans le but de déterminer s'il existe une relation entre l'indice de pénétration d'une roche et sa résistance en compression uniaxiale. Selon Szlavin, qui ne fait aucune distinction par rapport à la nature de la roche, si le nombre d'essais est suffisant pour calculer une moyenne arithmétique, une corrélation linéaire existe entre la résistance en compression uniaxiale d'une roche et son indice de pénétration. Swedzicki et Donald concluent qu'une corrélation entre les deux types d'essais existe seulement pour des roches dont la résistance en compression uniaxiale dépasse 100 MPa.

Chenevert et Dwarakanath (1993) reconnaissent pour leur part qu'une relation linéaire existe entre l'indice de pénétration obtenu en laboratoire et la résistance en compression uniaxiale pour des métapélites. L'essai de pénétration fait usage d'un poinçon sphérique pour lequel le rayon de courbure est de 2.3mm et dont le déplacement maximale est de 0.25mm.

Des essais de poinçonnement in-situ ont été réalisés à l'aide d'une sonde par Muromachi *et al.* (1988). Un indice de pénétration q_{co} est défini comme étant la charge requise pour enfoncer un poinçon conique ayant un angle au sommet de 90° sur une profondeur de 0.5cm. Des conglomérats peu compétents et des pierres ponce dont l'indice N de l'essai de pénétration standard variaient entre 30 et 50 ont été testées in situ et en laboratoire pour déterminer q_{co} et la résistance en compression uniaxiale, C_o . Selon Muromachi *et al.*, l'indice de pénétration q_{co} ne peut être comparé directement à C_o de façon concluante.

CHAPITRE 3

MODÈLE D'INTERPRÉTATION UTILISÉ

3.1 Généralités

L'objectif de cette recherche est de caractériser un matériau ductile et poreux à l'aide d'un essai de poinçonnement. Plusieurs paramètres d'une roche peuvent être estimés par un poinçonnement in situ ou d'échantillons en laboratoire. Au chapitre 2, une attention particulière a été portée aux modèles d'interprétation qui permettent d'estimer le module d'élasticité (E), l'indice de pénétration (δ) et la résistance en compression uniaxiale (C_0). Cet ouvrage reprend la méthode expérimentale proposée par Gill *et al.* (1980). Le modèle présenté par Cruz (1989) qui permet de calculer le module d'élasticité en poinçonnement des roches fragiles et non poreuses est repris intégralement et appliqué à des matériaux ductiles et poreux. La résistance en compression uniaxiale est calculée suivant le modèle proposé par Wilsea *et al.* (1975) qui implique la formation d'une zone de déformation plastique arrondie sous le poinçon lors du poinçonnement de matériaux très poreux tels des mousses.

Les paramètres mesurés (E , MEP, C_0) sont calculés par un essai de poinçonnement cyclique avec un poinçon sphérique obtus. Le déroulement de l'essai est le même que celui présenté par Gill *et al.* (1980) et est décrit à la section 4.3.2 du mémoire.

3.2 *Modèle d'interprétation proposé*

3.2.1 Détermination du module d'élasticité

La méthode de calcul du module d'élasticité expliquée brièvement à la section 2.4, est reprise plus en détail dans la présente section.

L'application d'une force sur un poinçon peut être analysée de la même façon que le cas plus général d'une force concentrée agissant sur la surface limite d'un corps semi-infini. Selon la théorie de l'élasticité, il est possible de déterminer par superposition les déplacements et les contraintes produites par une distribution de forces.

Si on considère le poinçon comme étant absolument rigide par rapport au matériau testé, on peut calculer le déplacement élastique du poinçon en fonction de la charge appliquée par la relation :

$$d_e = \frac{P (1 - \nu^2)}{2 \alpha E} \quad (3.1)$$

où d_e est défini comme étant le déplacement du poinçon dans le sens de l'application de la charge.

Pour calculer le module d'élasticité, l'équation développée par Cruz (1989) est utilisée soit:

$$E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{0.5 F_i (1 - \nu^2)}{d_{ei} a_i} \quad (3.2)$$

où E est le module d'élasticité moyen pour un point donné, n est le nombre de cycles considérés, F_i est la charge maximale appliquée sur le poinçon au cycle i , ν est le coefficient de Poisson, d_{ei} est l'enfoncement élastique au cycle i et a_i est le rayon de la projection verticale de l'aire chargée à la surface de poinçonnement.

Pour calculer le rayon de l'aire projetée sur la surface libre on doit tenir compte de l'enfoncement du poinçon et de sa géométrie (voir figure 2.5). On utilise les équations suivantes :

$$a_i = R \sqrt{1 - \left(\frac{R - d_{pi}}{R} \right)^2} \quad (3.3)$$

si $d_{pi} \leq R(1 - \sin \alpha)$

sinon :

$$a_i = \left[R \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\sin \alpha} \right) + d_{pi} \right] \tan \alpha \quad (3.4)$$

L'enfoncement élastique d_{ei} est obtenu avec la partie de déchargement de chaque cycle, comme montré à la figure 2.4.

Rancourt (1996) propose d'ignorer les 3 premiers cycles de la courbe charge-enfoncement pour le calcul du module d'élasticité afin d'éviter une variation démesurée des résultats due à l'effet de contact initial. Cette observation s'avère juste lorsque l'essai de poinçonnement est effectué sur une roche dure.

Dans de telles conditions, l'enfoncement du poinçon pour les premiers cycles est très superficiel, l'aire sur laquelle la charge est appliquée étant petite, les irrégularités à la surface de poinçonnement peuvent avoir une incidence marquée sur les résultats. Pour les matériaux poreux la même analyse démontre que les premiers cycles de chargement induisent un enfoncement du poinçon plus profond que pour le poinçonnement de roches dures, cependant une grande variation dans les résultats de certains paramètres mesurés démontre que, malgré un enfoncement plus profond lors des premiers cycles, l'effet de contact doit être considéré dans le calcul du MEP et du C_0 .

Dans le cadre de cette recherche le coefficient de Poisson (ν) est déterminé à partir des résultats d'essais de compression uniaxiale où les déformations radiales sont mesurées. Si le coefficient de Poisson ne peut être déterminé par des essais conventionnels, il est possible de postuler une valeur raisonnable sans trop affecter la qualité des résultats. À ce sujet Cruz (1989) démontre que l'erreur introduite dans les calculs est inférieure, dans le cas le plus défavorable à 9% si on considère que le coefficient de Poisson des roches est rarement compris à l'extérieur de la plage 0.10 – 0.35.

3.2.2 Module d'enfoncement permanent

L'indice de pénétration représente la force nécessaire pour faire avancer le poinçon de façon permanente. Plusieurs auteurs ont défini de différentes façons l'indice de pénétration (Wagner et Schumann, 1971 ; Chenevert et Dwarakanath, 1993) pour ensuite tenter de le corrélérer avec la résistance en compression uniaxiale.

L'indice de pénétration proposé par Handewith s'applique aux essais de poinçonnement cycliques et se calcule par l'expression suivante :

$$\delta_h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_i}{d_{pi}} \quad (2.1)$$

où δ_h est l'indice de Handewith, F_i est la charge au cycle i et d_{pi} est l'enfoncement permanent associé au cycle i . Cet indice se calcule selon un incrément de pénétration de 0.02 pouce (0.51mm) pour chaque cycle. L'essai se termine lorsque la pénétration permanente atteint 0.1 pouce (2.54mm).

Gill *et al.* (1980) ont modifié l'indice de Handewith en procédant à des incréments de charge plutôt qu'à des incréments de pénétration. De plus, pour que l'essai soit applicable à des roches plus faibles au poinçonnement et que l'indice de pénétration soit facilement répété pour un même type de roche, Gill *et al.* (1980) proposent de considérer uniquement les cycles qui sont compris entre le moment où l'effet de contact disparaît et l'écaillage.

L'indice devient :

$$\overline{\delta_h} = \frac{1}{m-l} \sum_{k=l}^m \frac{P_k - P_{c(k-1)}}{d_{pk} - d_{p(k-1)}} \quad (2.2)$$

où l est le premier cycle considéré, m est le dernier cycle considéré, P_c est la charge pour le cycle k et d_p est l'enfoncement permanent pour le cycle k .

Cet indice de pénétration s'applique à des roches pour lesquelles il y a formation d'un faux nez sous le poinçon et écaillage. Or pour les matériaux ductiles et très poreux il n'y pas d'écaillage mais bien une pénétration complète du poinçon due à la rupture des pores dans la zone plastique. La progression du poinçon et conséquemment, les déformations plastiques, seraient fonction de la résistance en compression uniaxiale (C_o) du matériau.

Afin d'interpréter les résultats d'essais in situ lors de la caractérisation des structures de retenue d'eau de la centrale Rapide-des-Quinze de l'Hydro-Québec, étude de caractérisation qui a fait usage du même essai de poinçonnement, Leite *et al.* (1997) ont défini un module d'enfoncement permanent (MEP) comme :

$$MEP = \sum_{i=1}^n \frac{F_i (1 - \nu^2)}{2 a_i d_{pi}} \quad (3.5)$$

L'équation 3.5 se base sur le modèle d'enfoncement d'un poinçon cylindrique plat absolument rigide dans un matériau élastique semi-infini défini à la section 3.2.1 (équation 3.1). À l'instar du modèle élastique, les déformations et les contraintes produites par une distribution de forces sont déterminées par le même principe de superposition, la constante de rigidité est remplacée par le module d'enfoncement permanent et le déplacement élastique par le déplacement plastique.

3.2.3 Résistance en compression uniaxiale

L'approche utilisée pour déterminer la résistance en compression uniaxiale par un essai de poinçonnement prend en considération les résultats publiés par Suarez-Rivera *et al.* (1990) relatifs au poinçonnement de briques réfractaires, à savoir :

- Il n'y a pas d'écaillage lors du poinçonnement de matériaux très poreux.
- Le volume du poinçon pénétrant le matériau est accommodé par l'effondrement des pores sous le poinçon.
- Il y a formation d'une zone de compaction arrondie située immédiatement sous le poinçon.
- Lorsque la zone de compaction est complètement formée, la géométrie du poinçon utilisé n'a plus d'incidence sur le processus de poinçonnement.

Le modèle mathématique proposé pour déterminer la résistance en compression uniaxiale par un essai de poinçonnement est présenté par Wilsea *et al.* (1975). Initialement conçu pour des mousses de polyuréthane très poreuses, le modèle est repris intégralement et appliqué pour des essais effectués sur un matériau ductile et poreux fabriqué en laboratoire dont les composantes sont un mélange de plâtre et de sable avec des billes de polystyrène.

Selon Wilsea *et al.* (1975), les matériaux très poreux, lorsque soumis à une compression axiale, ne s'étendent que très peu latéralement ; leur coefficient de Poisson étant de l'ordre de 0.05. Conséquemment de tels matériaux s'écoulent de façon plastique sous un état de contraintes multi-axiale lorsque la contrainte principale majeure σ_1 atteint une valeur σ_y . La figure 3.1 illustre une courbe

idéalisée contrainte-déformation d'un matériau poreux en compression uniaxiale.

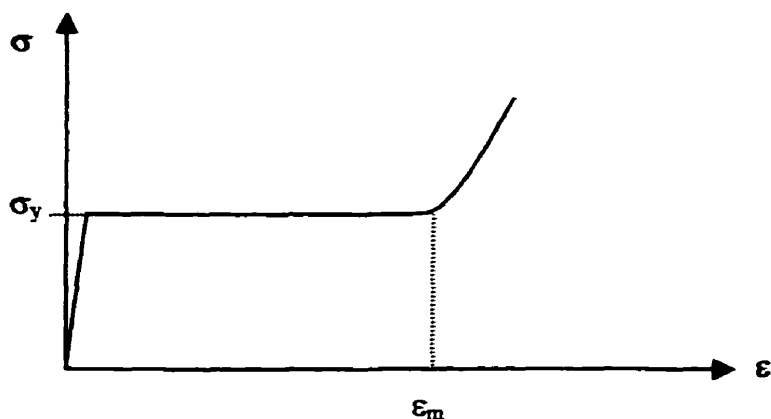


Figure 3.1 Courbe typique contrainte-déformation pour un matériau poreux montrant du durcissement.

L'écoulement plastique (effondrement des pores) se produit lorsque $\sigma_1 = \sigma_y$. Indépendant des contraintes principales intermédiaires et mineure, σ_2 et σ_3 , l'effondrement de la structure est maintenu jusqu'à ce que la déformation ϵ du matériau atteigne ϵ_m , valeur à partir de laquelle l'étape d'écoulement plastique cesse et qu'un gain en résistance en compression apparaisse.

En supposant la charge de poinçonnement uniforme et le matériau comme étant un milieu semi infini parfaitement élastique, Wilsea *et al.* (1975) développe le modèle illustré à la figure 3.2.

En posant l'hypothèse que le matériau passe à un état d'écoulement plastique lorsque la contrainte principale majeure atteint la valeur de σ_y (figure 3.1), l'équation 3.6 devient :

$$\sigma_y = -\frac{P}{2\pi a L}(\alpha_y + \sin \alpha_y) \quad (3.7)$$

où L est la longueur du poinçon cylindrique.

Sous l'arc AEB nous avons $\sigma_1 < \sigma_y$ et le matériau demeure élastique, au dessus du même arc $\sigma_1 > \sigma_y$ et le matériau est comprimé jusqu'à une valeur de déformation égale à ε_m . En se référant à la géométrie de la figure 3.2 et en considérant que le poinçonnement est superficiel et que les déformations élastiques sont faibles, le matériau soumis à une contrainte principale majeure subit une déformation donnée par :

$$\varepsilon = \frac{SQ}{SP} \approx \frac{CD}{CE} \equiv \frac{d}{h} = \text{const.} \quad (3.8)$$

Or pour un poinçonnement superficiel

$$d \approx a^2/2R \text{ et } h = a * \cot(\alpha/2) \quad (3.9)$$

Puisque les déformations élastiques sont considérées beaucoup plus petites que ε_m , la limite entre les domaines plastique et élastique peut être localisée en posant les déformations dans le domaine plastique comme étant égales à ε_m d'où la relation :

$$\varepsilon_m = \frac{d}{h_y} \approx \frac{a}{2R \cot\left(\frac{\alpha_y}{2}\right)} \quad (3.10)$$

Le modèle décrit une zone plastique en forme d'arc de cercle passant par l'arête formée par le contact entre la surface du matériau et le poinçon et dont les déformations sont uniformes et égales à ε_m . Les contraintes dans les zones plastiques et élastiques sont données par l'équation 3.6.

Si un poinçon sphérique est utilisé, l'état des déformations et des contraintes devient axi-symétrique. Les surfaces délimitées par une valeur de contrainte constante ont la forme de sphères tronquées au niveau de la surface du matériau poinçonné. Qualitativement la situation est similaire au cas décrit en 2 dimensions. Les déformations plastiques sont confinées à une fraction sphérique sous le poinçon. Si l'enfoncement du poinçon est dénoté par d et que la profondeur de la sphère tronquée est égale à h_y :

$$\varepsilon_m = \frac{d}{h_y} \approx \frac{a^2}{2Rh} \quad (3.11)$$

donc,

$$\frac{h_y}{a} = \frac{1}{2\varepsilon_m} \frac{a}{R} \quad (3.12)$$

et la contrainte principale majeure orientée selon l'axe centrale à une profondeur h devient :

$$\sigma_1 = \frac{P}{\pi a^2} \left(1 - \frac{\left(\frac{h}{a} \right)^3}{\left[1 + \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (3.13)$$

S'il y a écoulement plastique pour $\sigma_1 = \sigma_y$ et que, par hypothèse, la résistance en compression uniaxiale du matériau testé, C_o , est atteinte lorsque les déformations plastiques débutent (Ladanyi, 1968), nous avons l'égalité $\sigma_y = C_o$ et l'équation 3.13 devient :

$$C_o = \frac{P}{\pi a^2} \left(1 - \frac{\left(\frac{h}{a} \right)^3}{\left[1 + \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (3.14)$$

Comme l'on verra au chapitre 5, le comportement en compression uniaxiale du matériau testé, étant donné sa grande porosité, s'approche d'avantage au comportement idéalisé montré à la figure 3.1 que de celui d'une roche fragile et non poreuse. Cependant, il n'a pas été observé lors des essais conventionnels une phase de durcissement permettant l'évaluation de la déformation ε_m . Ainsi, l'étendue de la zone compactée sous le poinçon a dû être postulée.

Un essai de poinçonnement a été effectué sur un échantillon de matériau utilisé dans le cadre de cette recherche puis photographié numériquement. La figure 3.3 indique un arc de cercle délimitant une zone décolorée sous le poinçon. Une zone plastique ne présentant pas la même texture que la zone élastique située à l'extérieur de l'arc de cercle (grains de sable intacts) peut être aperçue même si la photo de la figure 3.3 présente certains défauts quant à la prise de vue et l'éclairage. Selon ces évidences préliminaires, pour des fins de calculs, la variable h de l'équation 3.14 est considérée comme étant égale à a , le rayon de l'aire chargée à la surface du matériau poinçonné. Cette hypothèse est conforme à ce qui a été observé par Wilsea *et al.* (1975) pour le matériau testé par ces auteurs.

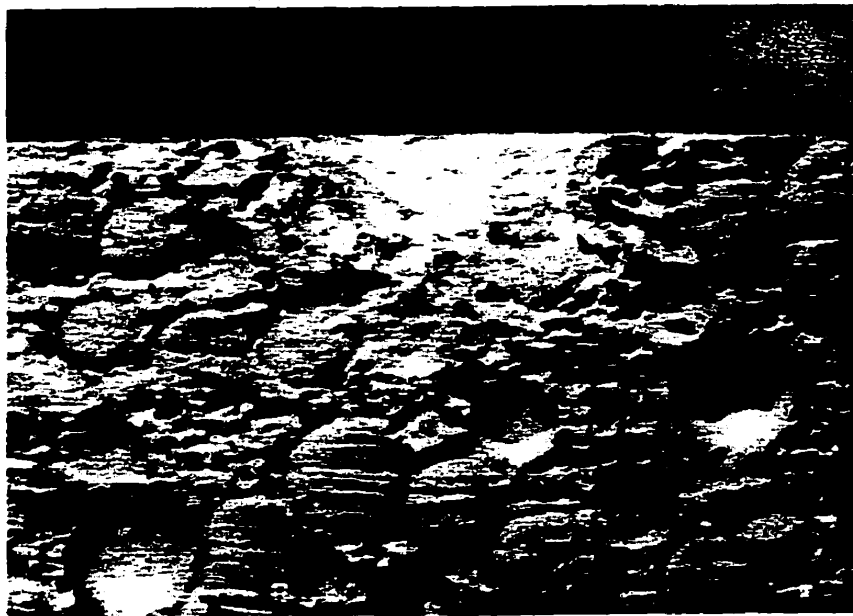


Figure 3.3 Zone d'écoulement plastique de forme circulaire.

CHAPITRE 4

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

4.1 Généralités

La méthode expérimentale consiste en 2 types d'essais, soit :

- 1) des essais de compression uniaxiale,
- 2) des essais de poinçonnement cyclique à charge contrôlée.

Afin de s'assurer de la qualité des résultats, tous les essais sont effectués en laboratoire. Le matériau testé consiste en un mélange de plâtre et de sable préparé en laboratoire dont la porosité est contrôlée par l'ajout de billes de polystyrène.

4.2 Description des échantillons

Tous les échantillons sont fabriqués en laboratoire à partir d'un mélange de plâtre industriel, de sable, d'eau distillée et de polystyrène. Les proportions de chaque composante ont été déterminées par essais et erreurs de façon à ce que le mélange final présente les caractéristiques d'un matériau ductile et peu résistant en compression uniaxiale. La description détaillée des composantes est donnée dans les paragraphes qui suivent.

plâtre

Le plâtre utilisé est de type *Plâtre à mouler* *USG*, fabriqué par la compagnie *United States Gypsum Company* et distribué au Canada par *Industries C.G.C.* La densité relative (D_r) a été déterminée expérimentalement en suivant la norme ASTM n°D853-83 et s'établit à 2.90.

sable

Le sable utilisé est de granulométrie uniforme et fin, passant le tamis n°40 mais retenu par le tamis n°45. Sa densité relative est de 2.60 suivant la norme ASTM n°D853-83.

polystyrène

La porosité du mélange est contrôlée par un dosage de billes de polystyrène dont le diamètre est de l'ordre du millimètre. La masse et la résistance en compression du polystyrène sont considérées comme étant nulles en tout temps.

eau

De l'eau distillée est utilisée dans les mélanges. La température de l'eau se situe entre 20°C et 22°C.

mélanges

Différents mélanges plâtre-sable-eau ont été faits puis testés en compression uniaxiale. L'objectif était d'obtenir un matériau ductile dont la résistance en compression uniaxiale était inférieure à 10 MPa. Un rapport de 1.5 entre la masse de sable et la masse de plâtre a été considéré adéquat. Conséquemment tous les mélanges devant être testés en laboratoire présentent les mêmes proportions de sable, d'eau et de plâtre, seule la quantité de polystyrène varie d'une série d'essais à une autre.

Pour les essais de compression uniaxiale des cylindres de calibre NX ont été coulés. Le volume total des échantillons varie, selon le moule utilisé, de 237cm^3 à 241cm^3 (soit près de 50mm de diamètre et 122mm de hauteur). Pour les essais de poinçonnement, des blocs de $35\text{cm} \times 6.35\text{cm} \times 3.2\text{cm}$ sont préparés, chaque essai de poinçonnement étant équidistant de 3.175cm (11/4 pouce). Tous les échantillons sont laissés en chambre humide pour un temps de cure de deux semaines avant d'être testés, des essais de compression uniaxiale préliminaires démontrants que le Co devenait constant après 2 semaines de temps de cure.

Les proportions de plâtre, de sable et d'eau sont données au tableau 4.1. Le tableau 4.2 présente le volume de polystyrène et la porosité qui lui est associée. Le volume de polystyrène est mesuré à l'aide d'un cylindre gradué et est ajouté aux deux types de mélanges.

Tableau 4.1 Proportions des composantes du matériau final.

	cylindres	blocs
plâtre	205g.	615g.
sable	305g.	915g.
eau	150ml.	450ml.

Tableau 4.2 Porosité et volume de polystyrène par mélange.

volume de polystyrène par cylindre (ml)	volume de polystyrène par bloc (ml)	porosité moyenne par échantillon (%)
0	0	44
65	200	49
100	300	52
200	600	58
300	900	67

calcul de la porosité

La porosité des échantillons est calculée selon une variante de la méthode proposée par la Société internationale de mécanique des roches (1979). La procédure est différente étant donné la nature du matériau. Le calcul se fait suivant les étapes décrites ci-dessous.

- 1) Des morceaux représentatifs de l'échantillon sont pesés à l'air libre (M_{sat}).
- 2) Les mêmes morceaux sont ensuite pesés en immersion (M_{sub}), la pesée se fait dès les premiers instants de sorte que l'eau n'altère l'échantillon.
- 3) Après une période de séchage au four, les échantillons sont pesés (M_s).
- 4) En considérant le mélange homogène et sachant que le ratio entre la masse de sable, M_{sa} , et la masse de plâtre, M_{pl} , est de 1.5 on calcule :

$$M_{sa} + M_{pl} = M_s \quad (4.1)$$

$$M_{sa} / M_{pl} = 1.5 \quad (4.2)$$

$$M_{sa} = 1.5 * M_{pl} \quad (4.3)$$

de 4.1 et 4.3 nous calculons :

$$2.5 * M_{pl} = M_s \quad (4.4)$$

donc,

$$M_{pl} = M_s / 2.5 \quad (4.5a)$$

$$M_{sa} = M_s - M_{pl} \quad (4.5b)$$

- 5) Connaissant la densité des grains pour le plâtre et le sable il est possible de calculer le volume des grains solides V_s .

$$V_s = M_{sa} / (D_{rsa} * \rho_w) + M_{pl} / (D_{rpl} * \rho_w) \quad (4.6)$$

- 6) Sachant que

$$M_{sub} = M_{sat} - \rho_w * V_t \quad (4.7)$$

il est possible de calculer la masse volumique totale et le volume total par les relations suivantes :

$$\rho_t = \frac{M_{sat}}{(M_{sat} - M_{sub}) \rho_w} \quad (4.8)$$

$$V_t = \frac{M_{sat}}{\rho_t} \quad (4.9)$$

7) Connaissant V_t et V_s , la porosité n peut être calculée:

$$n(\%) = \left(\frac{V_t - V_s}{V_t} \right) * 100 \quad (4.10)$$

Les figures 4.1 et 4.2 présentent des échantillons de compression uniaxiale et de poinçonnement pour lesquels la porosité est de 60%.

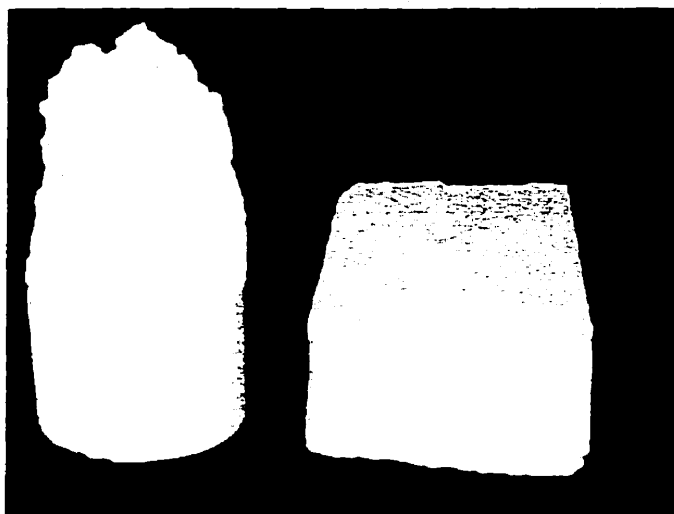


Figure 4.1 Échantillons de compression uniaxiale et de poinçonnement.

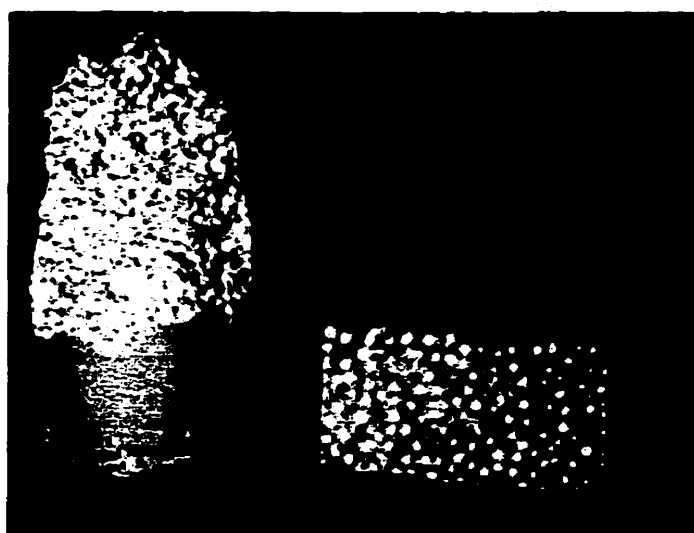


Figure 4.2 Modification du contraste donnant une meilleure appréciation de la porosité.

4.3 Déroulement des essais

4.3.1 Essais de compression uniaxiale

déroulement de l'essai

Les essais de compression uniaxiale ont été effectués selon la norme ASTM n°D2938-86. Le taux de déplacement du plateau est constant à 0.02mm/min. Un contact de 30N est nécessaire pour activer le servo-mécanisme qui déclenche le déplacement du plateau. Les déformations transversales et longitudinales peuvent être calculées suite aux déplacements enregistrés par des DCDT. Pour chaque essai un déchargement est effectué lorsque la charge atteint 2kN, le module d'élasticité est calculé à partir du module sécant de la courbe de déchargement.

matériel

- Presse hydraulique INSTRON modèle 1350. Capacité de 90kN (20000lbs).
- Cellule de charge modèle INSTRON. Capacité de 24kN. Manufacturée par LEBOW, numéro de série 3097.
- Deux DCDT SBEL servant à mesurer les déplacements longitudinaux. Précision au micromètre et calibrés pour un déplacement de 3mm.
- Un DCDT SBEL monté sur chaîne servant à mesurer les déplacements associés aux déformations transversales. Précision au micromètre et calibré pour des déplacements de 2mm.
- Système d'acquisition de données en continu, logiciel *Snap Master* pour Windows 3.1.

4.3.2 Essais de poinçonnement

déroulement de l'essai

L'essai de poinçonnement consiste en une répétition de cycles de chargement et de déchargement où un incrément de charge est appliqué à chaque cycle tout au long de l'essai.

Pour ce type d'essai la presse hydraulique doit être maintenue en mode *charge contrôlée*, ce qui signifie que peu importe le niveau de charge visé, le chargement sera effectué à un taux de pénétration constant tout au long de l'essai.

Pour obtenir une réponse du plateau entre les cycles de chargement, un contact initial de 25N est nécessaire entre le poinçon et l'échantillon. Pour s'assurer que chaque essai possède un nombre de cycles représentatifs, les échantillons dont la porosité est inférieure à 55% ont un incrément de charge de 100N tandis qu'il est de 50N pour les échantillons dont la porosité est supérieure à 55%. De plus, afin d'éviter que le poinçon ne continue de s'enfoncer au cours des premiers instants de déchargement, la charge maximale visée pour chaque cycle est maintenue pendant 10 secondes. L'essai de poinçonnement se termine lorsque le poinçon a subi un déplacement de 3mm.

Tous les essais de poinçonnement sont effectués sur des blocs de surface plane. Selon Rochon (1979) l'erreur associée à l'effet de courbure est d'environ 5% pour des diamètres de forage de 2 pouces (50.8mm) et plus. Cette erreur étant considérée négligeable, aucune attention n'est portée sur son incidence dans les calculs des résultats finaux.

matériel

- Presse hydraulique INSTRON modèle 1350. Capacité de 90kN (20000lbs).
- Cellule de charge BLH. Capacité de 5kN, manufacturée par BLH numéro de série 33662.
- Un DCDT de marque SBEL servant à mesurer l'enfoncement du poinçon. Précis à 0.003mm et calibré pour un déplacement total de 4mm.
- Poinçon sphéroidal en acier ou carbure de tungstène, angle au sommet de 120°, rayon de la partie sphérique 1.2mm, déplacement total de 3mm.
- Système d'acquisition de données en continu, logiciel *Snap Master* pour Windows 3.1.

Les figures 4.3 et 4.4 illustrent les montages de compression uniaxiale et de poinçonnement.

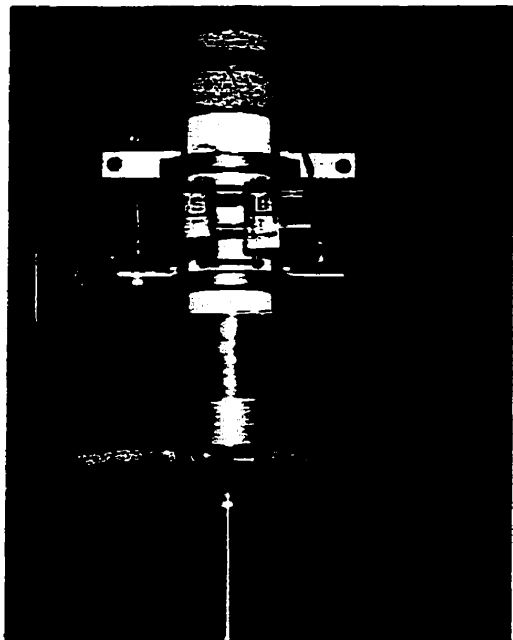


Figure 4.3 Montage de l'essai de compression uniaxiale.

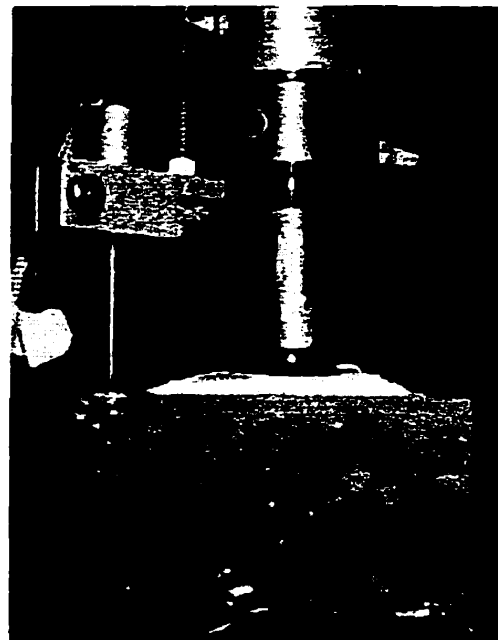


Figure 4.4 Montage de l'essai de poinçonnement.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Ce chapitre présente les résultats de 39 essais de compression uniaxiale et de 214 essais de poinçonnement. Les paramètres calculés pour chaque essai sont :

1. Essais de compression uniaxiale : résistance en compression uniaxiale (C_0), module d'élasticité (E) et coefficient de Poisson (ν).
2. Essais de poinçonnement : module d'enfoncement permanent (MEP), résistance en compression uniaxiale (C_0) et module d'élasticité (E).

Les essais de compression uniaxiale et de poinçonnement ont été réalisés à l'intérieur d'une gamme de porosités qui variaient de 44% à 68%. Les courbes obtenues suite aux essais de compression uniaxiale et de poinçonnement sont présentées aux annexes B et C. Les courbes de résistance en compression uniaxiale semblent indiquer que le matériau passe d'un comportement dilatant à contractant à mesure que la porosité augmente. Le coefficient de Poisson moyen mesuré au cours des essais de compression uniaxiale est de 0.14.

5.1 Résultats des essais de compression uniaxiale conventionnels

Le tableau 5.1 présente les résultats complets des essais de compression uniaxiale. Sur un total de cinquante essais réalisés en laboratoire, trente-neuf se sont déroulés normalement et onze ont dû être rejetés. Les essais devaient répondre à trois critères de discrimination pour que les résultats soient retenus.

Premièrement la prise de données devait se dérouler sans interruption tout au long de l'essai, les connections reliant les DCDT au système d'acquisition pouvaient parfois être très sensibles et cesser d'enregistrer les déplacements. Deuxièmement les échantillons, suite au coulage, devaient présenter une surface lisse afin d'éviter un effet de concentration de contraintes lorsque sollicités en compression. Finalement les échantillons devaient céder selon un plan de rupture représentatif. Au cours des essais plusieurs cylindres se sont tout simplement écrasés à l'une des extrémités sans développer un plan de rupture. La résistance en compression de ces échantillons était anormalement faible et la courbe, qui ne présentait jamais de pic, avait une allure asymptotique. Ceci était dû à une mauvaise distribution de la porosité qui était causée par la concentration des billes de polystyrène à l'extrémité supérieure de l'échantillon. Le polystyrène étant moins dense que la matrice de plâtre et de sable, le coulage des cylindres devait se faire à un moment où le matériau avait une viscosité assez élevée pour que les billes de polystyrène ne flottent pas en surface tout en restant suffisamment fluide pour permettre une prise uniforme.

Le tableau 5.1 présente les résultats des 39 essais de compression uniaxiale jugées acceptables. Neuf de ces essais n'ont pas permis de mesurer des déplacements transversaux pouvant donner un coefficient de Poisson inférieur à 0.50. Six autres essais ont été l'objet d'une cessation des prises de mesure du DCDT devant mesurer les déplacements transversaux. En considérant les résultats obtenus, le coefficient de Poisson a été estimé à 0.15. Le tableau 5.1 présente les résultats des 39 essais de compression uniaxiale retenus. Les figures 5.1 et 5.2 illustrent la variation de la résistance en compression uniaxiale et du module d'élasticité en fonction de la porosité.

Les courbes contrainte axiale-déformation axiale, contrainte axiale-déformation transversale et variation de volume-déformation axiale sont présentées à l'annexe A pour les 39 essais de compression uniaxiale. Pour les essais où un mal fonctionnement du DCDT servant à enregistrer les déformations transversales a été observé, seulement la courbe contrainte axiale-déformation axiale est présentée.

Tableau 5.1 Résultats des essais de compression uniaxiale.

essai	porosité	Co	E	Poisson
	%	MPa	GPa	
CUC1	45,80	5,05	4,13	0,18
CUC2	45,40	5,20	5,69	0,15
CUC3	45,50	5,05	4,34	0,15
CUC4	46,00	4,85	5,68	0,16
CUC5	45,30	5,10	5,30	0,10
CUC6	45,90	4,90	4,79	0,13
CUC7	47,60	4,85	4,47	*
CUC8	45,90	4,90	4,83	*
CUC9	45,60	5,00	5,02	0,12
CUC10	45,80	5,20	5,56	0,13
CUD1	68,30	1,30	2,24	0,13
CUD2	67,80	1,10	2,10	0,13
CUD3	67,10	1,35	1,81	0,15
CUD4	63,60	1,35	2,87	0,14
CUD5	62,70	1,55	3,54	*
CUD6	64,00	1,30	2,83	0,11
CUD7	64,10	1,25	2,70	0,18
CUD8	64,70	1,60	3,10	*
CUD9	63,90	1,76	2,85	**
CUD10	67,40	1,30	-	*
CUA21	55,00	3,52	3,75	**
CUA22	52,00	4,22	7,44	0,18
CUA23	56,00	3,60	-	0,16
CUA24	56,00	3,63	7,03	*
CUA25	51,00	4,64	-	*
CUA26	52,00	3,84	4,10	*
CUA27	57,00	3,15	6,12	0,10
CUA28	51,00	4,25	8,31	0,17
CUA29	56,00	3,14	8,01	**
CUE1	60,90	2,05	-	*
CUE2	60,30	2,40	4,11	0,15
CUE3	58,30	2,55	3,99	0,09
CUE4	58,20	2,80	6,70	**
CUE5	57,40	3,00	4,52	**
CUE6	61,70	2,70	3,50	0,18
CUE7	58,40	3,20	4,28	0,13
CUE8	61,90	2,60	4,48	0,08
CUE9	61,50	2,25	4,18	0,11
CUE10	57,40	2,45	4,21	**

* $\nu > 0.50$

** Mal fonctionnement du DCDT transversal en cours d'essai.

5.2 Résultats des essais de poinçonnement

Un total de 214 essais de poinçonnement ont été réalisés en laboratoire sur des blocs de $(35.00 * 6.35 * 3.20) \text{ cm}^3$. La porosité déterminée pour chacun des blocs est considérée représentative pour le volume total du bloc. Pour chacun des blocs, dix essais étaient effectués pour lesquels le module d'enfoncement permanent, le module d'élasticité et la résistance en compression uniaxiale ont été calculés selon les modèles d'interprétation présentés au chapitre 3. Pour chaque essai, ces paramètres sont calculés en considérant un nombre de cycles pouvant aller de 5 à 10, selon les essais. Pour les trois paramètres mesurés (MEP, E et C_0), la moyenne des dix essais effectués par bloc est calculée tout comme le coefficient de variation qui lui est associé. Le tableau 5.3 présente les résultats obtenus en laboratoire. Le coefficient de variation a été calculé en divisant l'écart type par la moyenne des dix essais effectués sur chaque bloc.

Les courbes charge-enfoncement pour les 214 essais réalisés sont présentées à l'annexe B.

Tableau 5.2 Résultats des essais de poinçonnement correspondant à la moyenne de 10 essais par bloc.

ESSAIS	n	MEP moy.	C.V. MEP	F	C.V. F	Co moy.	C.V. Co
	%	MPa		GPa		MPa	
BC31-40	43,7	54,41	0,1267	2,21	0,3266	6.13	0.1579
BC11-20	43,9	63,46	0,0585	3,14	0,4345	7.43	0.0564
BC41-50	43,9	57,83	0,0735	3,32	0,4115	6.70	0.0764
BC21-30	44,0	60,61	0,0739	3,90	0,7314	7.01	0.0701
BC51-60	44,2	55,22	0,0933	2,76	0,1792	6.38	0.0638
BC1-10	44,5	65,80	0,0817	2,84	0,3008	7.62	0.1071
BF11-20	50,0	42,82	0,3244	2,52	0,3379	3.47	0.3120
BF3-10	51,2	36,73	0,1760	2,93	0,6269	4.05	0.1647
BA8-16	51,4	39,09	0,5961	1,70	0,6518	4.23	0.4151
BA18-26	51,5	45,27	0,2482	2,59	0,4847	5.55	0.2929
BA37-46	51,9	42,74	0,3069	2,17	0,5384	5.20	0.3248
BA27-36	52,0	38,64	0,2151	1,77	0,3666	4.56	0.2200
BE1-10	57,3	15,13	0,4269	1,30	0,3492	1.69	0.3456
BE11-20	58,9	13,63	0,1598	0,84	0,3822	1.56	0.1533
BE21-30	59,1	12,04	0,1462	2,54	0,3004	1.37	0.1705
BD11-20	62,1	15,20	0,2504	1,69	0,3280	1.74	0.2055
BD21-30	64,0	16,22	0,2180	0,94	0,3737	1.82	0.2025
BD1-10	64,3	10,31	0,3114	0,61	0,3263	1.18	0.2645
BD51-60	65,0	8,88	0,1442	1,52	0,4826	1.08	0.1601
BD31-40	66,6	8,52	0,1333	0,85	0,5219	1.00	0.1280
BD41-50	66,8	9,78	0,3206	1,13	0,4198	1.14	0.2852

5.2.1 Module d'enfoncement permanent (MEP)

Comme l'indique la formule 3.7 le module d'enfoncement permanent est une moyenne calculée à partir d'un nombre de cycles n qui varie d'un essai à un autre. L'analyse des résultats démontre que les deux premiers cycles de chargement ne doivent pas être considérés dans le calcul de la moyenne étant donné les valeurs trop dispersées du MEP pour ces cycles par rapport à la moyenne de l'essai. À titre d'exemple, la figure 5.3 illustre les valeurs de MEP associés à chaque cycle pour les échantillons BC_1 à BC_10, un comportement similaire ayant été observé pour les autres blocs. La variation du MEP, calculé

en négligeant les 2 premiers cycles, en fonction de la porosité est donnée à la figure 5.4 pour l'ensemble des blocs testés.

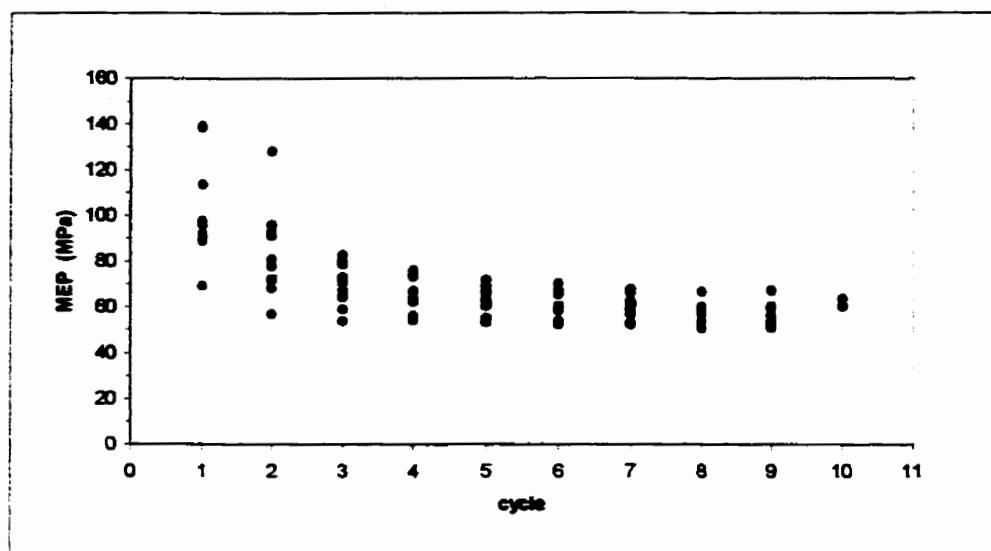


Figure 5.3 Module d'enfoncement permanent en fonction du cycle pour les essais BC_1 à BC_10.

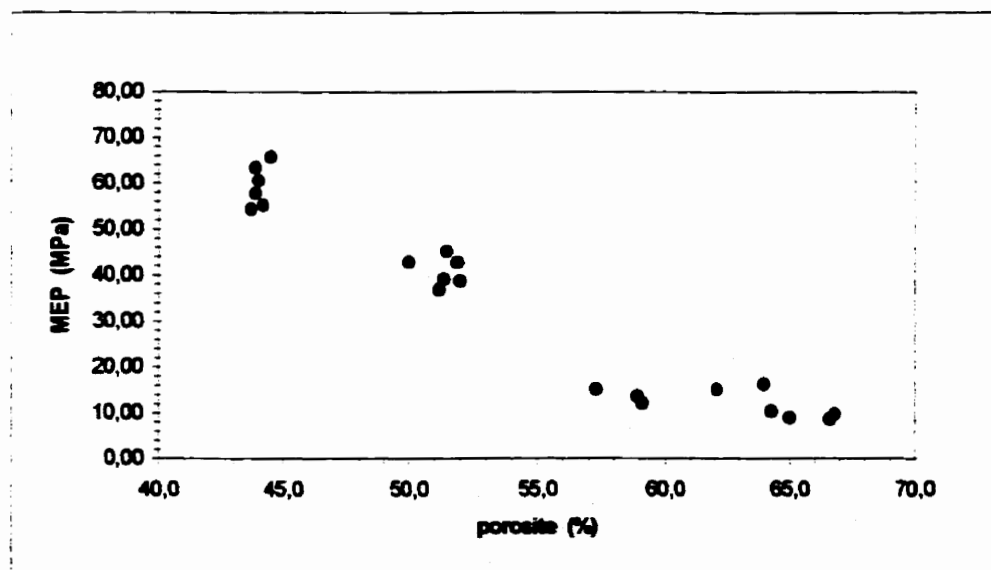


Figure 5.4 Variation du MEP calculé à partir du troisième cycle en fonction de la porosité.

5.2.2 Module d'élasticité (E)

La moyenne qui est calculée pour obtenir le module d'élasticité donné par l'équation 3.2 fait appel à tous les cycles de chargement. La figure 5.5 présente la variation du module d'élasticité pour tous les cycles de chargement des essais BC_1 à BC_10 considérée représentative de ce qui se passe pour l'ensemble des blocs. Aucune tendance n'est développée en fonction de la progression de l'essai, par conséquent tous les cycles sont compilés dans le calcul de l'équation 3.2. La figure 5.6 illustre la variation du module d'élasticité en fonction de la porosité pour des essais de poinçonnement.

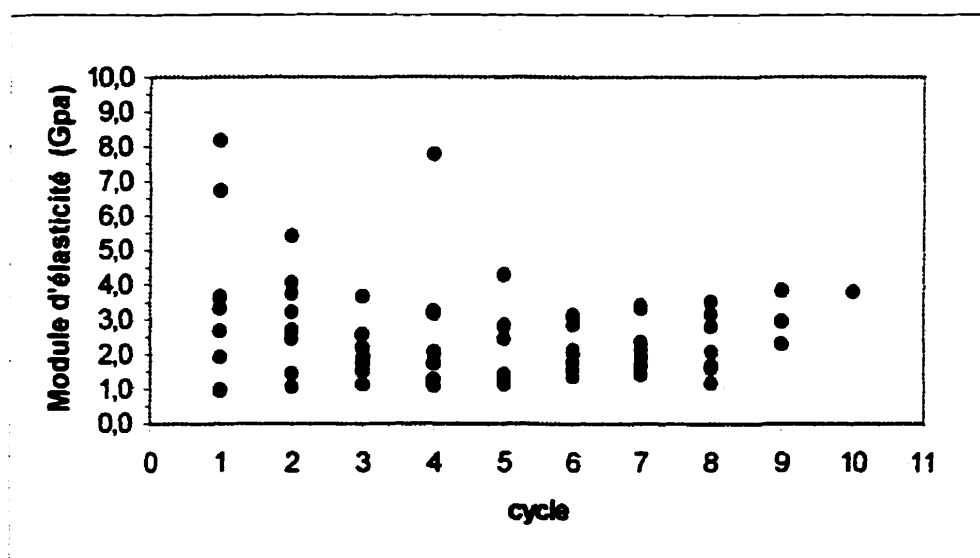


Figure 5.5 Module d'élasticité en fonction du cycle pour les essais BC_1 à BC_10.

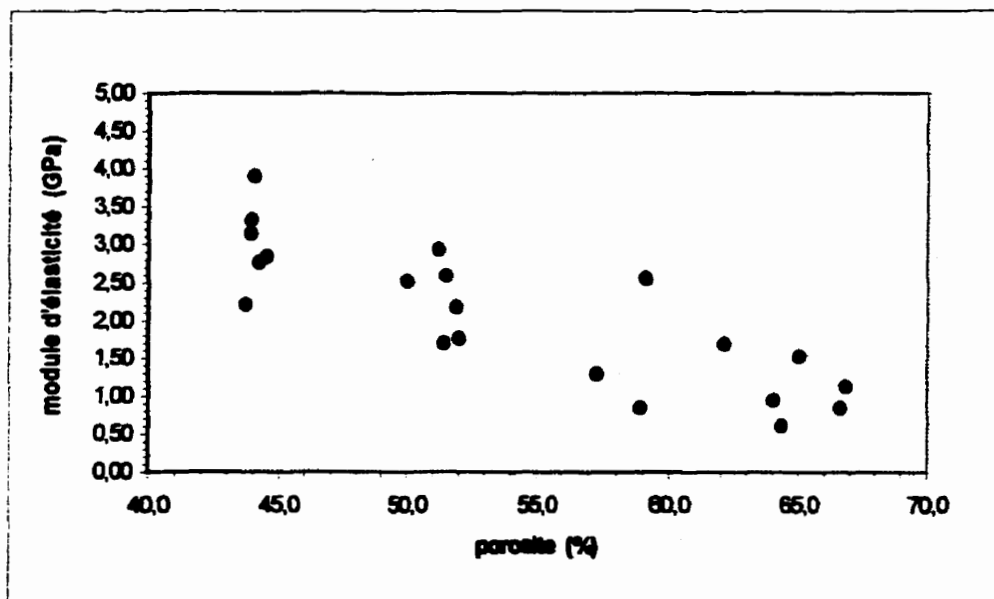


Figure 5.6 Variation du module d'élasticité en fonction de la porosité pour les essais de poinçonnement.

5.2.3 Résistance en compression uniaxiale (C_0)

L'équation 3.14 peut être utilisée pour calculer la résistance en compression uniaxiale (C_0) à chaque cycle de chargement. Si l'on pose l'hypothèse que $h=a$ (section 3.2.3), la valeur de C_0 pour un essai est donnée par :

$$C_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{\pi a_i^2} \left(1 - \frac{1}{2^{1.5}} \right) \quad (5.1)$$

où P_i est la charge au cycle i , a_i est le rayon de l'aire projetée à la surface de poinçonnement et n est le nombre de cycles considérés.

La figure 5.7 montre que les deux premiers cycles de chargement ne présentent pas une résistance en compression uniaxiale qui est représentative de la moyenne obtenue pour les autres cycles, ces valeurs sont donc rejetées lors du calcul de la moyenne. La figure 5.8 illustre la variation de la résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité.

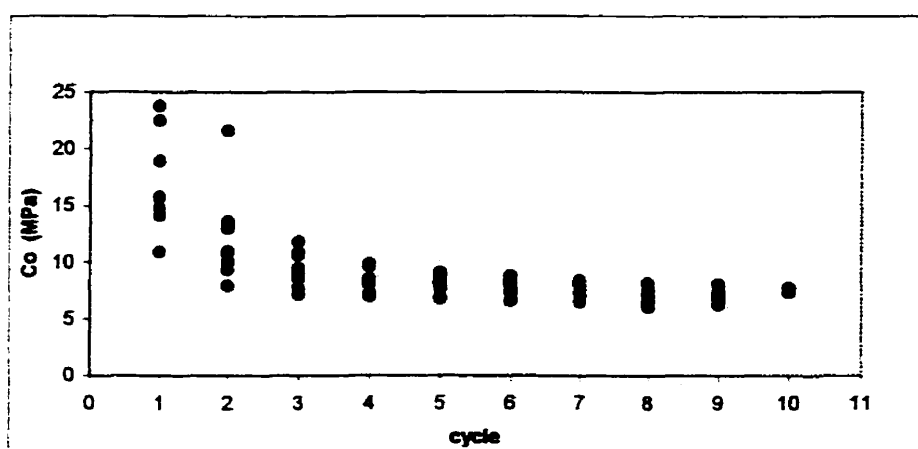


Figure 5.7 Résistance en compression uniaxiale en fonction du cycle pour les essais BC_1 à BC10.

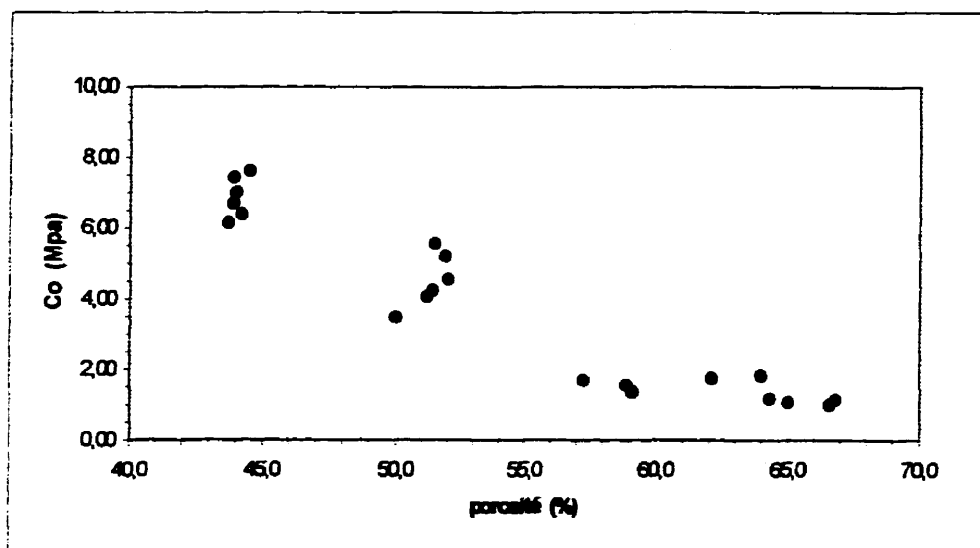


Figure 5.8 Variation de la résistance en compression en fonction de la porosité pour les essais de poinçonnement.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

6.1 *Module d'élasticité*

La figure 6.1 permet de comparer les modules d'élasticité obtenus par poinçonnement aux modules d'élasticité déterminés par l'essai de compression uniaxiale ASTM D2938-86. Le module d'élasticité qui est calculé à partir des résultats de l'essai de poinçonnement décroît si la porosité du matériau augmente. Une tendance similaire est observée pour les essais de compression uniaxiale à la différence que ceux-ci sont moins précis pour des porosités qui se situent entre 50% et 60%. Les résultats du tableau 5.1 permettent d'identifier six essais dont le module d'élasticité semblent se soustraire de la tendance générale qui se dégage des fuseaux de porosités 45-50%, 60-65% et 65-70%, il s'agit des essais CUA22, CUA24, CUA27, CUA28, CUA29 et CUE4. Considérant que six autres essais effectués à l'intérieur de cette étendue de porosités suivent la tendance générale et que, parmi les six essais donnant des valeurs trop élevées, cinq de ces essais proviennent de la même série dont trois ayant été réalisés consécutivement, il serait raisonnable de mettre en cause la qualité des manipulations, l'appareillage (DCDT) ou les deux à la fois. La figure 6.2 présente la variation du module d'élasticité en fonction de la porosité en discriminant les six essais qui ont donné des résultats jugés trop élevés. Par cette figure on note que pour une même porosité, le module d'élasticité obtenu par les essais de compression uniaxiale est, en général, deux fois plus élevé que celui obtenu par les essais de poinçonnement.

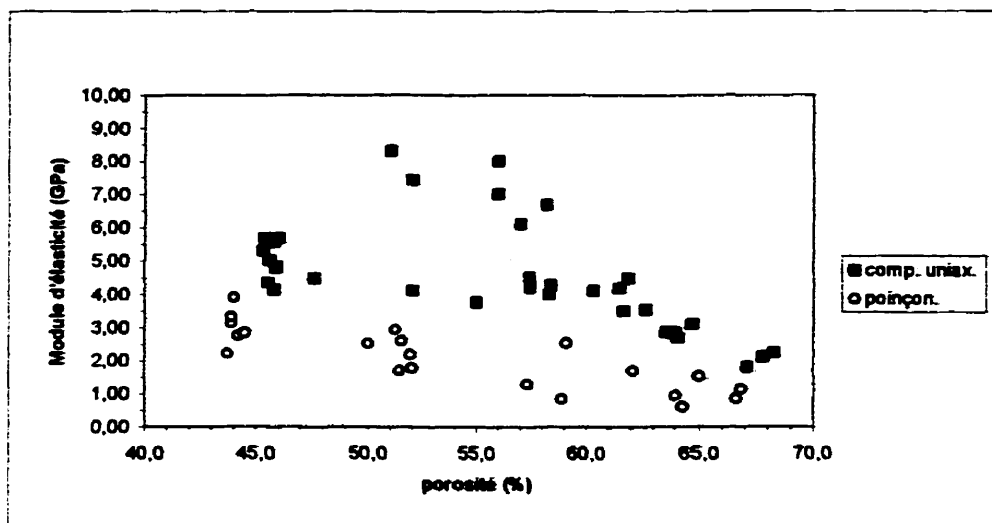


Figure 6.1 Variation du module d'élasticité en fonction de la porosité. Tous les essais de compression uniaxiale et de poinçonnement sont présentés.

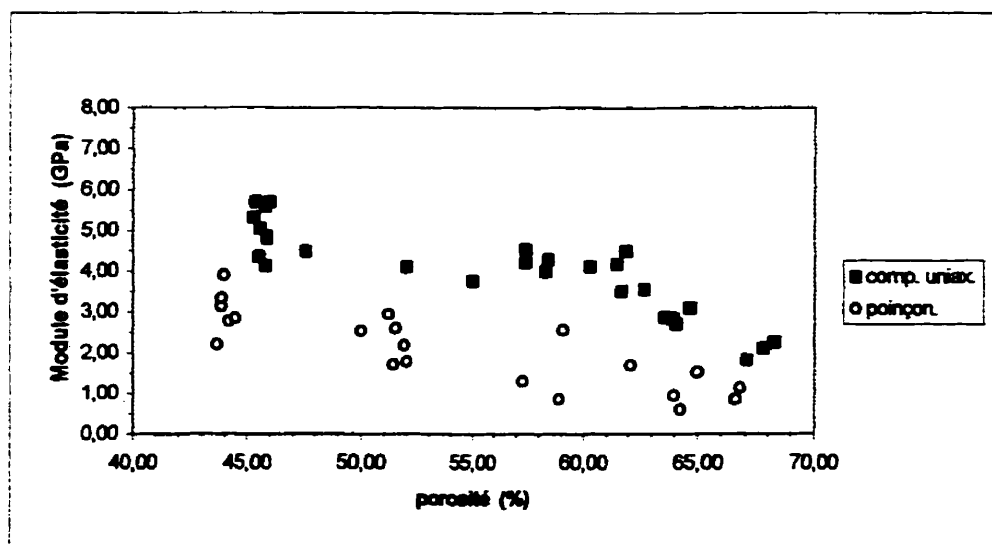


Figure 6.2 Variation du module d'élasticité en fonction de la porosité. Discrimination de six essais de compression uniaxiale

L'analyse des modules d'élasticité obtenus par les deux types d'essais est purement comparative, il s'agit d'une constatation et nullement d'une conclusion faisant état de la variation de l'élasticité d'un matériau en fonction de sa porosité. Le tableau 5.3 indique d'ailleurs que le coefficient de variation du module d'élasticité est très élevé pour les essais de poinçonnement. Ces coefficients de variation élevés sont probablement liés aux déformations élastiques qui, à cette échelle, peuvent prendre des valeurs très variables étant donné la nature poreuse du matériau et sa faible résistance. La figure 6.3 présente la variation du coefficient de variation en fonction de la porosité, aucune tendance n'est constatée entre les deux paramètres, le coefficient de variation semble toutefois se stabiliser au fur et à mesure que la porosité augmente.

Le rapport de 2 qui existe entre $E_{\text{conv.}}$ et $E_{\text{poinçon.}}$ pour une même porosité est sensiblement le même que celui calculé par Cruz (1989) pour un matériau rigide et non poreux qui s'établissait à 2.13.

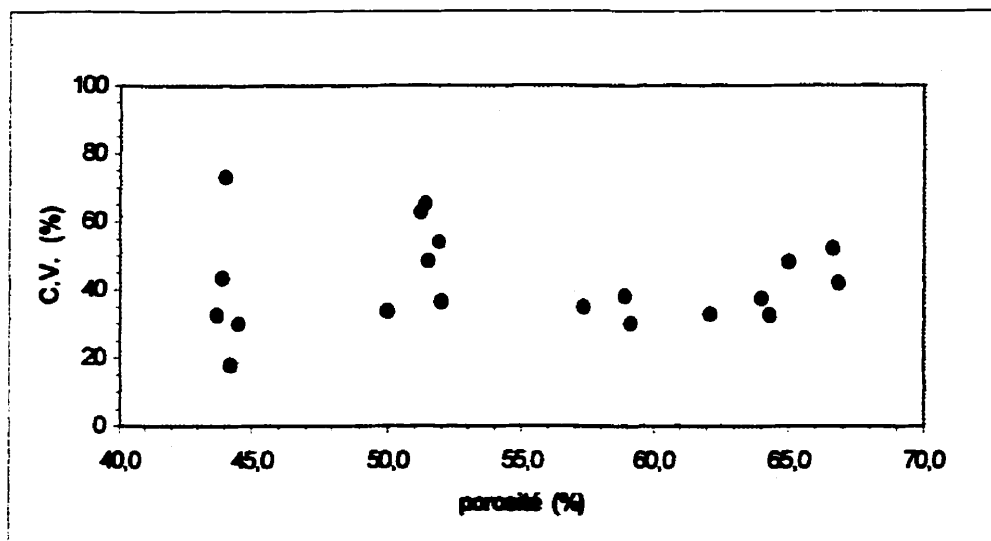


Figure 6.3 Évolution du coefficient de variation des modules d'élasticité calculés en fonction de la porosité.

6.2 Résistance en compression uniaxiale

La figure 6.4 présente la résistance en compression uniaxiale déterminée par des essais de poinçonnement et par des essais conventionnels, en fonction de la porosité du matériau. Dans les deux cas C_0 diminue de façon quasi identique si la porosité du matériau testé augmente. Pour des porosités de 50% et 65% les valeurs de C_0 obtenues en poinçonnement se confondent à celles déterminées par l'essai conventionnel alors que pour les porosités incluses dans les fuseaux 40% - 45% et 55% - 60% la différence est de l'ordre de 1MPa.

Le tableau 5.3 indique que le coefficient de variation associé au calcul de la résistance en compression uniaxiale est plus faible que celui du module d'élasticité. Le coefficient de variation associé à chaque résistance en compression calculée est illustrée en fonction de la porosité du matériau à la figure 6.5.

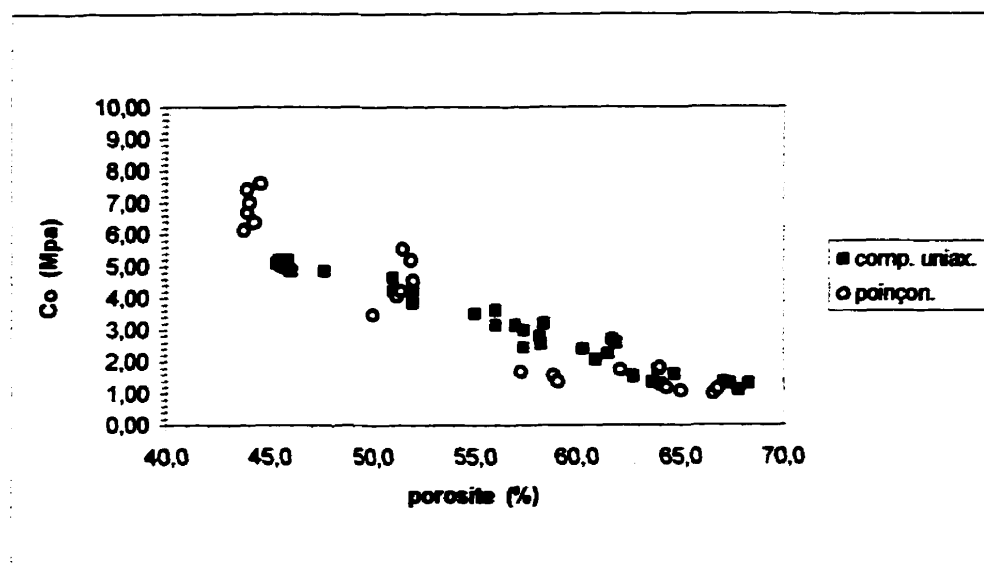


Figure 6.4 Variation de la résistance en compression uniaxiale en fonction de la porosité. Tous les essais de compression uniaxiale et de poinçonnement sont présentés.

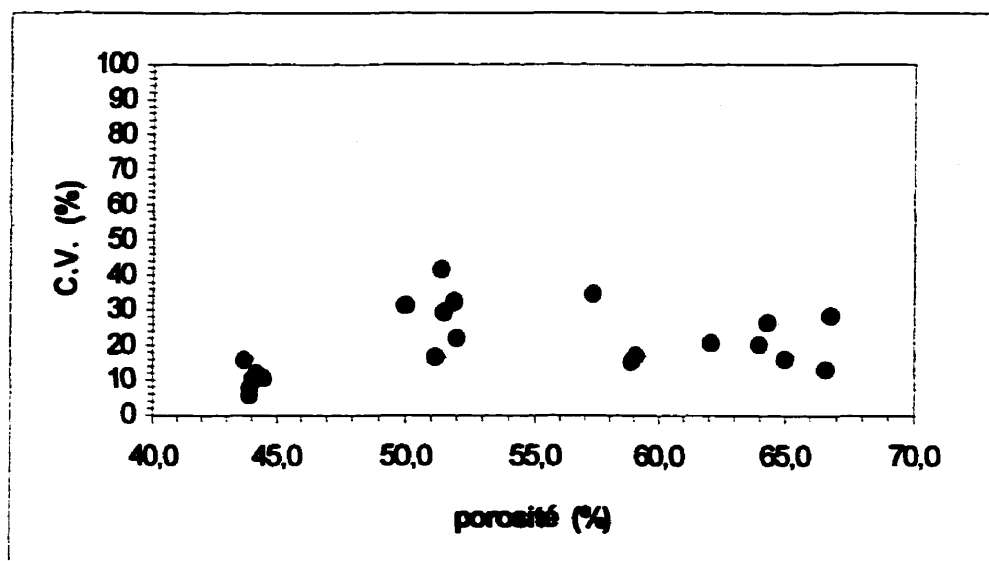


Figure 6.5 Évolution du coefficient de variation des résistances en compression uniaxiale calculées en fonction de la porosité.

Les coefficients de variation associés au calcul de la résistance en compression uniaxiale par essai de poinçonnement sont plus faibles que ceux associés au module d'élasticité. Ceci peut être attribué au fait que la résistance en compression uniaxiale est fonction des déformations plastiques enregistrées à chaque étape de chargement. L'ampleur des déformations plastiques étant plus importante que celle des déformations élastiques, la répétitivité des valeurs calculées pour C_0 se voit par conséquent meilleure que celle obtenue pour le module d'élasticité.

Les valeurs de résistance en compression uniaxiale que donne l'essai de poinçonnement indiquent qu'il n'existe pas d'effet échelle, pour les matériaux testés, entre ce type d'essai et celui proposé par l'ASTM. Quelques exemples sont donnés dans la littérature à l'effet que le facteur d'échelle entre les résultats des deux types d'essais tend à diminuer à mesure que la porosité du matériau augmente (Wagner et Schumann, 1971 ; Miller et Sikarskie ; 1968). Le tableau 6.1 résume une partie des résultats obtenus par Wagner et Schumann qui ont étudié l'effet d'échelle en faisant varier les dimensions du poinçon et, par conséquent, le volume de matériau mis en essai. Les résultats indiquent que les dimensions du poinçon cylindrique plat utilisé ont très peu d'effet sur les roches poreuses et ductiles telles le marbre et le grès comparativement aux roches rigides-fragiles que sont les quartzites et les norites.

Tableau 6.1

Rapport entre la résistance en compression uniaxiale obtenue par poinçonnement et la résistance obtenue par l'essai conventionnel*.

	<i>diamètre du poinçon cylindrique</i>		
	3,8mm	15,2mm	30,5mm
quartzite	13,57	6,96	4,64
shale	7,32	5,35	4,46
norite	11,07	7,86	6,25
marbre	4,82	5,00	4,32
grès	3,92	4,46	3,93

*Tiré de Wagner et Schumann, 1971.

6.3 Module d'enfoncement permanent

Les résultats présentés à la section 6.2 indiquent que pour les matériaux testés la résistance en compression uniaxiale peut être estimée par un essai de poinçonnement en tenant compte de la charge appliquée sur le poinçon et des déplacements plastiques de ce dernier. Différents indices de pénétration utilisés pour la caractérisation de matériaux non poreux consistent à calculer le rapport entre la charge et la déformation plastique. Cependant, comme il a été mentionné antérieurement, ces indices sont utilisés pour quantifier la charge nécessaire pour faire progresser un poinçon jusqu'à ce qu'il y ait écaillage de la surface. Or le comportement d'un matériau très poreux est fondamentalement différent d'un matériau non poreux en ce sens que l'écaillage en surface ne peut se produire car la structure poreuse du matériau permet l'enfoncement complet du poinçon. Ce fut d'ailleurs le cas pour les 214 essais de poinçonnement effectués dans le cadre de cette recherche.

Le module d'enfoncement permanent (MEP) se veut un paramètre par lequel il est possible de faire une corrélation avec la résistance en compression uniaxiale. Son évaluation se voit appropriée pour la caractérisation in situ de matériaux poreux dont l'échantillonnage est difficile à effectuer.

La figure 6.6 permet de comparer le MEP à la résistance en compression uniaxiale déterminée par l'essai standard.

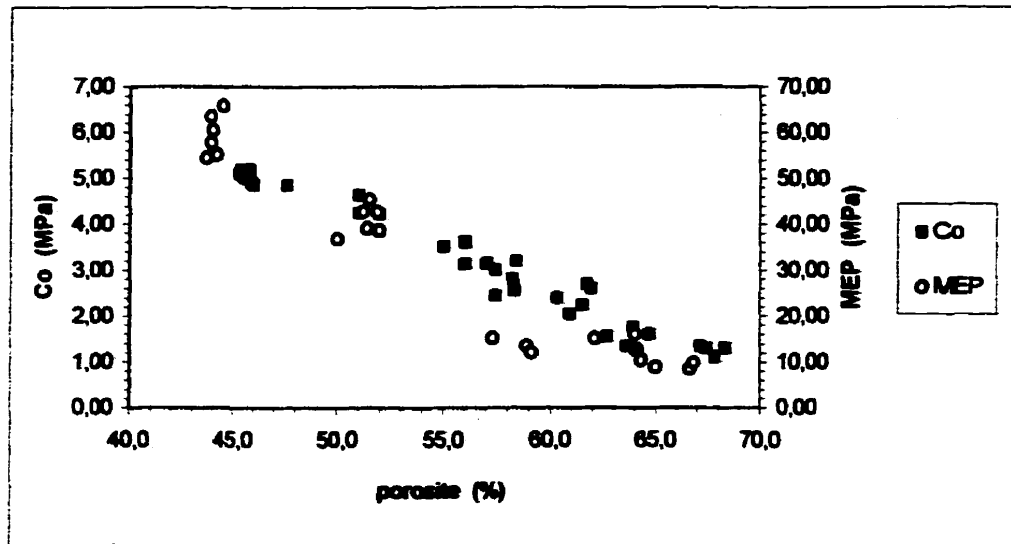


Figure 6.6 Comparaison entre le module d'enfoncement permanent et la résistance en compression uniaxiale selon la porosité du matériau.

La variation du MEP pour des porosités comprises entre 40% et 70% est tout près d'être linéaire. Les résultats des essais réalisés à des porosités qui sont comprises entre 55% et 60% sont légèrement inférieurs à la tendance décrite par les trois autres fuseaux de porosités pour lesquels le rapport MEP/C_o est égal à 10.

Le MEP étant en partie calculé à partir des déformations plastiques que subit le matériau poinçonné, les coefficients de variation ont des valeurs comparables à celles calculées à la section 6.2 pour la résistance en compression uniaxiale. La figure 6.7 illustre les valeurs que prend le coefficient de variation en fonction de la porosité, aucune relation ne peut être formulée entre ces deux paramètres.

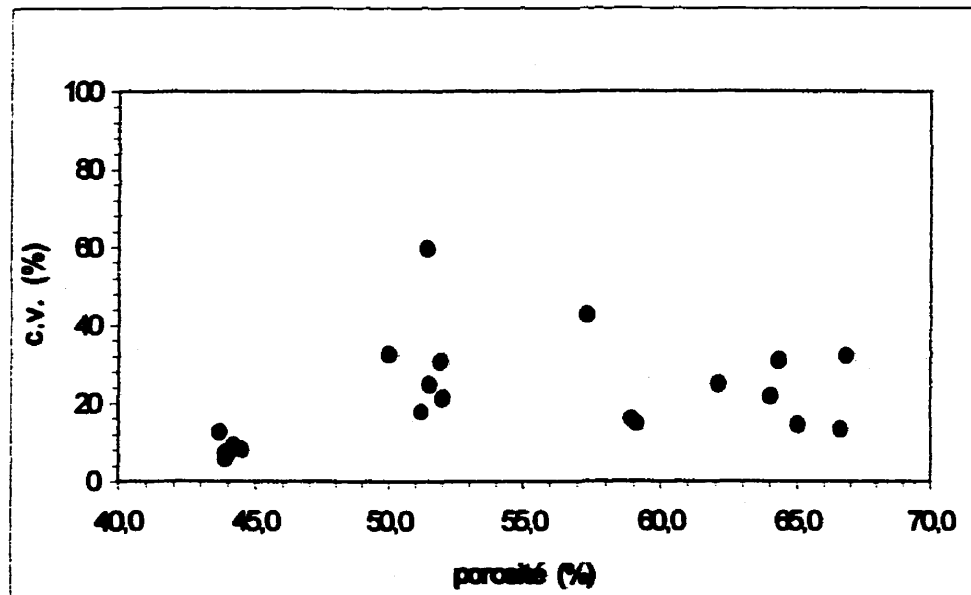


Figure 6.7 Coefficient de variation associé au calcul du MEP en fonction de la porosité.

6.4 Effet de confinement

Les résultats présentés à la section 5.3.1 se rapportent à des essais pour lesquels le confinement était induit par le moule dans lequel était coulé le mélange poreux. Ce confinement, même si aucune valeur précise ne peut lui être attribuée puisqu'il n'a pas été quantifié, peut être considéré comme étant faible comparativement aux conditions qui prévalent dans un forage. Ainsi les valeurs calculées pour le MEP devraient varier non seulement en fonction de la porosité mais également sous l'influence du confinement.

Pichette (1979) et Rochon (1979) ont procédé à des essais de poinçonnement sur du calcaire en faisant varier la pression de confinement. Pichette (1979) a effectué des essais de poinçonnement sur des cylindres confinés tandis que les essais de Rochon (1979) tentaient de simuler les conditions rencontrées dans un forage en appliquant différentes pressions de confinement sur un bloc de calcaire dans lequel un trou était foré et l'essai de poinçonnement effectué. Dans les deux cas l'indice de pénétration diminue à mesure que le confinement augmente. Les résultats de ces essais sont présentés aux tableaux 6.2 et 6.3.

Tableau 6.2 Indice de pénétration pour différentes pressions de confinement.
D'après Pichette *(1979).

Diamètre de l'éprouvette (pouces)	Confinement (psi)	$\delta_{i \text{ mod.}}$ (lb/po)
1 1/4	0	88.78
1 1/4	1 000	72.15
1 1/4	2 000	58.89
2 1/8	0	91.04
2 1/8	1 000	83.10
2 1/8	2 000	76.13

*Essais effectués sur du calcaire avec un poinçon conique de 120° dont le rayon de courbure est de 3/32 po.

où

$$\delta_{i \text{ mod.}} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n \frac{[(P_c)_k - (P_c)_{k-1}] \sqrt{\pi q_f \tan^2 \alpha \left(1 + \frac{\tan \delta}{\tan \beta} \right) \left(1 + 0.2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \right) \right)}}{\sqrt{(P_c)_k} - \sqrt{(P_c)_{k-1}}} \quad (6.1)$$

P_c étant la charge appliquée sur le poinçon conique, q_f la contrainte ultime nécessaire à la progression du faux nez, ϕ l'angle de frottement interne, δ l'angle de frottement entre la roche broyée et la roche intacte, α le demi angle au sommet du poinçon et β le demi angle au sommet du faux nez.

Tableau 6.3 Indice de pénétration pour différentes pressions de confinement triaxiales. D'après Rochon*(1979).

Confinement (psi)	δ_i (lb/po)
0	87.70
375	78.90
750	71.93
1500	66.32

*Essais effectués sur des calcaires avec un poinçon dièdre de 120°.

où

$$\delta_i = \frac{n \sum_{i=1}^n d_i P_i - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right) \left(\sum_{i=1}^n P_i \right)}{n \sum_{i=1}^n d_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n d_i \right)^2} \quad (6.2)$$

P_i étant la charge sur le poinçon dièdre au cycle i et d_i le déplacement permanent du poinçon pour le cycle de chargement i .

Selon Rochon (1979) "la contrainte de confinement a pour effet de charger la surface de la roche en contact avec le poinçon de manière à ce que la force nécessaire à la pénétration de ce dernier soit amoindrie." Une pression de confinement triaxiale crée donc un effet de précontrainte qui facilite la pénétration du poinçon.

Rochon développe une équation qui met en relation la charge appliquée sur le poinçon, le déplacement permanent du poinçon, la contrainte nécessaire à la progression du faux nez, la contrainte de confinement et les paramètres géométriques du poinçon et du faux nez. Le modèle que Rochon propose prédit une diminution linéaire de l'indice de pénétration en fonction d'une hausse de la contrainte de confinement triaxiale, les résultats expérimentaux indiquent toutefois que cette diminution est asymptotique. Malgré que le modèle en question semble sous-estimer l'effet du confinement sur l'indice de pénétration, il demeure que la tendance générale soit bien prédite.

Les travaux cités dans cette section ont été menés sur des échantillons de calcaire dont la porosité, dans le cas de Pichette, n'a pas été déterminée, ou dans le cas de Rochon qui ne dépassait pas 5%. Les effets d'une pression de confinement isotrope sur le comportement des roches ne sont pas indépendants de la porosité.. À titre d'exemple, les résultats des essais triaxiaux effectués par Schwartz (1964) sur différents types de roches sont présentés à la figure 6.8.

On constate que l'augmentation de la résistance en compression lors d'essais triaxiaux est beaucoup plus prononcé pour les roches de faible porosité comparativement aux roches dont la porosité est plus élevée. Autrement dit il semblerait que l'effet de confinement soit mal communiqué d'un élément de la roche à un autre si celle-ci est poreuse.

À la lumière de ces résultats il peut être supposé que le MEP diminuera si la pression de confinement augmente. Cependant cette diminution sera également fonction de la porosité, où plus le matériau poinçonné sera poreux moins importants seront les effets du confinement.

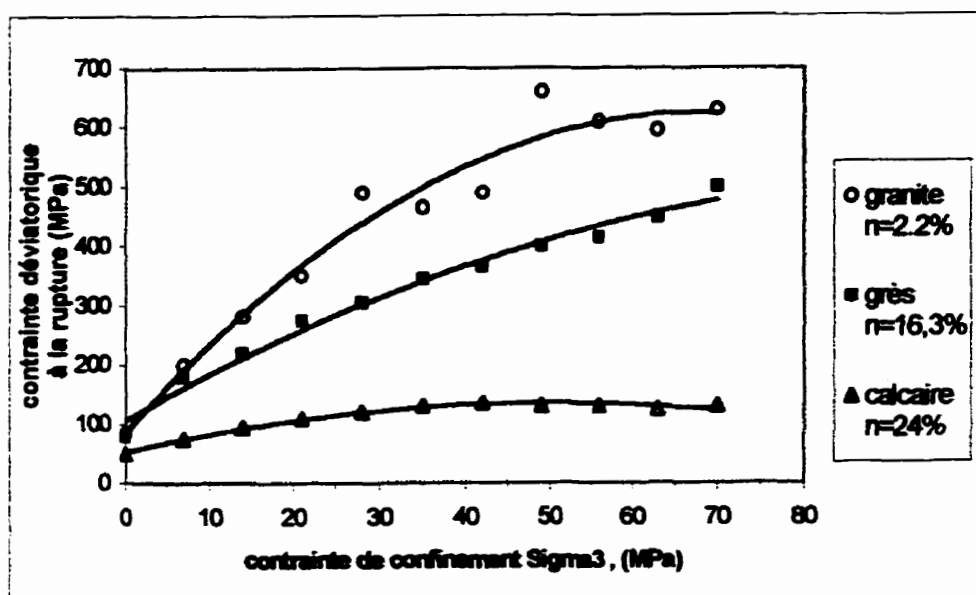


Figure 6.8 Effet du confinement sur la contrainte déviatorique pour des roches de porosités variables.

CHAPITRE 7

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de ce projet est de vérifier expérimentalement l'application, sur un matériau ductile et poreux, d'une méthodologie d'essais de poinçonnement permettant de déterminer le module d'élasticité, la résistance en compression uniaxiale et un module de déformation appelé module d'enfoncement permanent. Le déroulement de l'essai de poinçonnement est proposée par Gill *et al.* (1980) et fait usage d'un poinçon sphéroconique obtus.

La méthodologie proposée est testée à partir d'essais de compression uniaxiale et d'essais de poinçonnement. Tous les essais ont été effectués en laboratoire afin de mieux contrôler leur déroulement. Un mélange ductile de plâtre, sable et polystyrène dont la porosité variaient de 45% à 70% a servi de matériau encaissant.

Le module d'élasticité est calculé selon un modèle initialement conçu pour les roches fragiles et non poreuses (Cruz;1989). Le rapport entre les valeurs de module d'élasticité calculées à partir de l'essai conventionnel et l'essai de poinçonnement est approximativement de 2. Le modèle utilisé pour l'essai de poinçonnement sous-estime donc systématiquement la valeur du module d'élasticité par rapport à celui calculé selon la méthode conventionnelle. Les résultats démontrent que pour une même porosité l'essai est difficilement reproduit, le coefficient de variation pouvant atteindre 60% lorsque la moyenne est calculée pour 10 essais de poinçonnement. Ceci s'explique par les faibles déplacements élastiques enregistrés qui, jumelés à la nature poreuse du

matériau donnent des résultats variables d'un essai à un autre. Au demeurant les modules d'élasticité moyens calculés diminuent de façon régulière en fonction d'une porosité qui augmente.

Pour ce qui est de la résistance en compression uniaxiale, les résultats obtenus par l'essai de poinçonnement s'accordent avec ceux déterminés par l'essai conventionnel de compression démontrant du coup que la zone de compression sous le poinçon peut être considérée comme étant une demie sphère dont le rayon est égal au rayon de l'aire chargée par le poinçon à la surface du matériau. Cette zone de compression, qui est le siège des déformations plastiques, se développe radialement lorsque la charge appliquée par le poinçon atteint la valeur de limite d'écoulement du matériau, limite d'écoulement qui, pour un matériau très poreux, peut être considérée égale à la résistance en compression uniaxiale. L'échelle des déformations plastiques étant plus importante que celle des déformations élastiques, le coefficient de variation associé au calcul de la moyenne pour chaque porosité est plus faible pour la résistance en compression uniaxiale.

Finalement la présente recherche a permis de confirmer l'existence d'une corrélation entre le module d'enfoncement permanent, pour les matériaux testés, et la résistance en compression uniaxiale déterminée par l'essai conventionnel. À l'exception d'un groupe d'essais pour lequel la porosité variait de 57% à 59% le rapport MEP/C_0 est constant et s'établit à 10. Considérant les résultats d'études antérieures et la nature poreuse et ductile du matériau, il est raisonnable de conclure qu'un effet de confinement allant en s'accroissant ferait diminuer légèrement le rapport entre les deux paramètres sans toutefois compromettre leur corrélation.

A ce stade il serait préférable d'appliquer la méthodologie proposée à un environnement non contrôlé. Le BOLO-75 étant une sonde destinée pour un usage en trou de forage, un programme d'essais in situ permettrait de vérifier si la corrélation entre le MEP et la résistance en compression uniaxiale est présente dans un milieu naturel. Les résultats de l'étude menée au barrage de la centrale Rapide-des-Quinze indiquent qu'une plus grande quantité de données est nécessaire pour déterminer l'existence d'une corrélation entre les deux paramètres. De plus, l'effet d'un confinement sur la relation MEP/C₀ pourrait être observé et quantifié directement en prenant en note la position de l'essai dans le trou de forage sans avoir recours à des jugements qui sont de nature plutôt intuitive. Des essais effectués dans un grès ductile dont la porosité se situe près de 20% ou dans un béton qui présente des signes de désagrégation par la réaction alcalis-granulats s'avéreraient d'une grande utilité pour la poursuite de cette recherche.

De plus, des essais in situ permettraient d'apprécier la répétitivité des résultats en comparant les coefficients de variation. Une banque exhaustive de résultats d'essais in situ sur différents matériaux aiderait à mieux définir ce type d'essai de poinçonnement à savoir, le nombre de cycles par essai à être effectués et le nombre d'essais nécessaires pour le calcul de la moyenne.

BIBLIOGRAPHIE

ANONYME, (1979). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr., 16, 135-140.

CHEATHAM, J.B. jr. (1964). Indentation analysis for rock having a parabolic yield envelope. Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 1, 431-440.

CHENEVERT, M.E. et DWARAKANATH, V., (1993). Shale strength measurements using a penetrometer. Int. J. Rock Mech. Mining Sci. & Geomech. Abstr., 30, 703-706.

CORTHÉSY, R., LEITE, M.H., GILL, D. E., NGUYEN, D., (1997). Use of modified doorstopper-IAM combination as a stress-meter. International Symposium on Rock Stress, Kuamamoto., 71-76

CRUZ, B., (1989). Le poinçonnement des roches fragiles non poreuses en tant qu'essai in situ palliatif. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

A

DUTTA, P.K., (1972). a theory of percussive drill bit penetration. Int. J. Rock Mech. Mining Sci., 9, 543-567.

GILL, D.E. et BALLIVY, G., (1976). Investigations géomécaniques des emplacements de tunnels en rocher sur l'île de Montréal. Revue canadienne de géotechnique, 13, 481-496.

GILL, D.E., PICHETTE, C., ROCHON, P. et DUBÉ, P.B., (1980). Relation between some of the methods for predicting the penetration rate of full-face boring machines. Proc. 13th Can. Symp. on Rock Mech., CIM Sp., 22, 103-110.

HANDEWITH, H.J., (1970). Predicting the economic success of continuous tunnelling in hard rock. CIM Bulletin, 63, 595-599.

JOHNSON, K.L., (1970). The correlation of indentation experiments. J. Mech. Phys. Solids, 18, 115-126.

KOU, S-Q., HUANG, Y., TAN, X.C. et LINQVIST, P.A., (1998). Identification of the governing parameters related to rock indentation depth by using similarity analysis. Engineering Geology, 49, 261-269.

LADANYI, B., (1967). Expansion of cavities in brittle media. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 4, 301-328.

LADANYI, B., (1968). Rock failure under concentrated loading. Proc. 10th U.S. Symp. on Rock Mech., Austin, Texas, 363-387.

LAFRANCE, F., (1978). Prédiction des taux de pénétration des foreuses pleine section. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

LEITE, M.H., CORTHÉSY, R., GILL, D. E., ST-ONGE, M., NGUYEN, D., (1996). The IAM –A down the hole conditioner-data logger for the modified doorstopper technique. Compte-rendus 2nd NARMS Symposium, Montréal, 897-904.

LEITE, M.H., CORTHÉSY, R. et GILL, D.E., (1997). Essais de poinçonnement de trous de forage et essais de compression uniaxiale dans le béton des structures de la retenue d'eau de la centrale du barrage Rapide-des-Quinze. Projet C.D.T. P2115, École Polytechnique de Montréal, Canada.

LINDQVIST, P.A. et HAI-HUI, L., (1983). Behaviour of the crushed zone in rock indentation. Rock Mech. and Rock Engineering, 16, 199-207.

LUNDBERG, B., (1974). Penetration of rock by conical indenters. Int. J. Rock Mech. Mi. Sci. & Geomech. Abst., 11, 209-214.

MICHALOWSKI, R.L., (1985). Limit analysis of quasi-static pyramidal indentation of rock. Int. J. Rock Mech. Mi. Sci., 22, 31-38.

MILLER, M.H. et SIKARSKIE, D.L., (1968). On the penetration of rock by three dimensional indenters. Int. J. Rock Mech. Mi. Sci., 5, 375-398.

MUROMACHI, T., SAKAI, Y., TSUCHIYA, H. et YAMAMOTO, Y., (1988). Borehole cone apparatus for weak rocks. Proc. on Penetration Testing 1988, ISOPT-1, Balkema, Rotterdam, 875-880.

PARISEAU, W.G. et FAIRHURST, C., (1967). The force-penetration characteristic for wedge penetration into rock. Int. J. Rock Mech. Mi. Sci., 4, 165-180.

PAUL, B. et SIKARSKIE, D.L., (1965). A preliminary theory of static penetration by a rigid wedge into a brittle material. Trans. Soc. Min. Eng., 232, 373-383.

PICHETTE, C., (1979). Normalisation de l'essai de poinçonnement d'Hardewith. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

RANCOURT, A., (1996). Caractérisation de la variabilité des propriétés mécaniques des roches au moyen d'un essai index in situ. Mémoire de, maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

ROCHON, P., (1979). Le poinçonnement des parois de sondages en tant que méthode de prévision des taux de pénétration des foreuses pleine section. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Canada.

SCHWARTZ, A.E., (1964). Failure of rock in the triaxial shear test. Proc. of the 6th U.S. Symp. on Rock Mech. Rolla, Missouri, 109-151.

SUAREZ-RIVERA, F.R., COOK, P.J., COOK, N.G. et MYER, L.R., (1991). The role of wetting fluids during the indentation of porous rocks. Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Roegiers (ed.). Balkema, Rotterdam, 683-692.

SUAREZ-RIVERA, F.R., COOK, N.G.W. et COOPER, G.A., (1990). Indentation by pore collapse in porous rocks. Rock Mechanics as a Multidisciplinary Science, Roegiers (ed.). Balkema, Rotterdam, 671-678.

SZLAVIN, J., (1974). Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory tests. Int. J. Rock Mech. Mi. Sci. & Geomech. Abst., 11, 57-66.

SZWEDZICKI, T., et DONALD, D., (1996). Assessment of mechanical parameters of rock using an indentation test. The AusIMM Annual Conference, Perth, 33-36.

TAN X.C., LINDQVIST, P.A., et KOU, S.Q., (1994). Observation and simulation of rock indentation fracture. Rock Mechanics, Nelson & Laubach (eds.), Balkema, Rotterdam, 335-342.

THIERCELIN, M. et COOK, J., (1988). Failure mechanisms induced by indentation of porous rocks. Key Questions in Rock Mechanics, Cundall et al. (eds), Balkema, Rotterdam, 135-142.

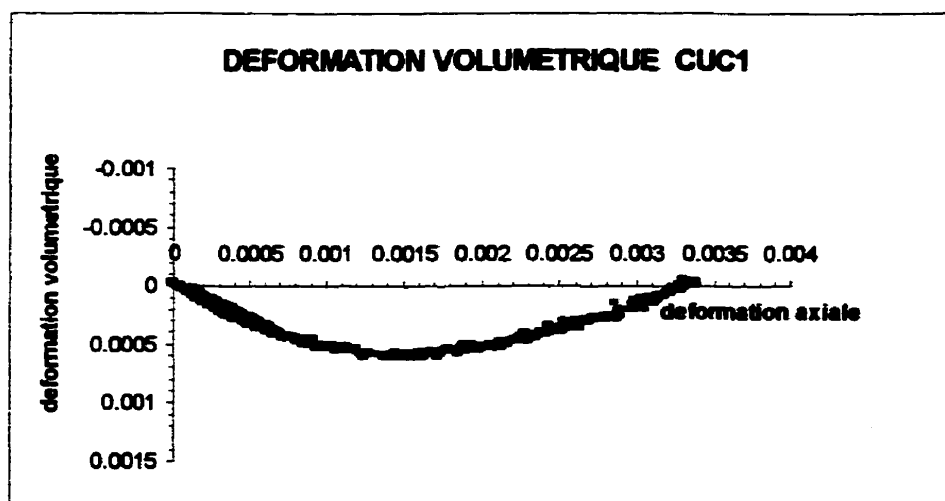
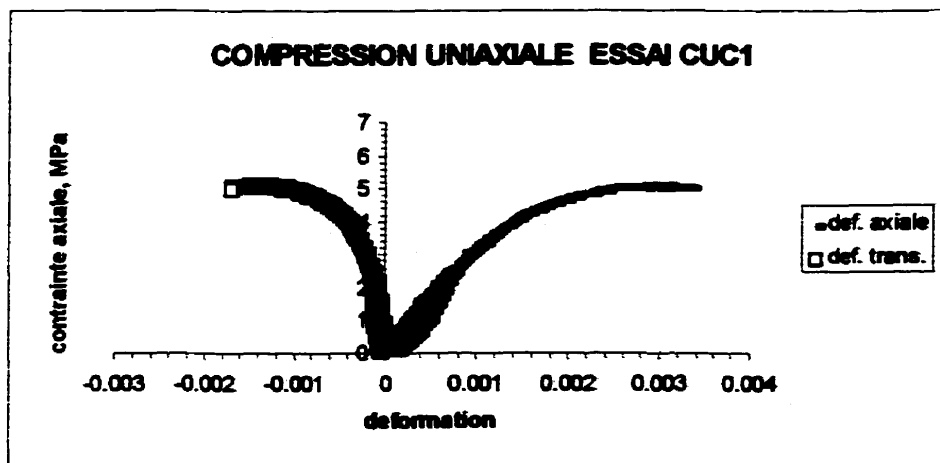
TIMOSHENKO, S. et GOODIER, J.N., (1951). Theory of elasticity, McGraw-Hill, 366-372.

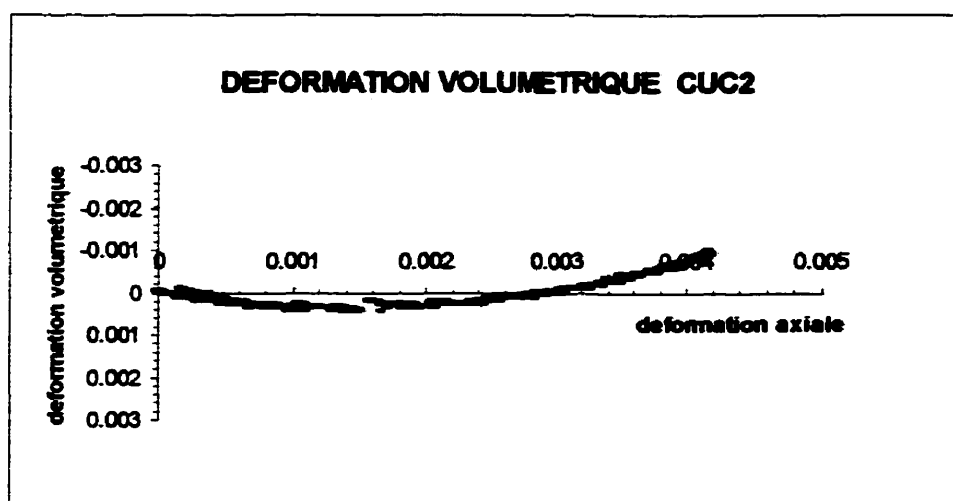
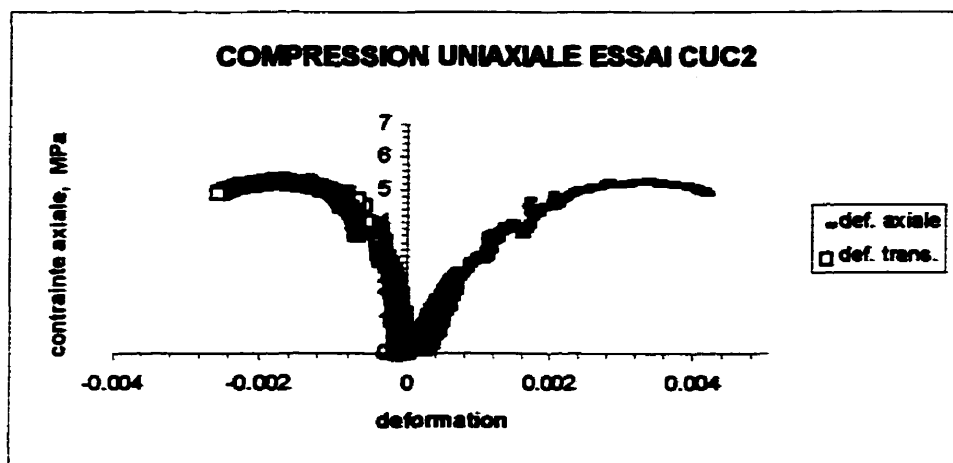
WAGNER, H., et SCHUMANN, E.H.R., (1971). The stamp-load bearing strength of rock. An experimental and theoretical investigation. Rock Mech., 3, 185-207.

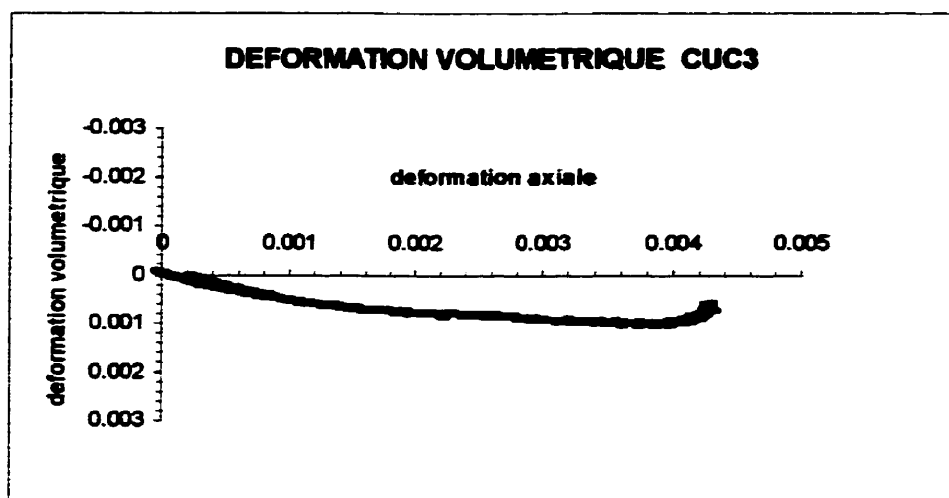
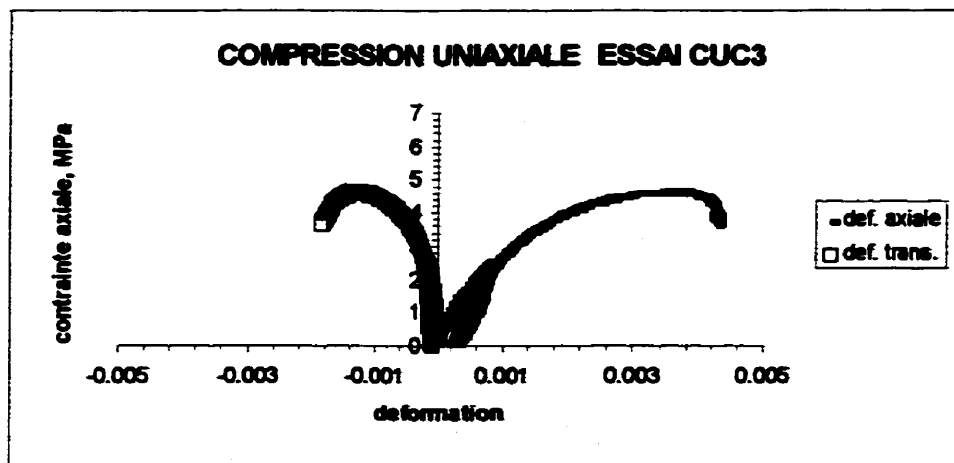
WILSEA, M., JOHNSON, K.L. et ASHBY, M.F., (1975). Indentation of foamed plastics. Int. J. Mech. Sci., 17, 457-460.

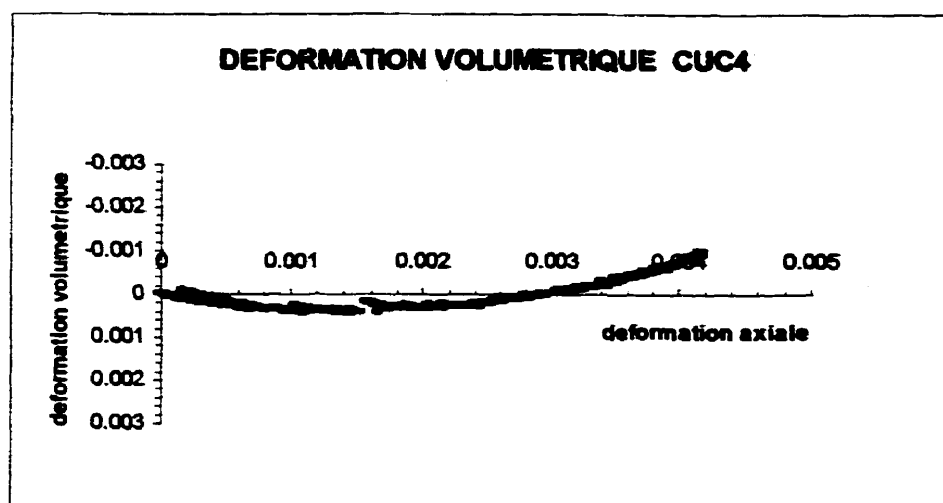
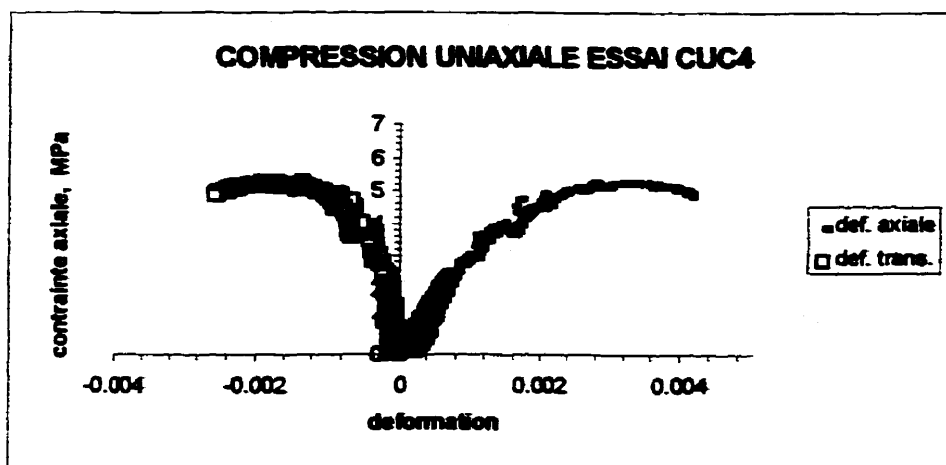
ZAMAN, M., ROEDGIERS, J.-C., ABDULRAHEEM, A. et AZEEMUDDIN, M., (1994). Pore collapse in weakly cemented and porous rocks. Journal of Energy Resources Technology, 116, 97-103.

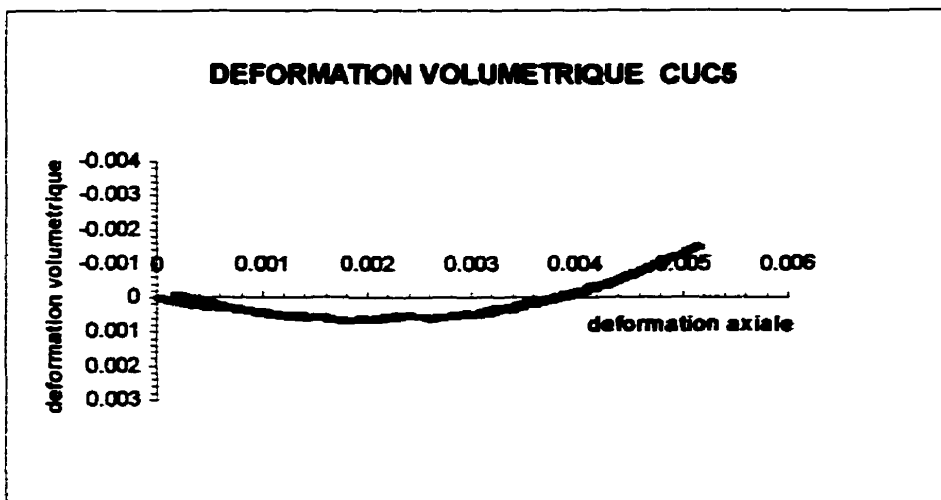
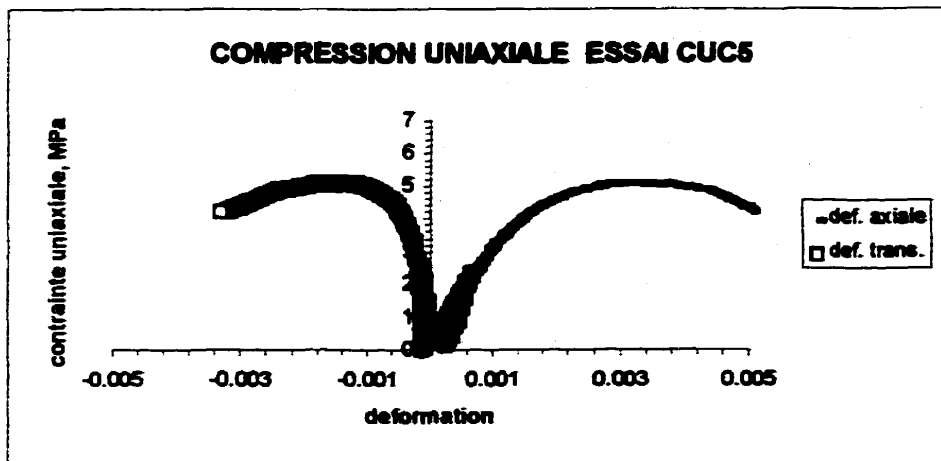
ANNEXE A
COURBES DE COMPRESSION UNIAXIALE

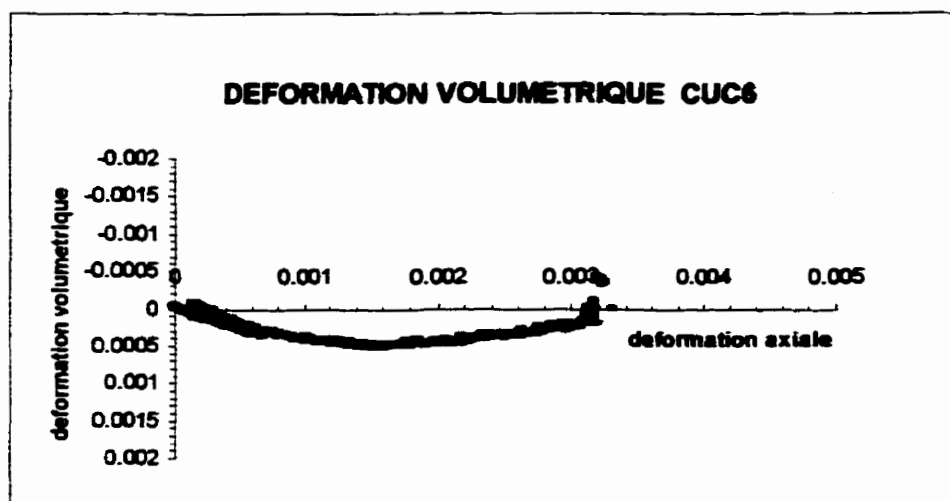
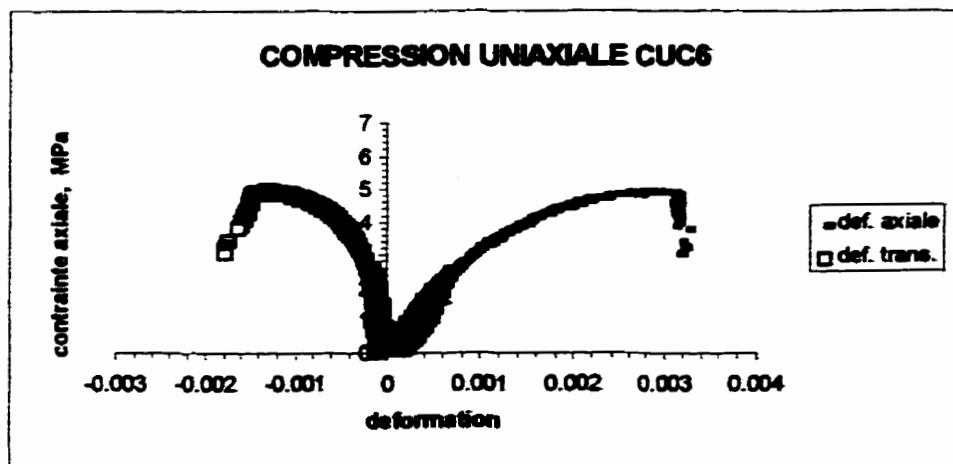


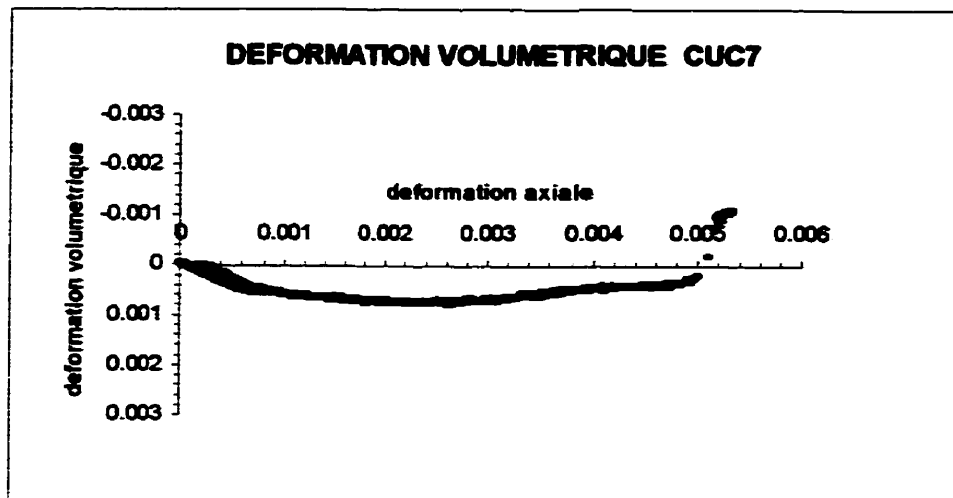
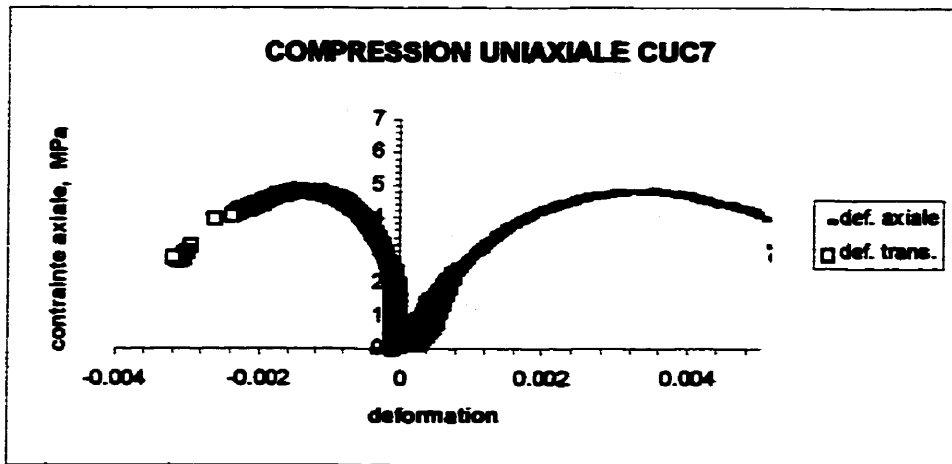


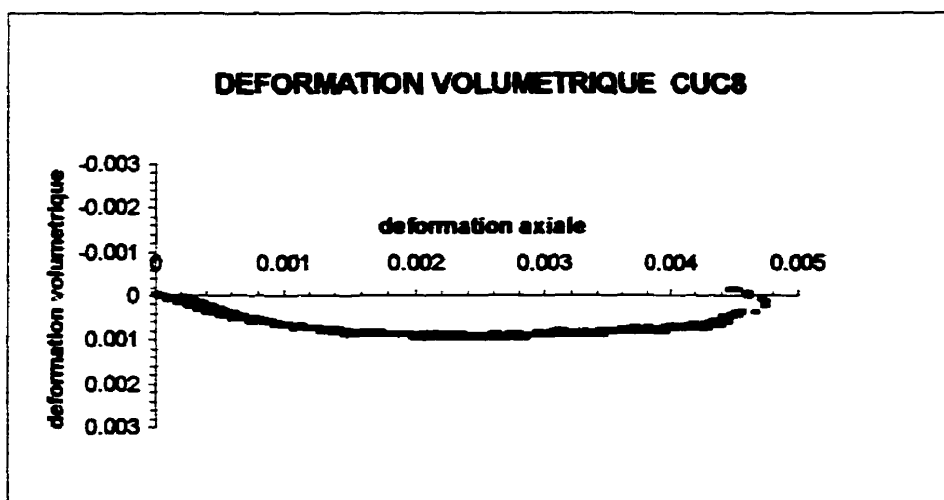
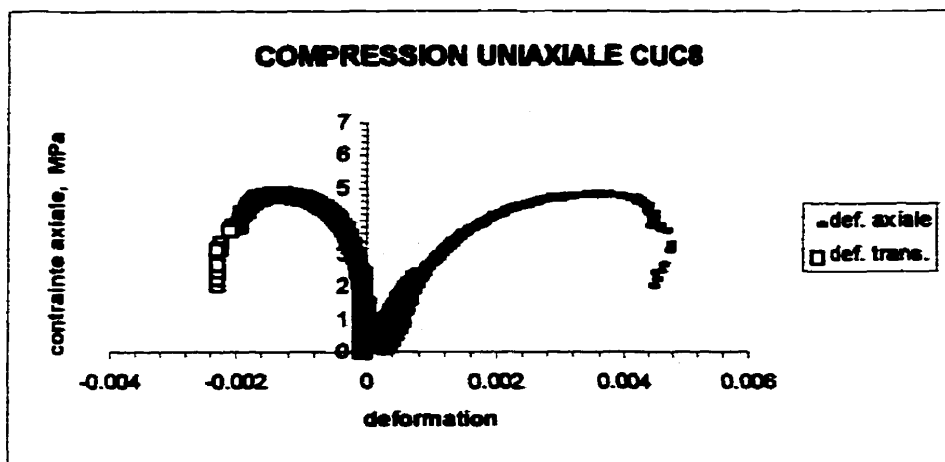


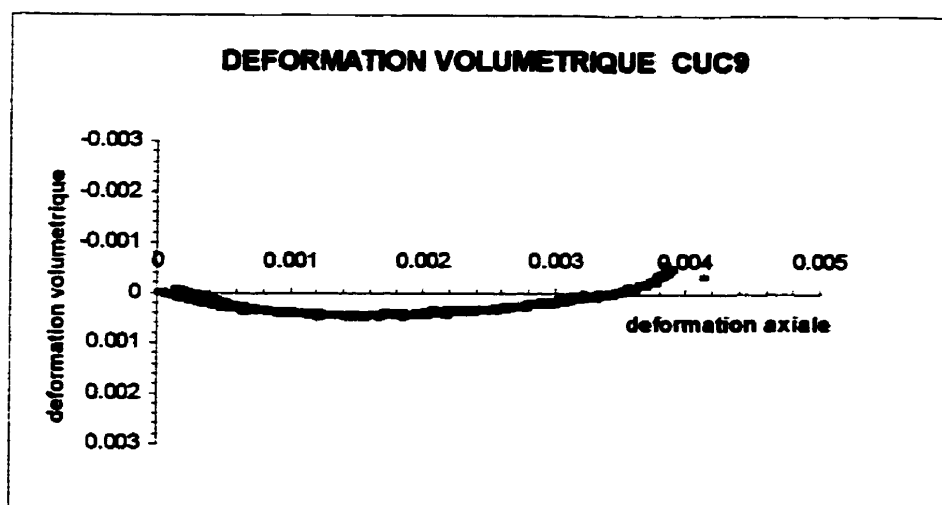
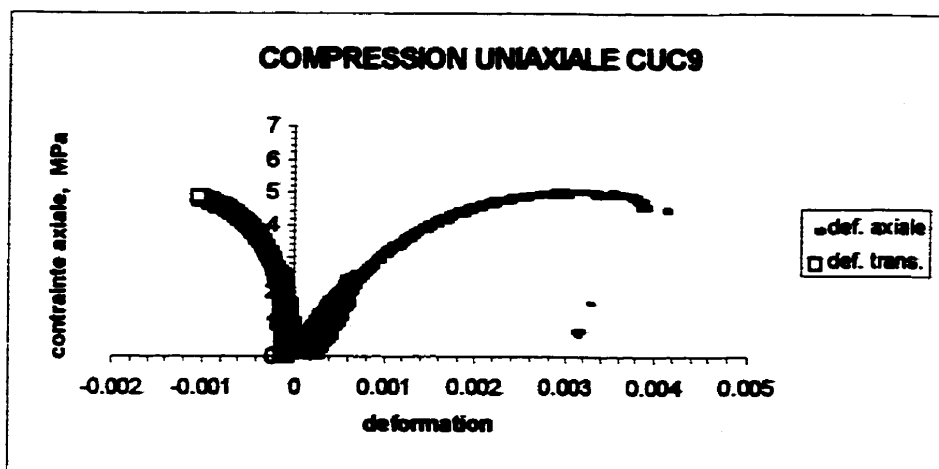


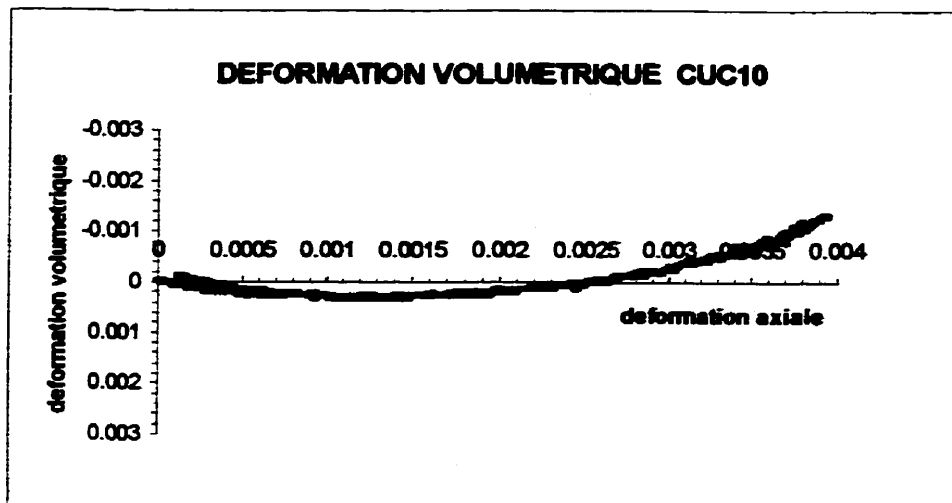
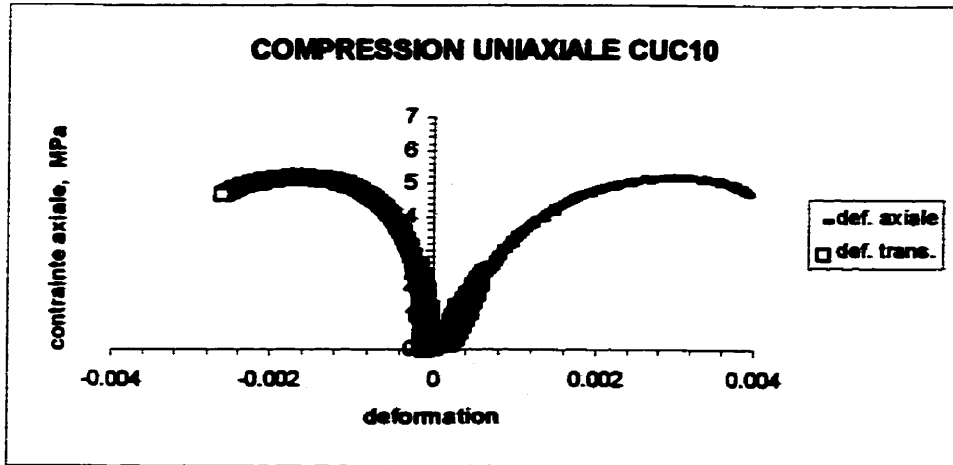


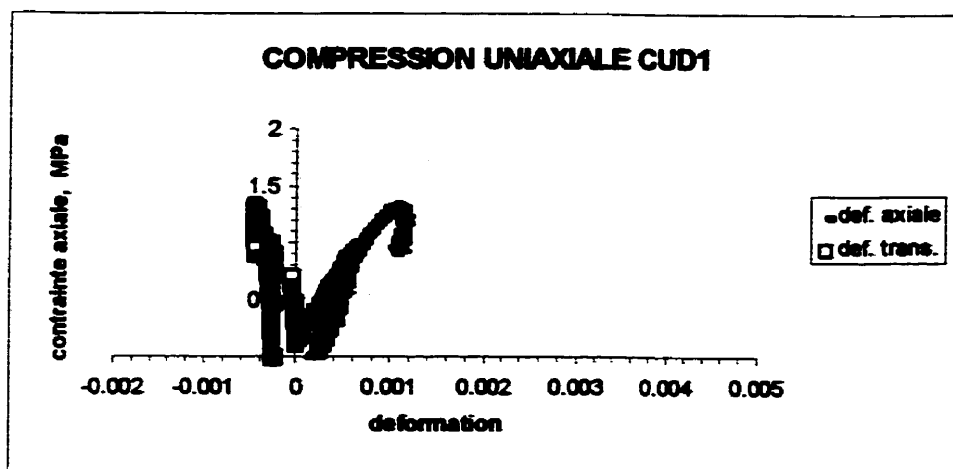


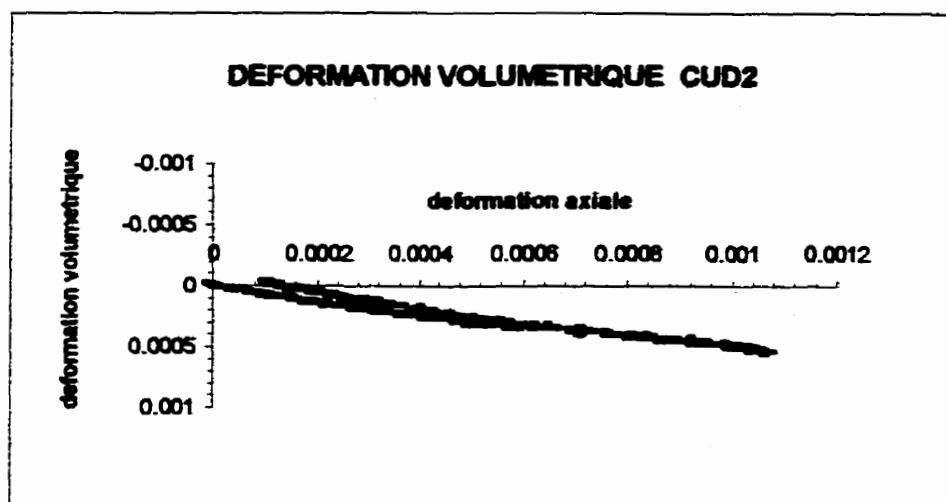
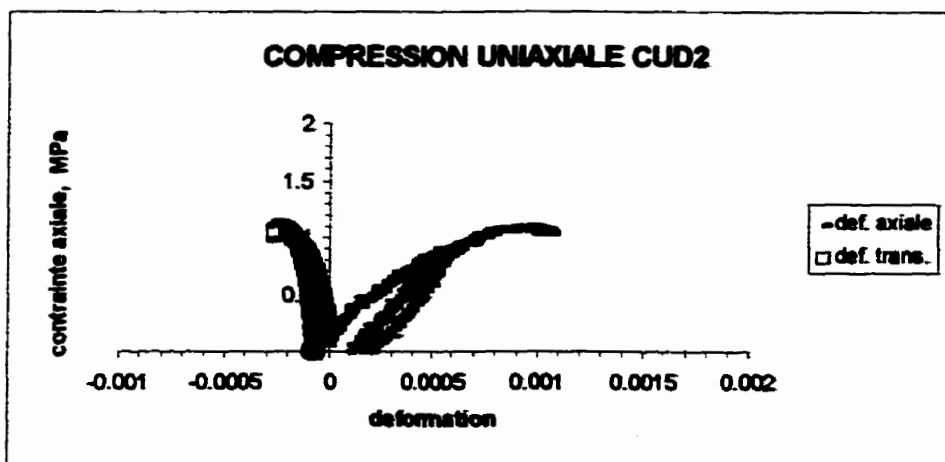


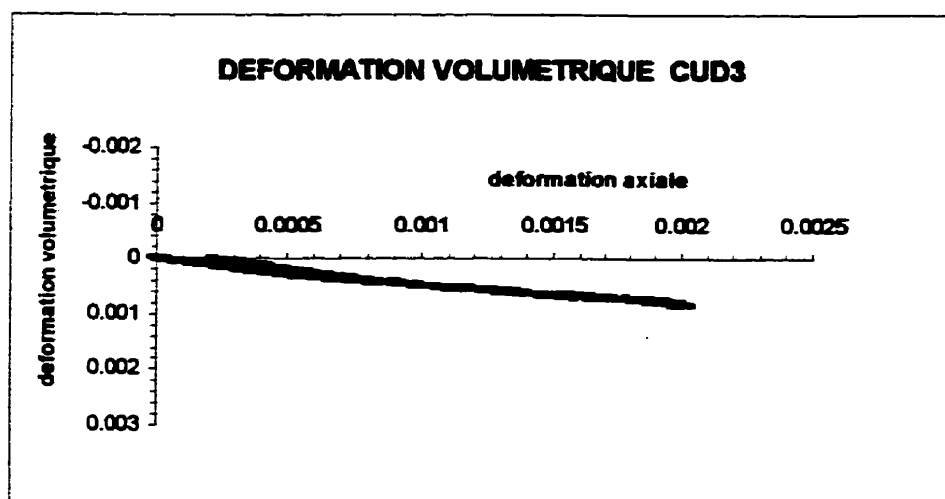
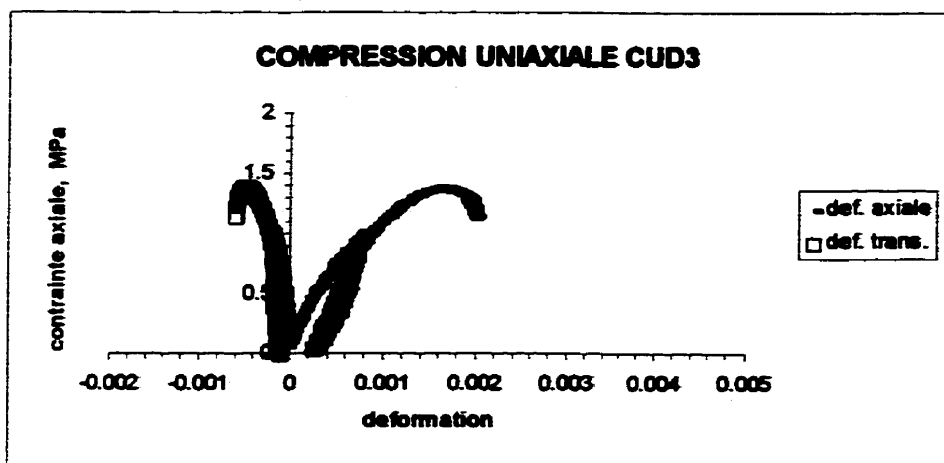


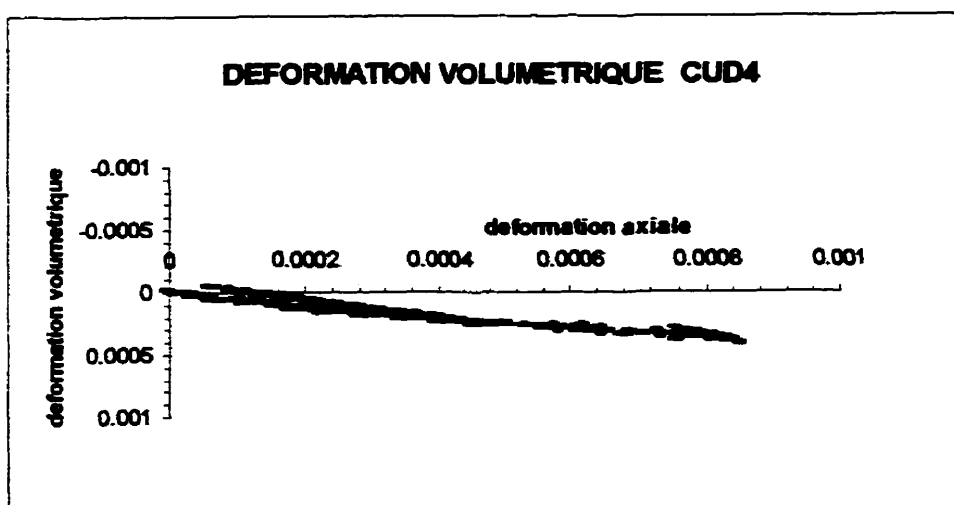
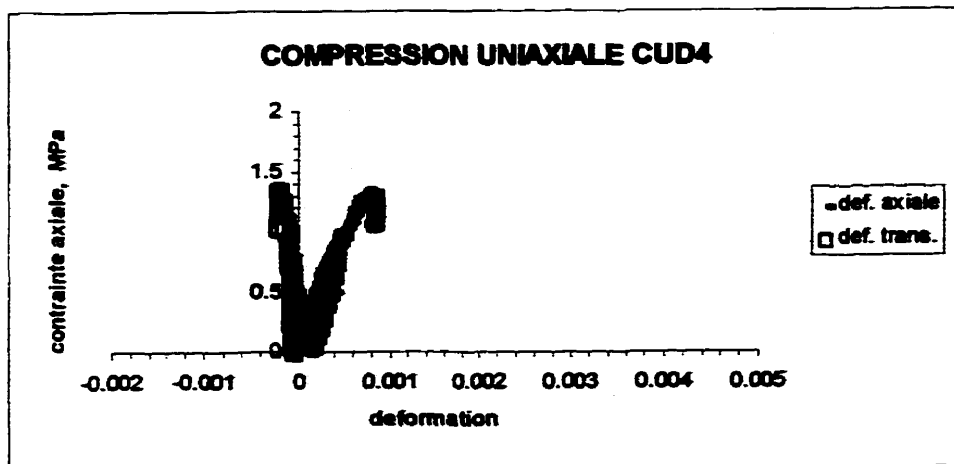


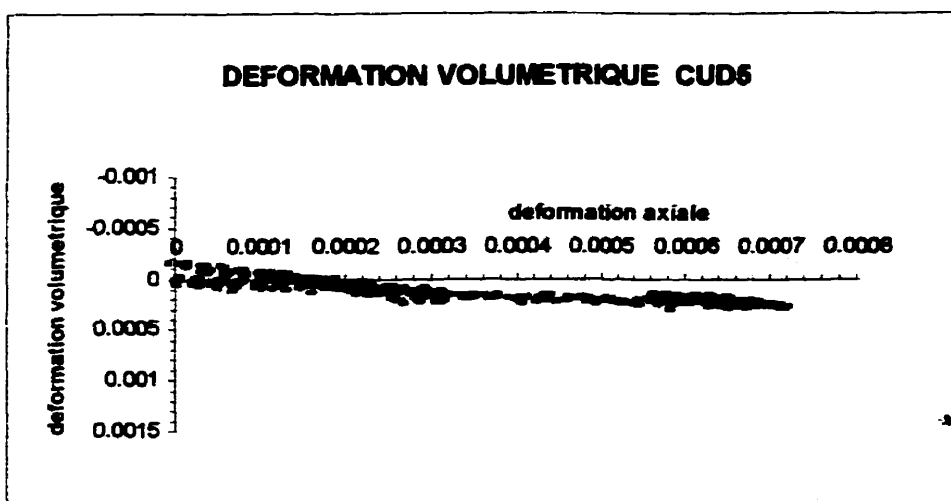
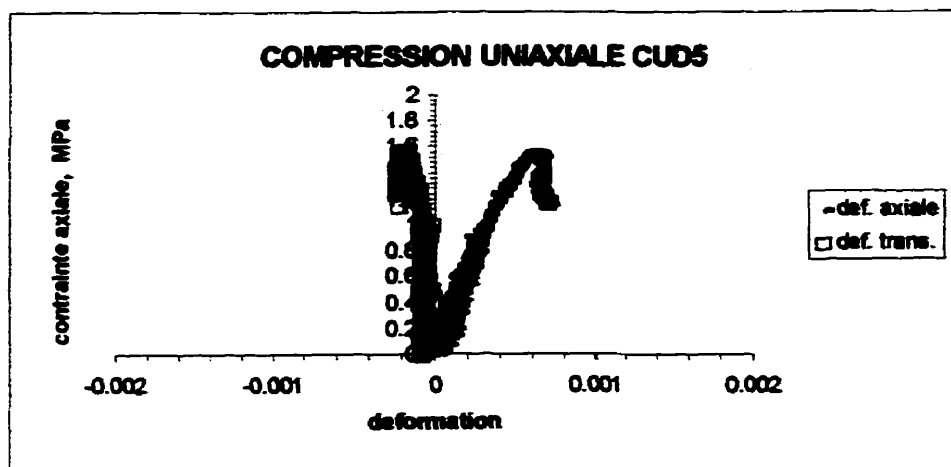


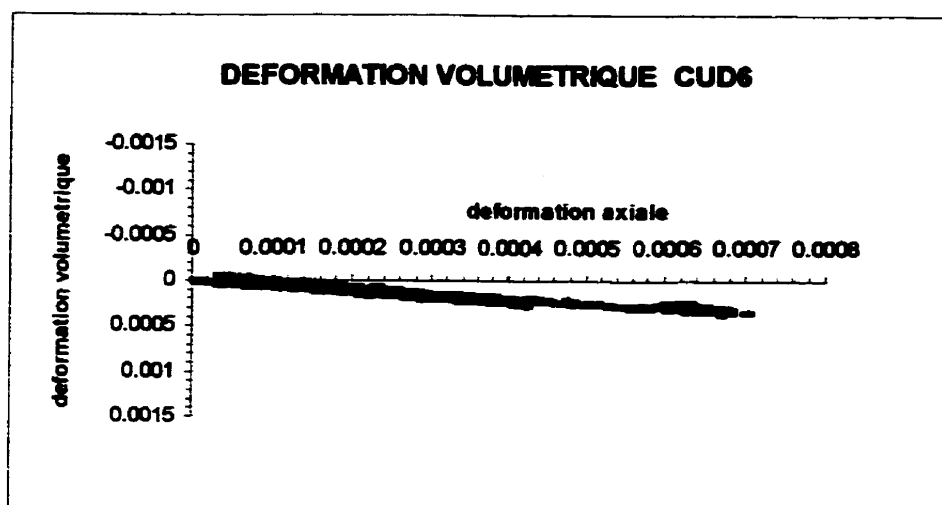
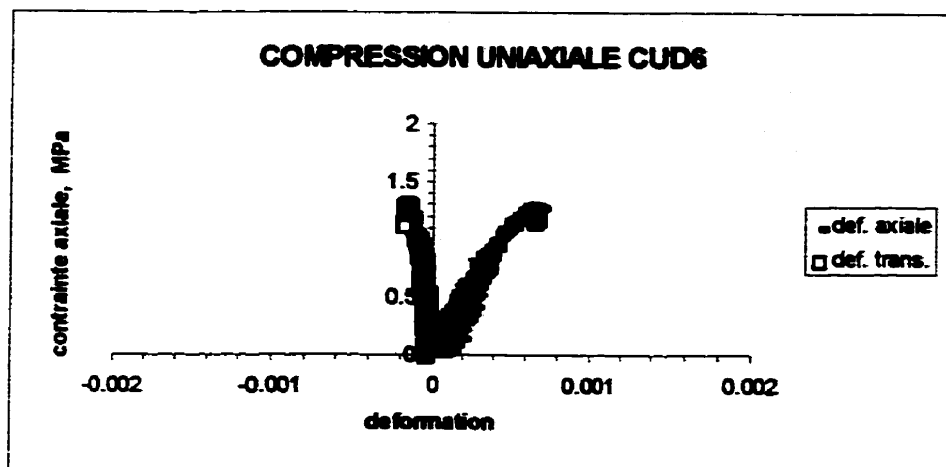


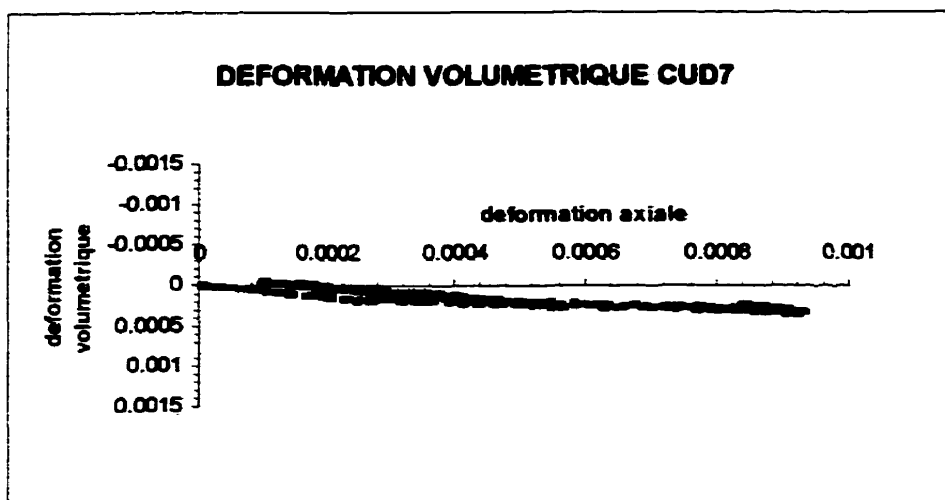
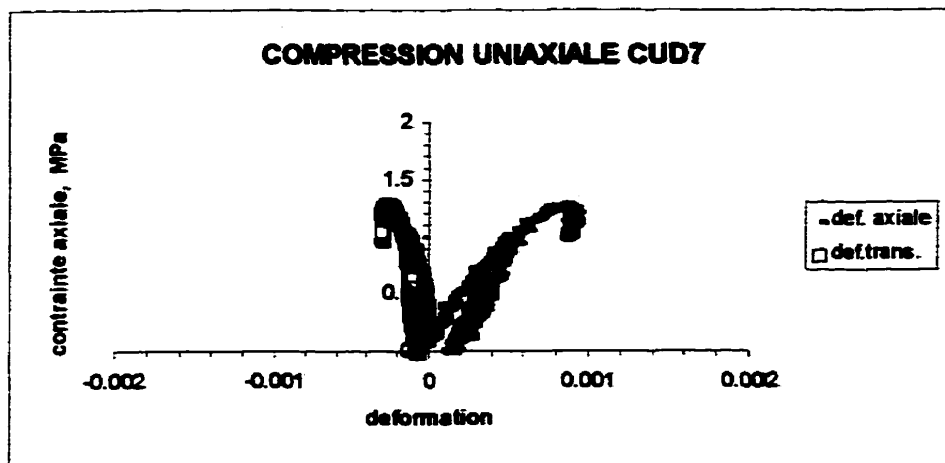


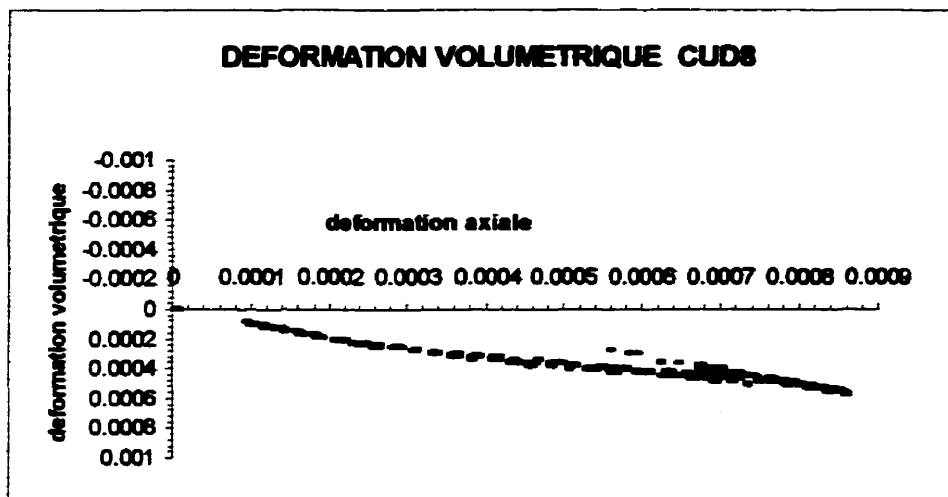
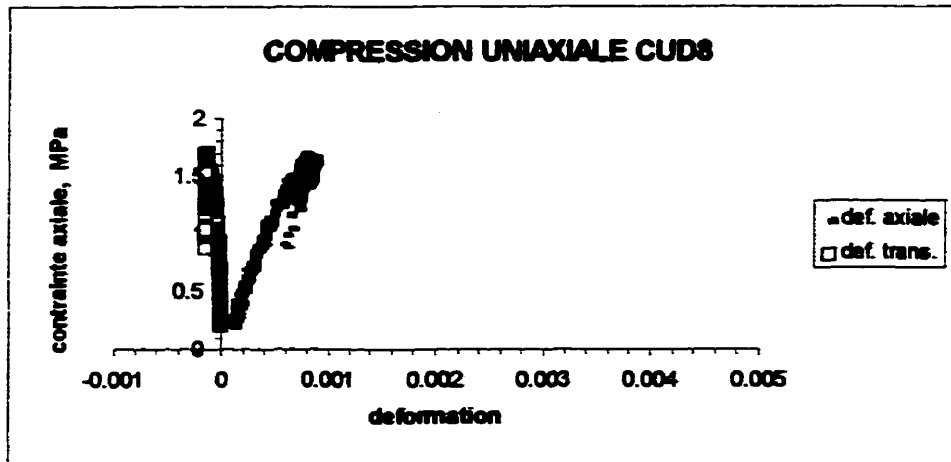


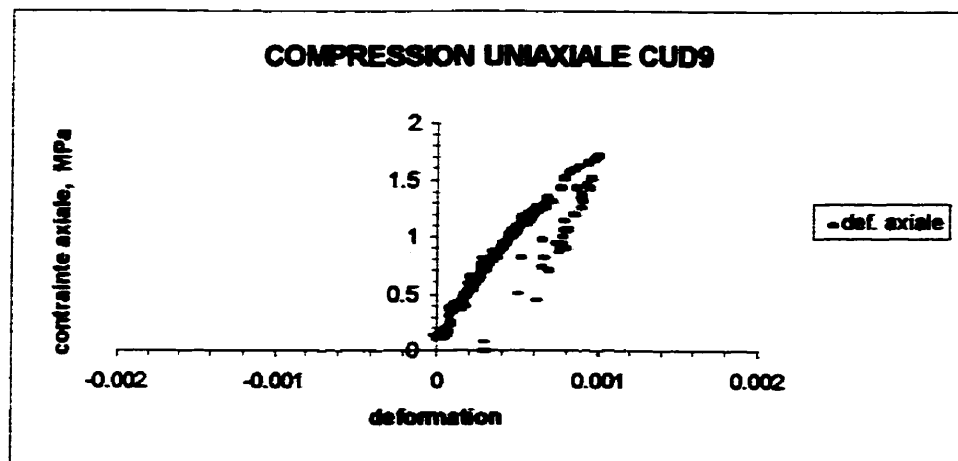


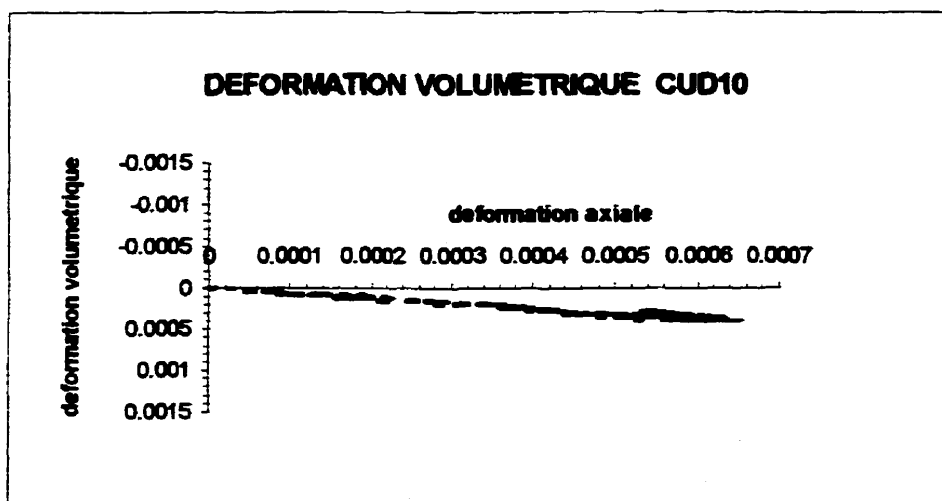
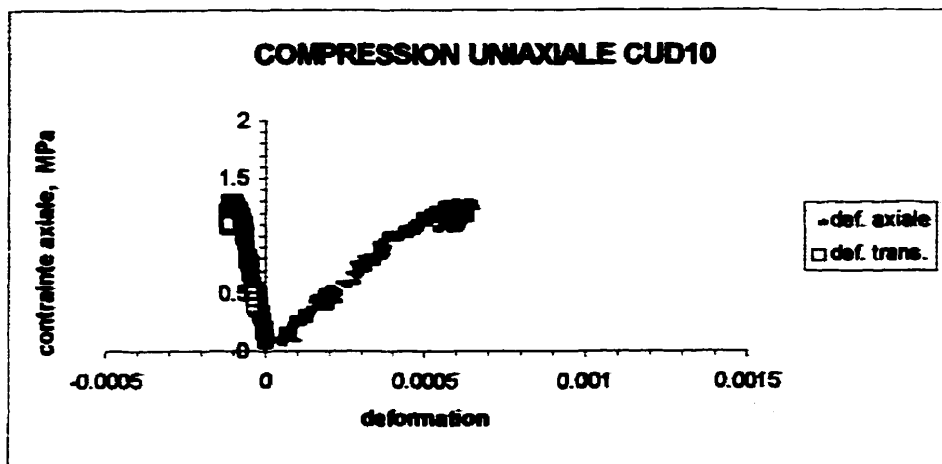


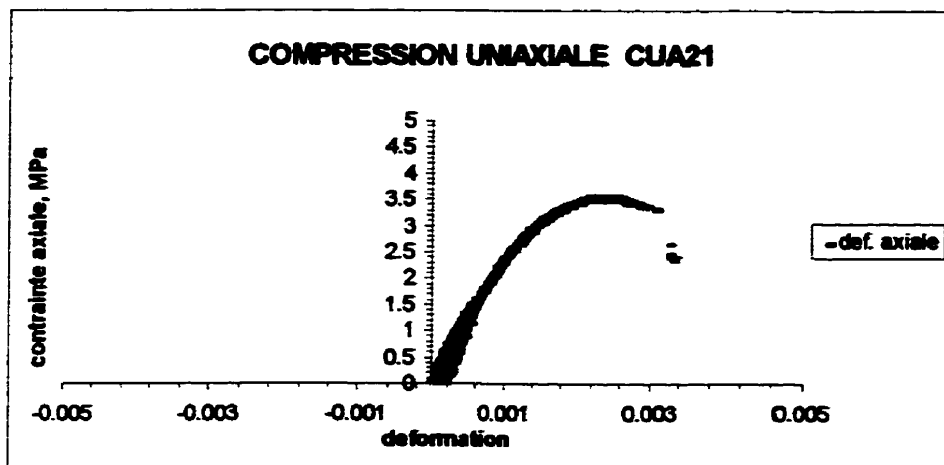


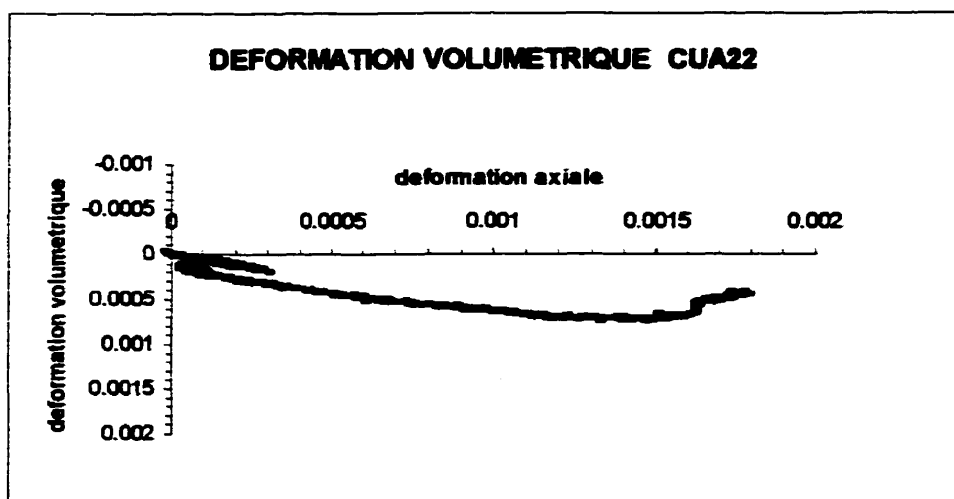
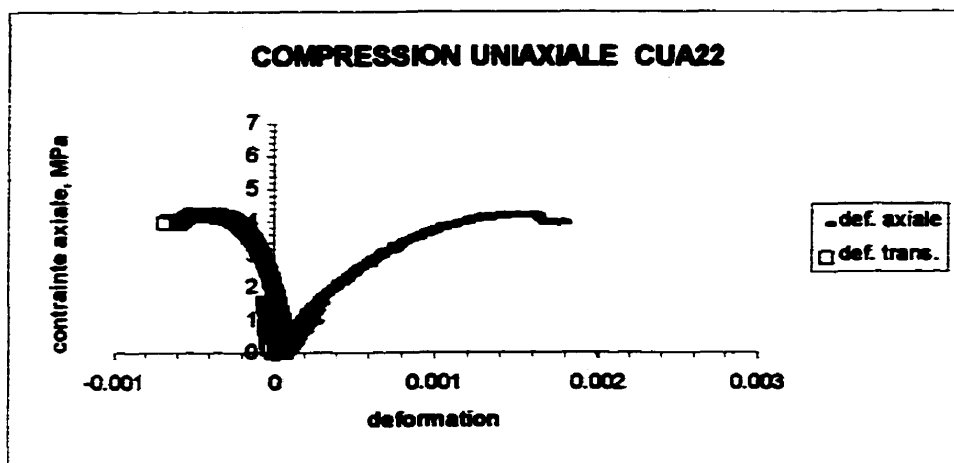


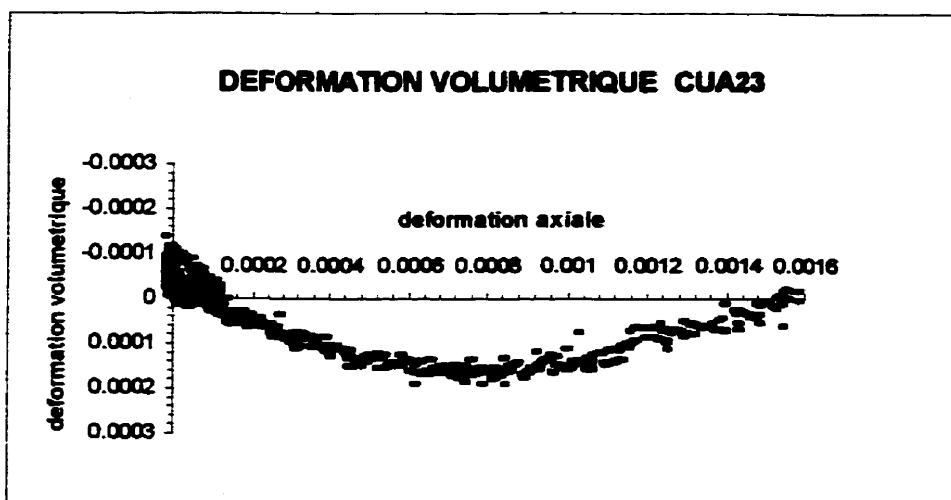
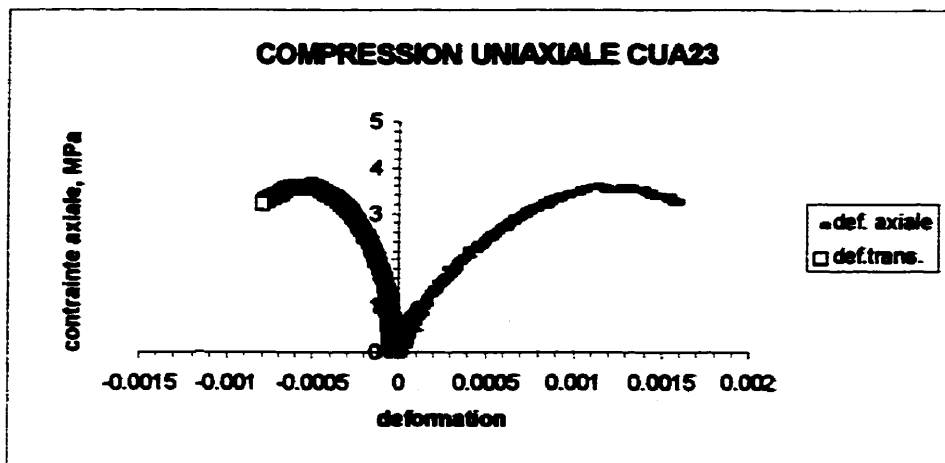


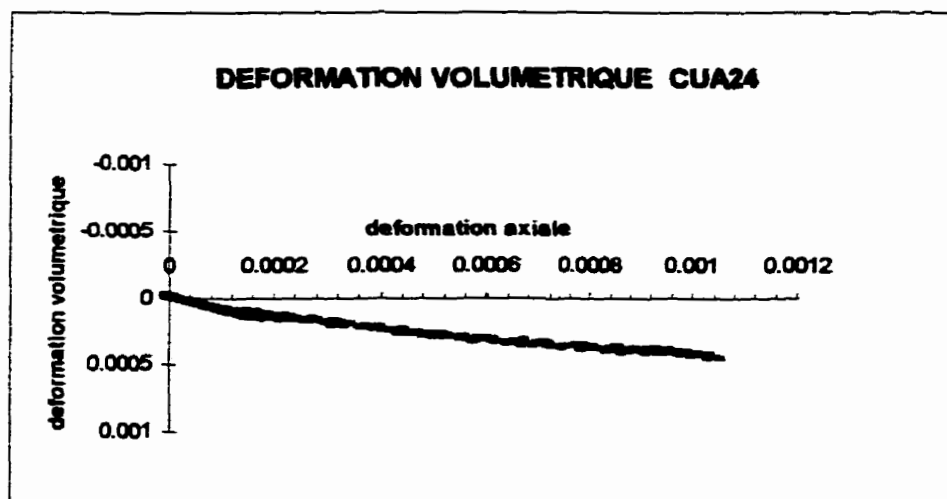
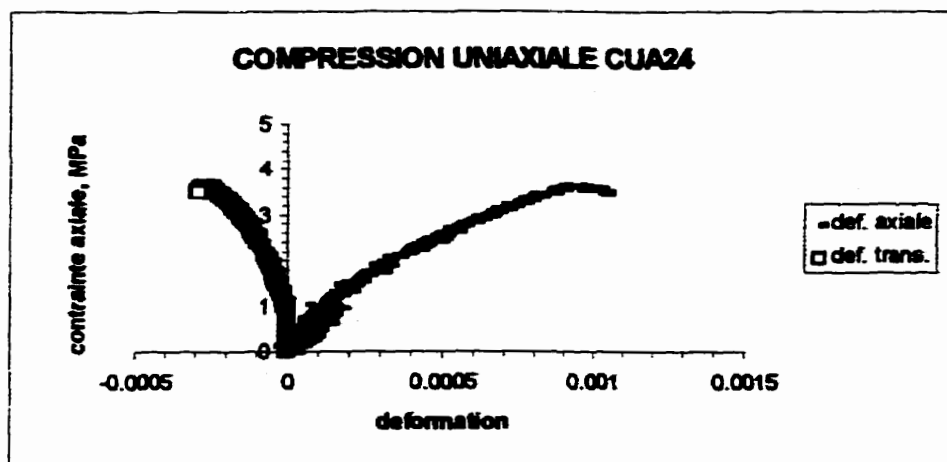


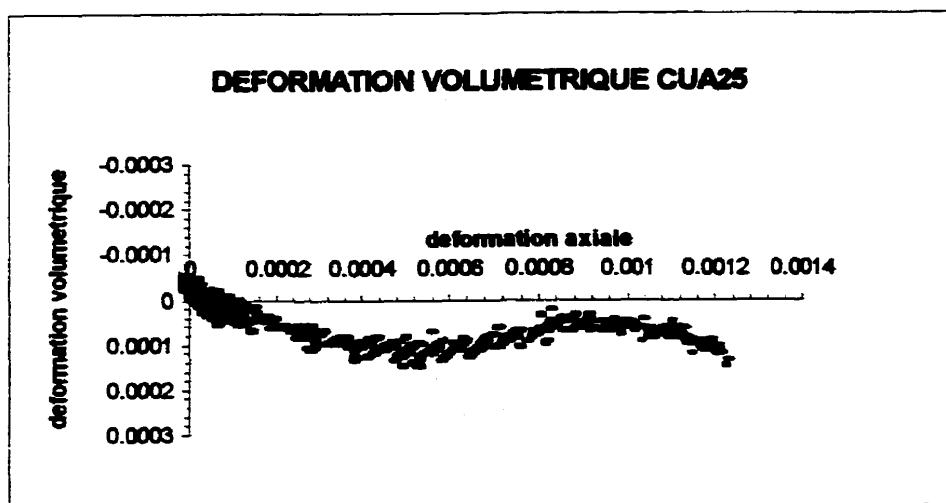
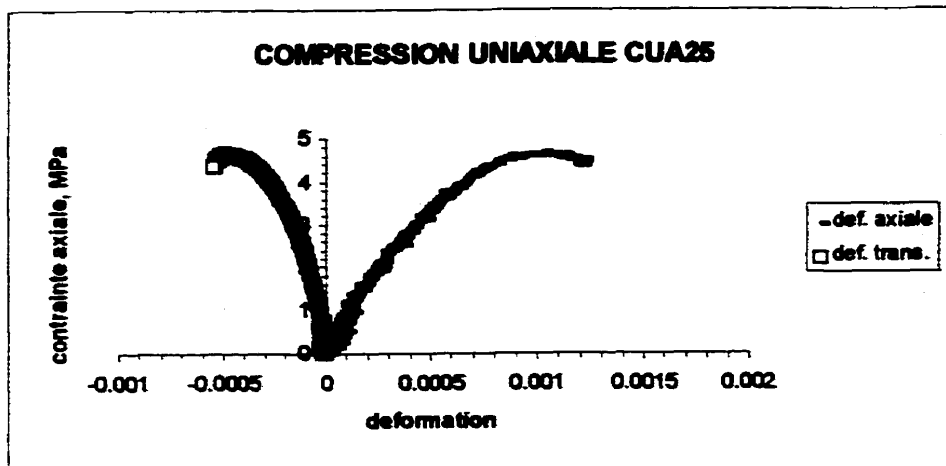


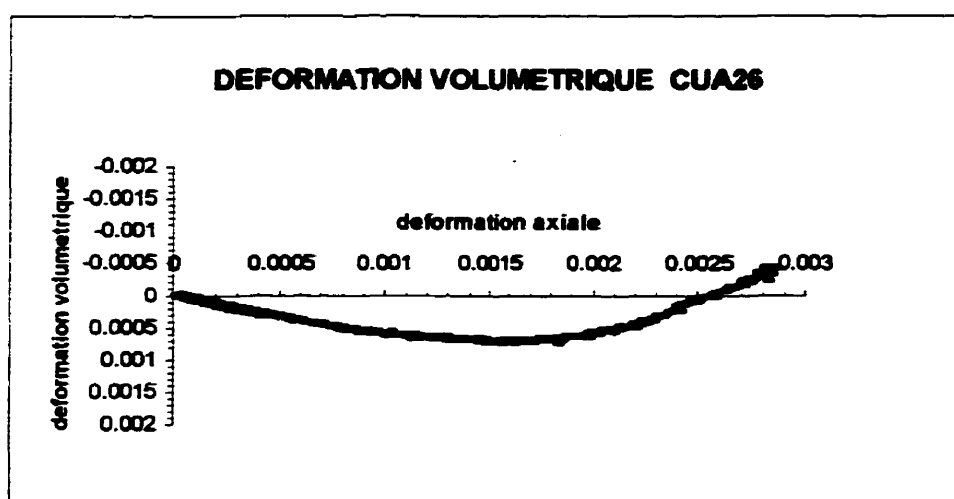
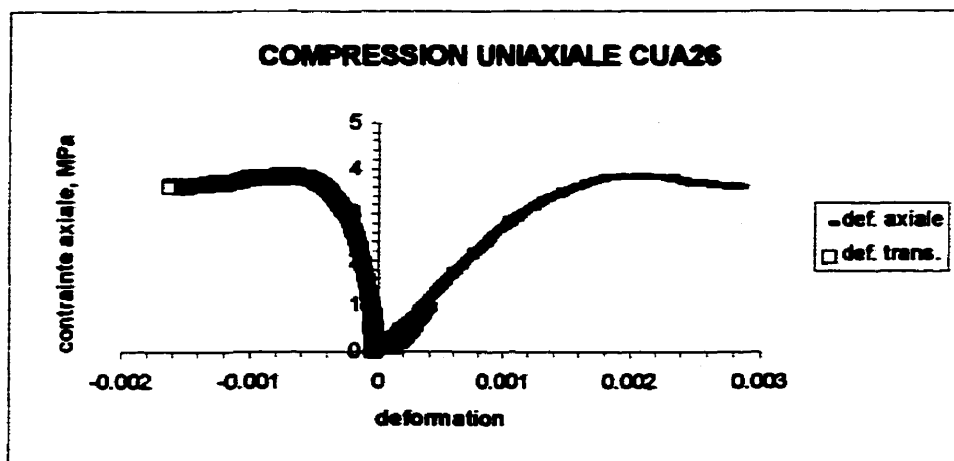


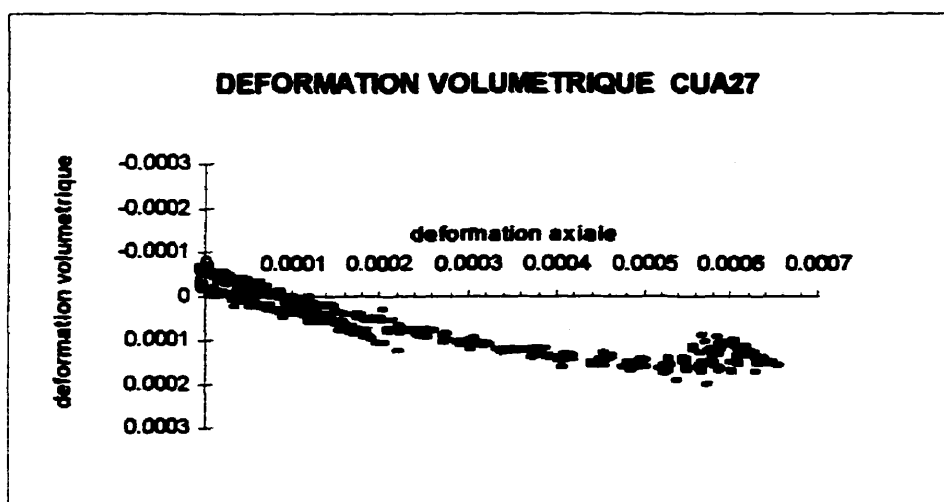
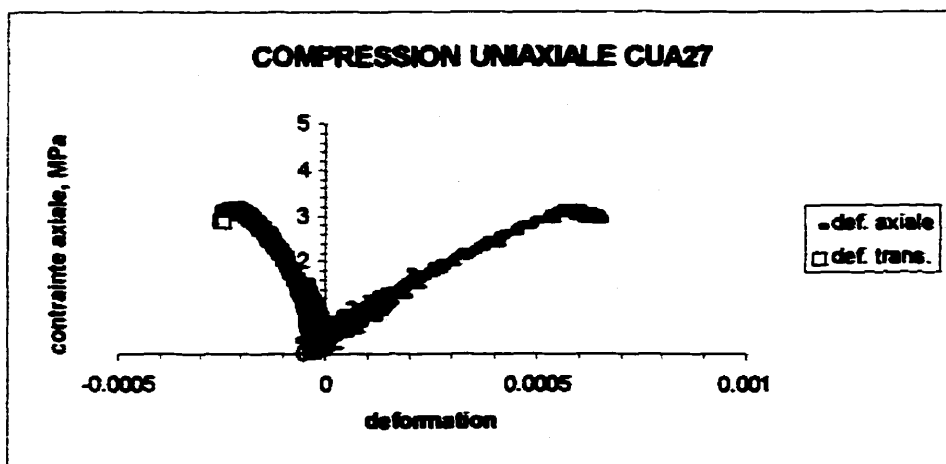


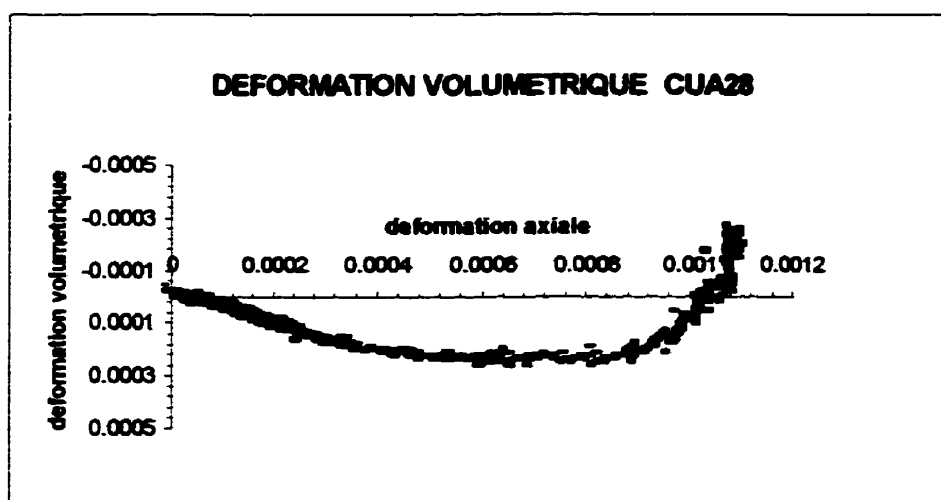
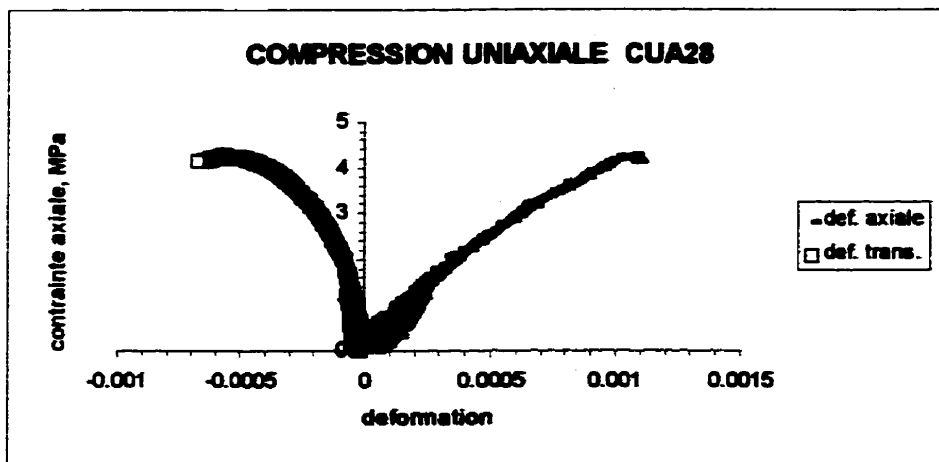


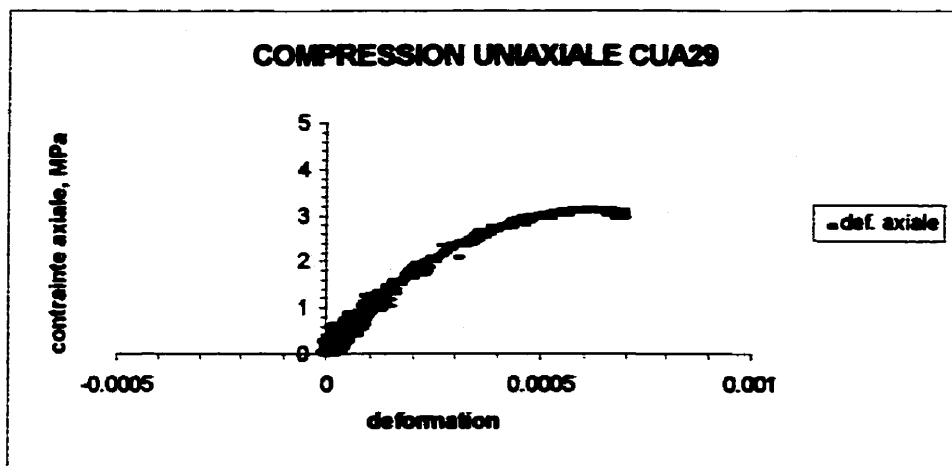


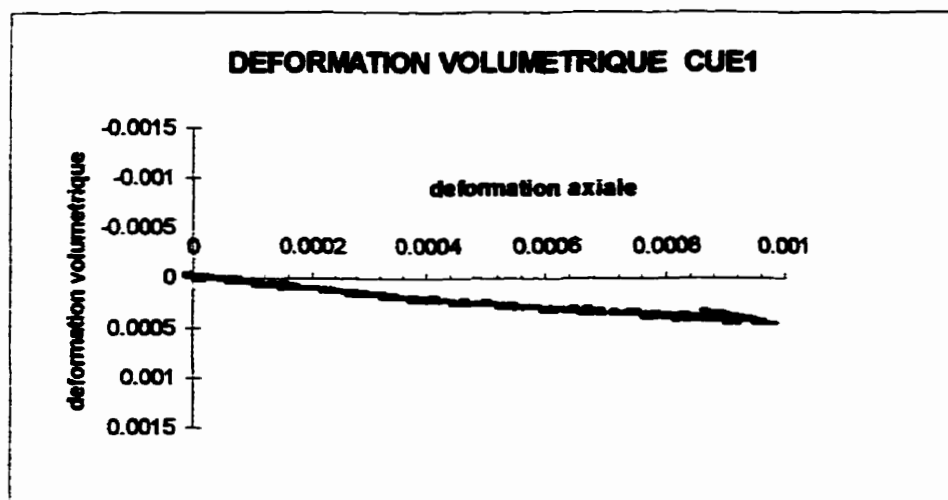
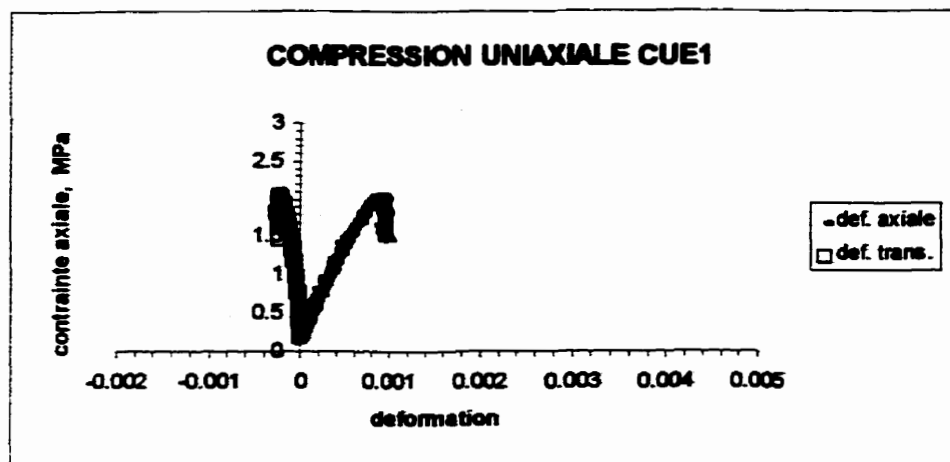


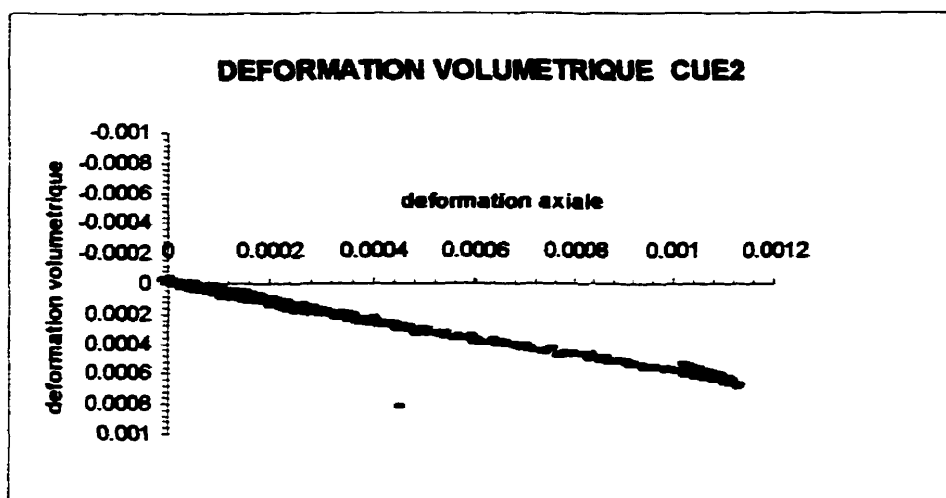
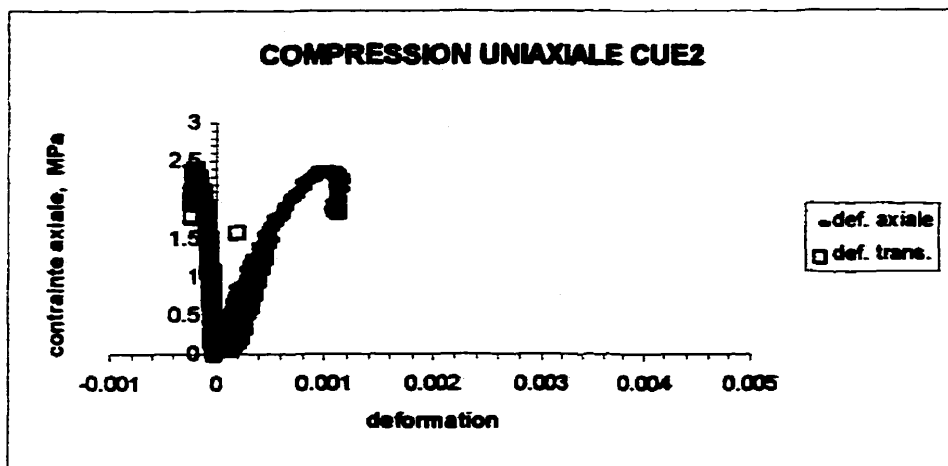


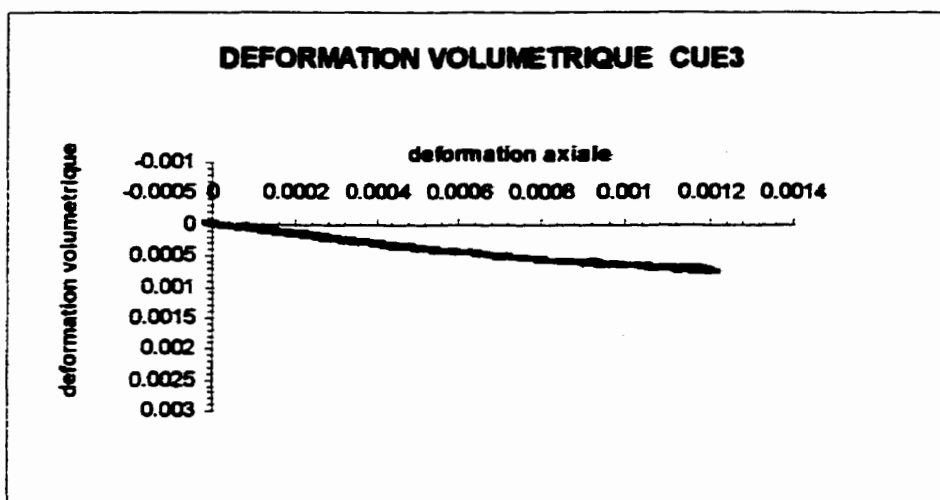
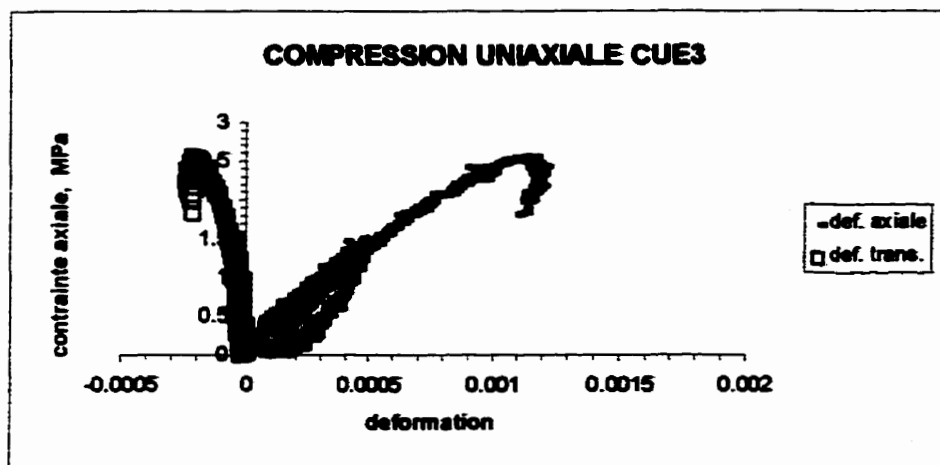


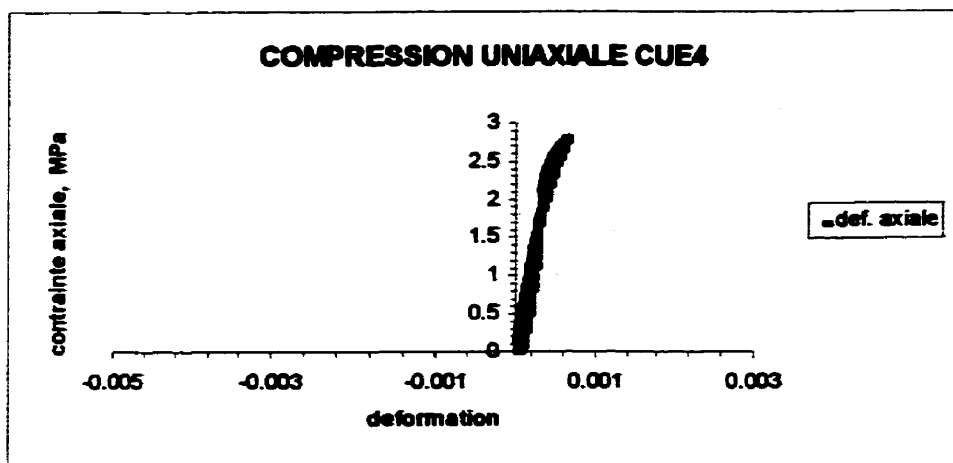


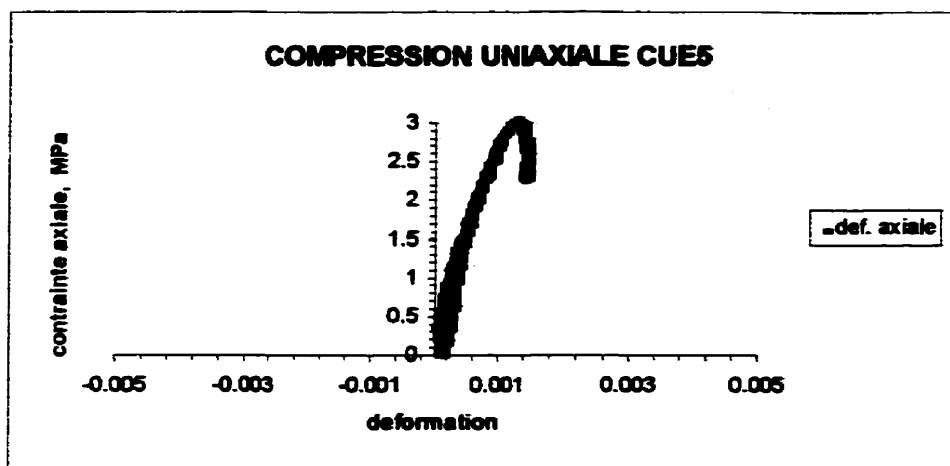


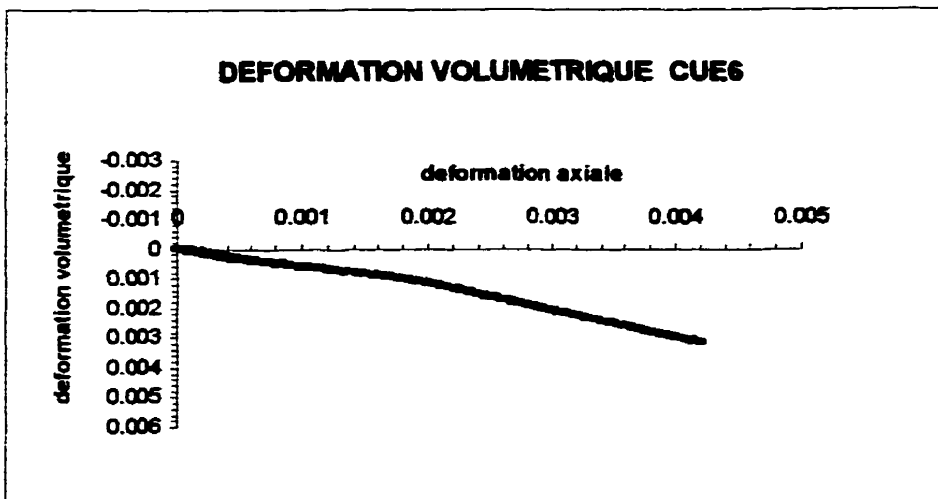
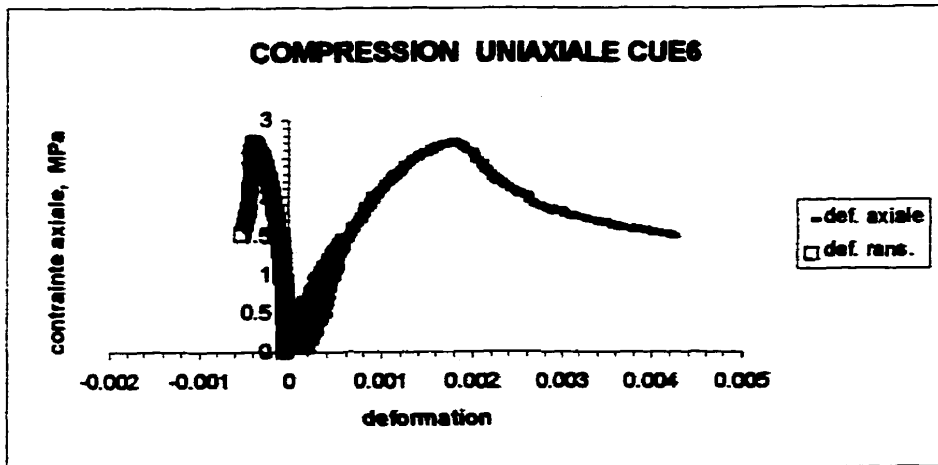


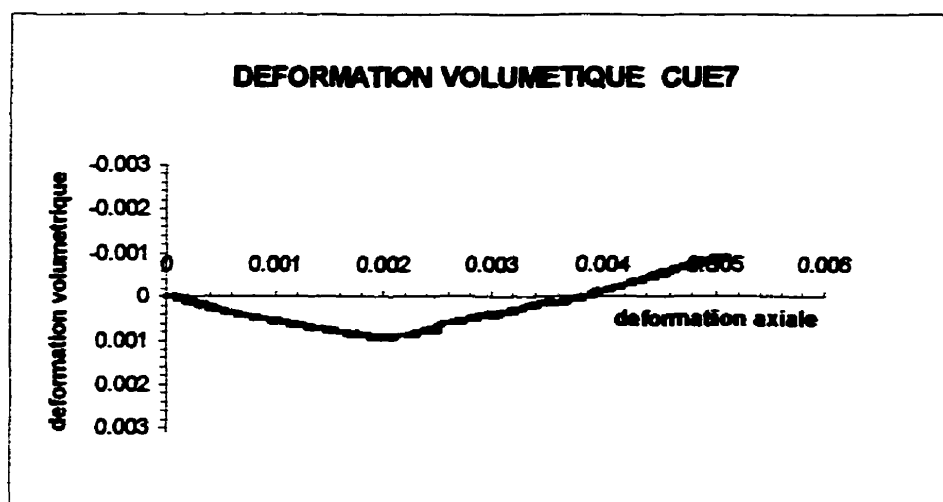
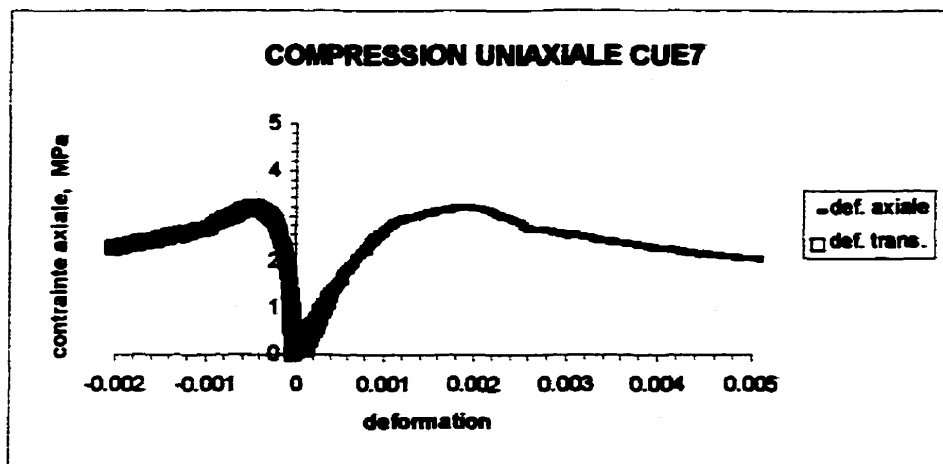


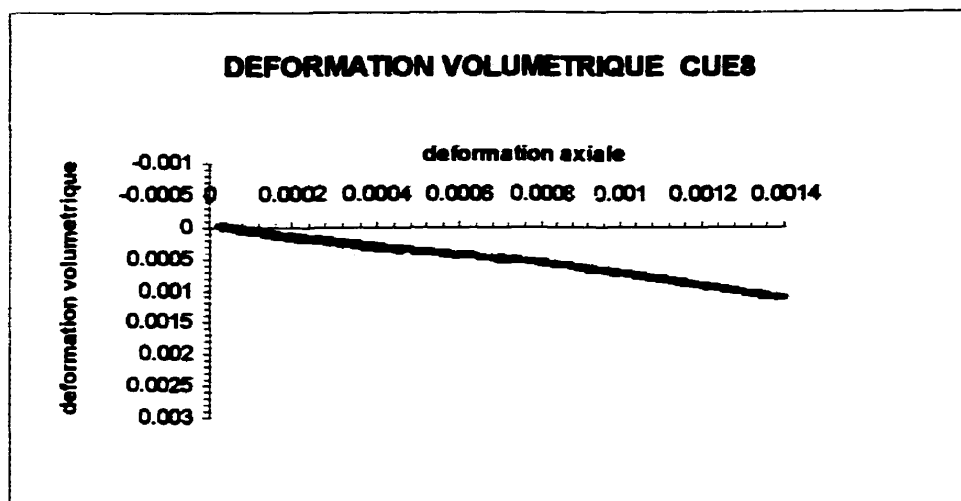
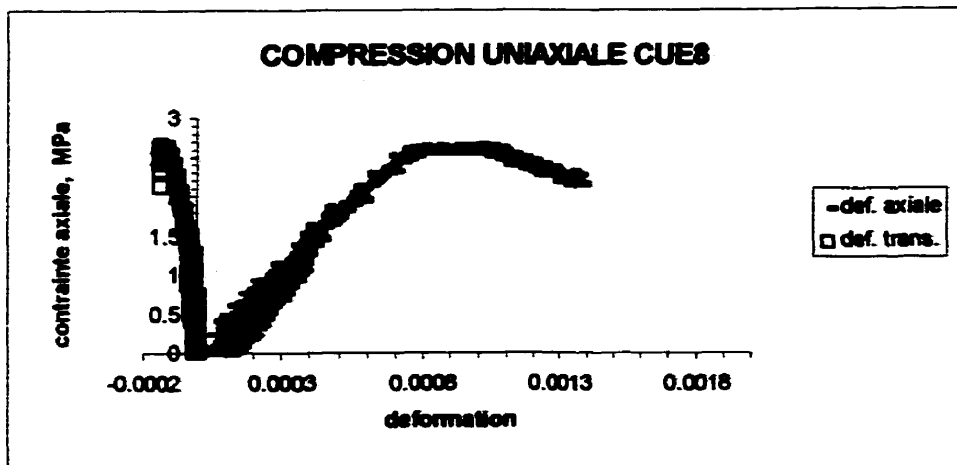


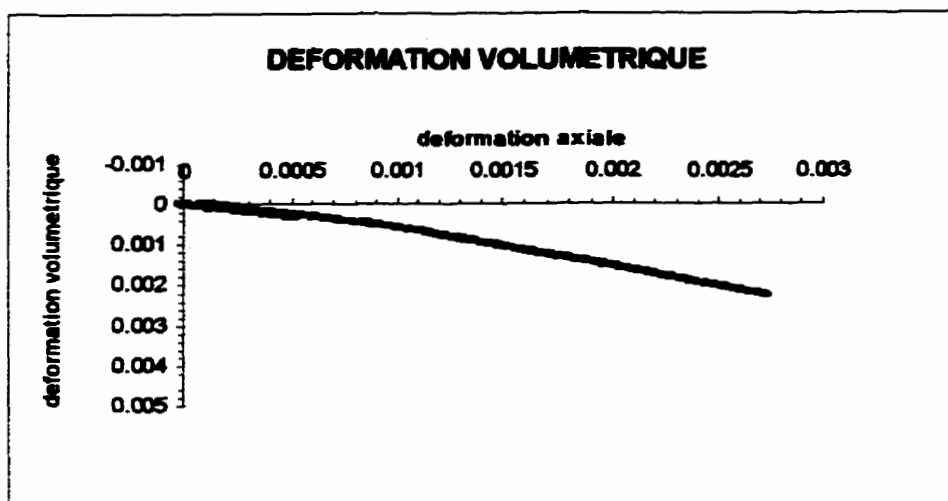
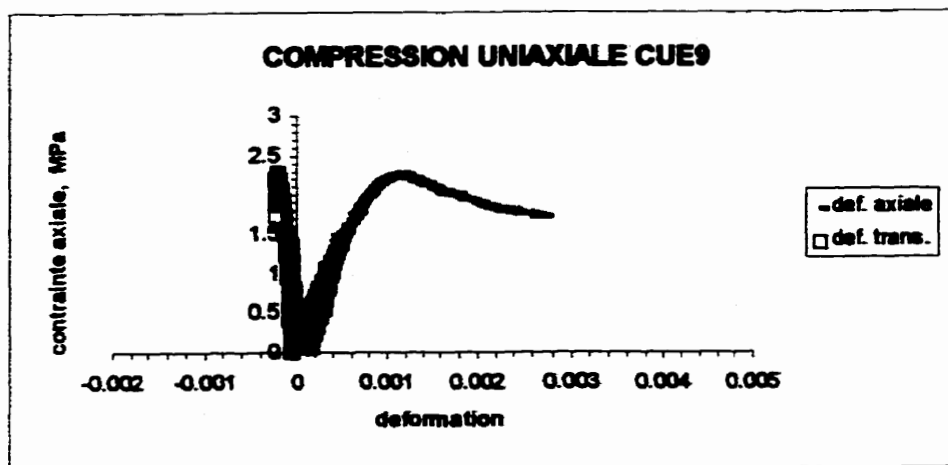


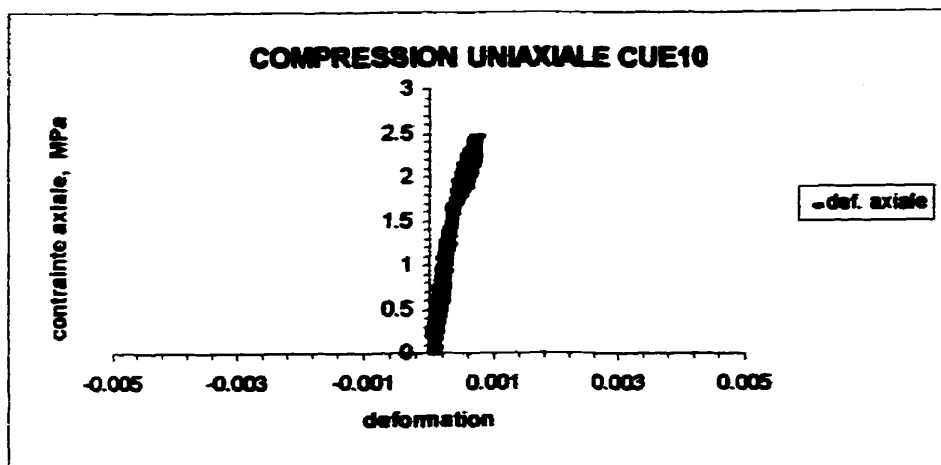






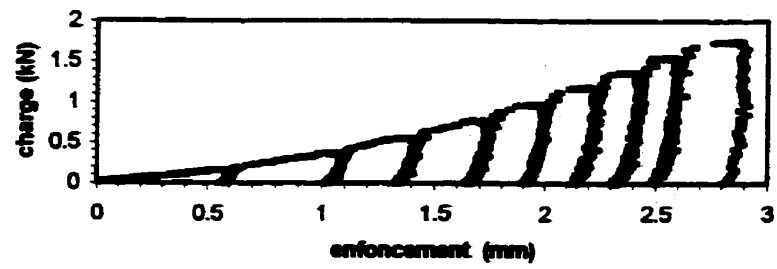




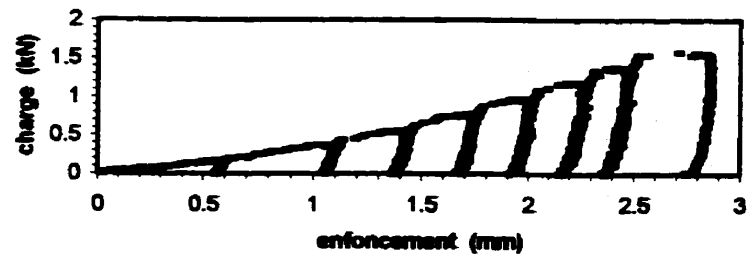


ANNEXE B
COURBES DE POINÇONNEMENT

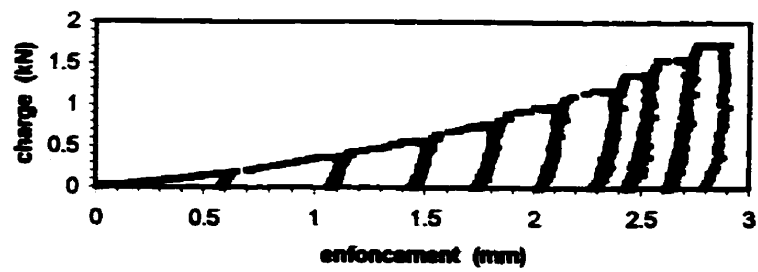
BC_1



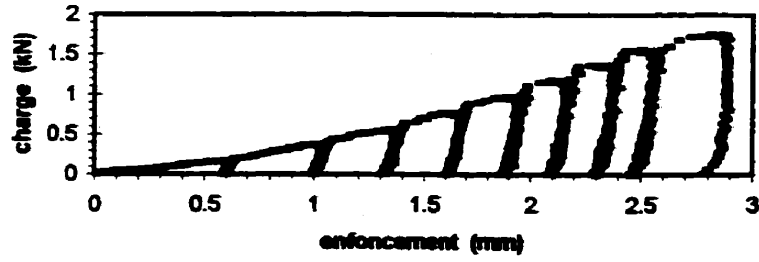
BC_2



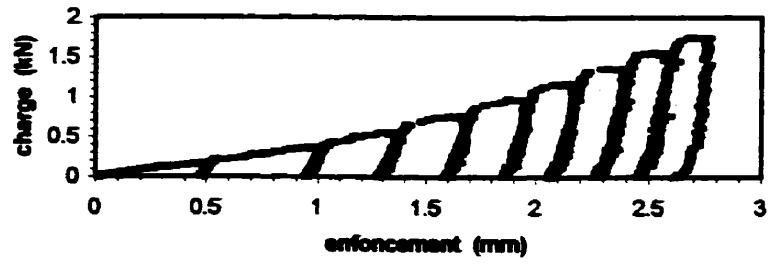
BC_3



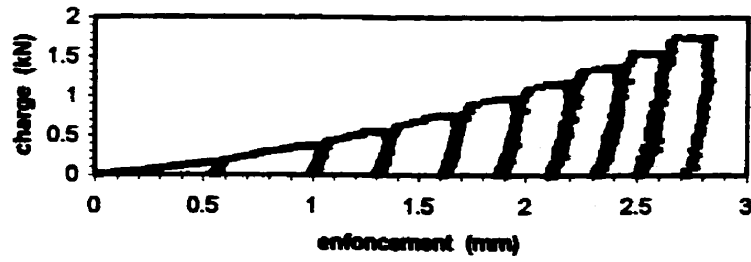
BC_4



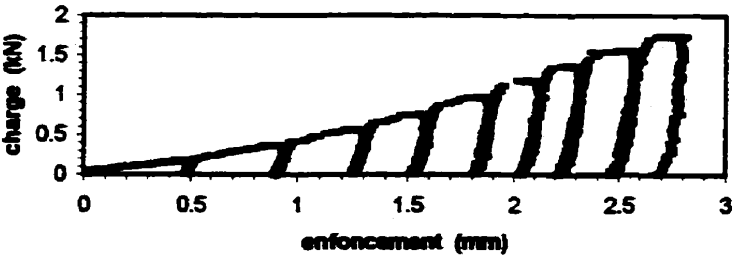
BC_5



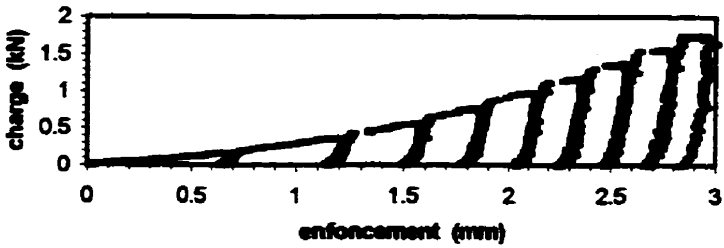
BC_6



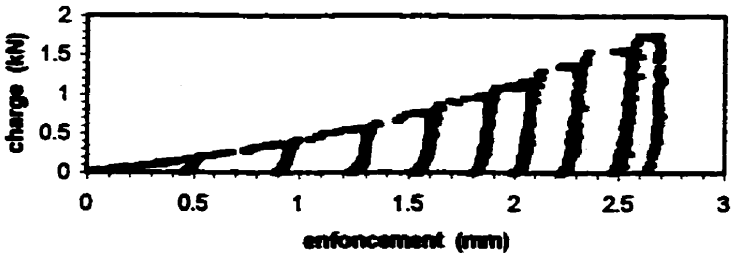
BC_7



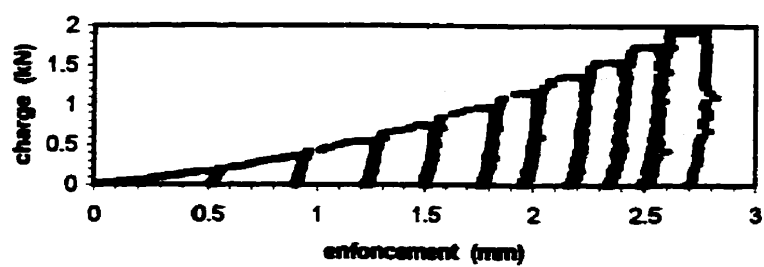
BC_8



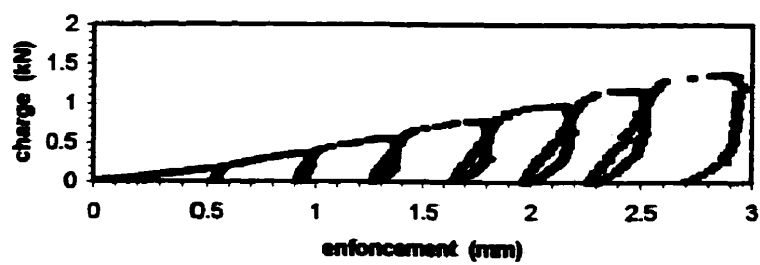
BC_9



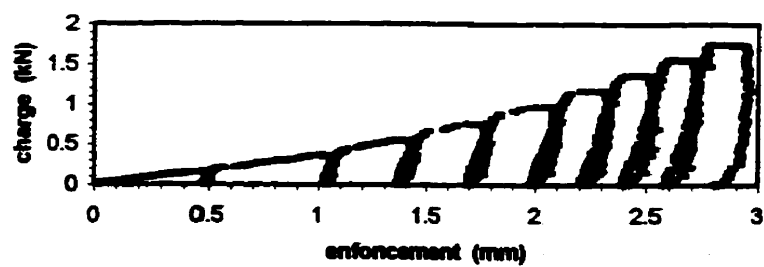
BC_10



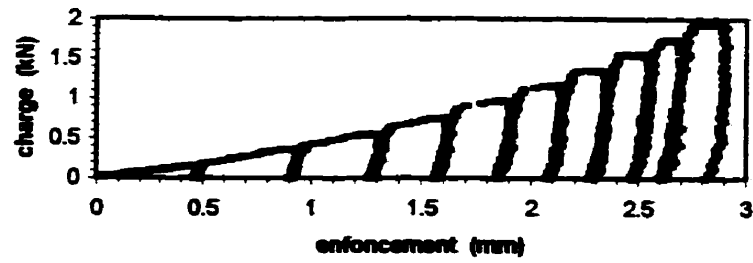
BC_11



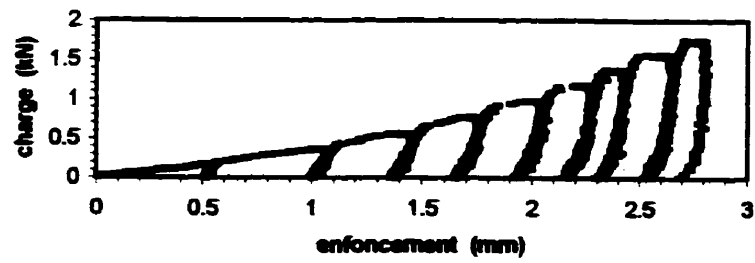
BC_12



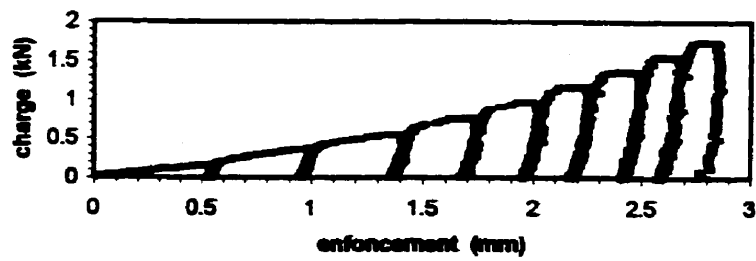
BC_13



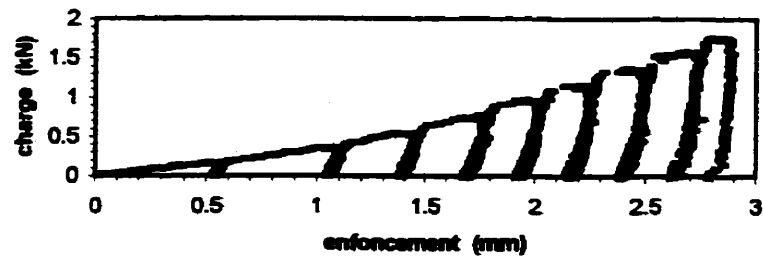
BC_14



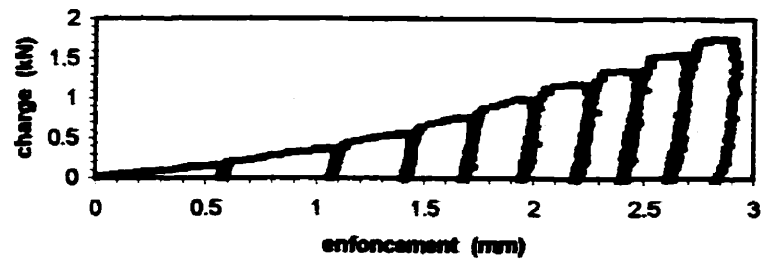
BC_15



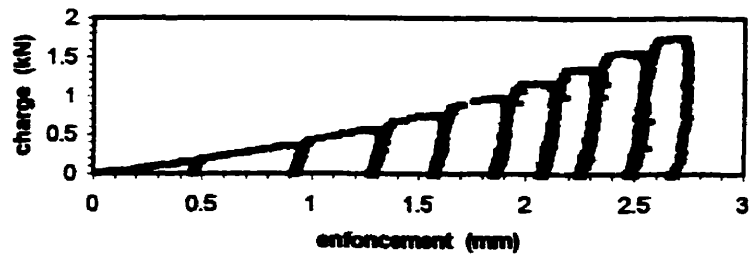
BC_16



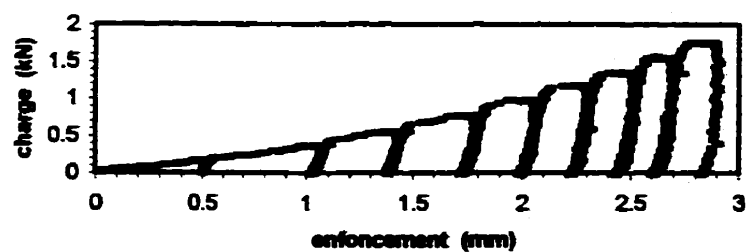
BC_17



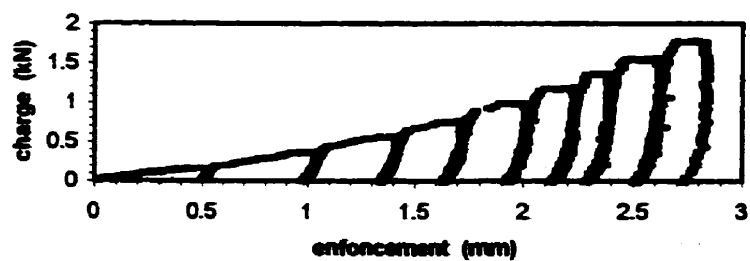
BC_18



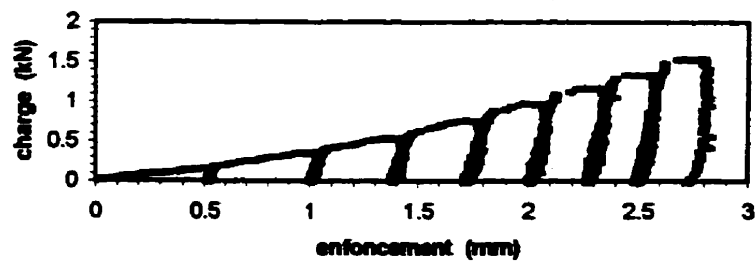
BC_19



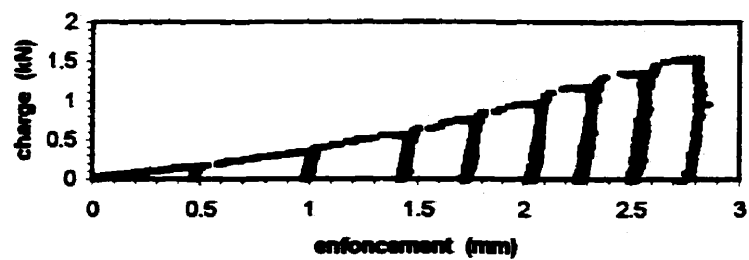
BC_20



BC_21



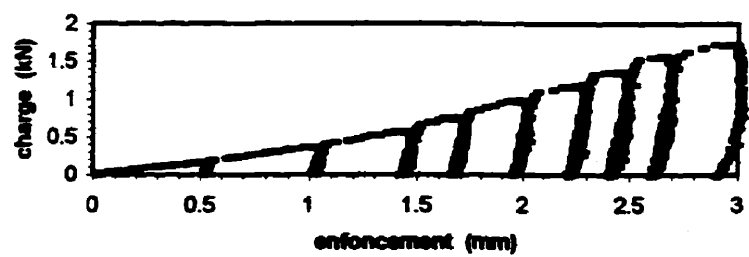
BC_22

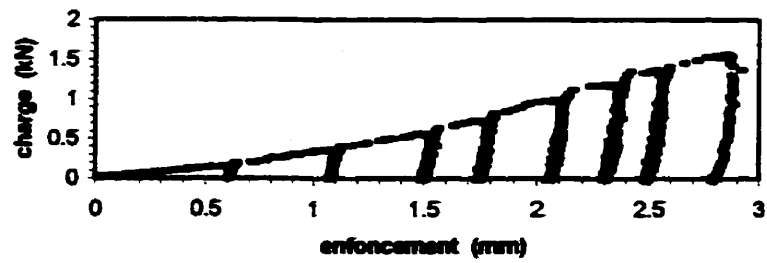
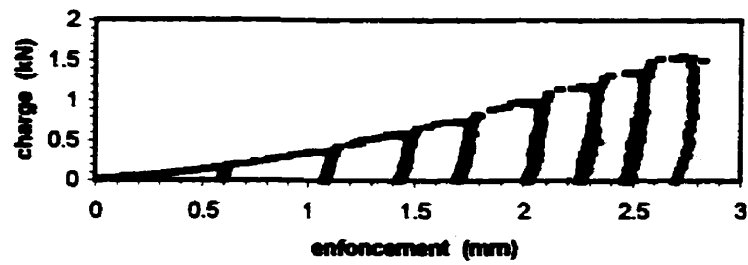
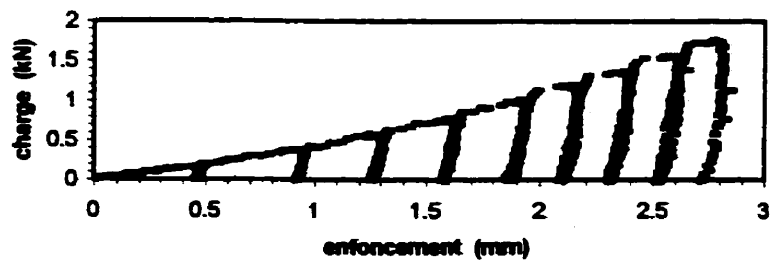


BC_23

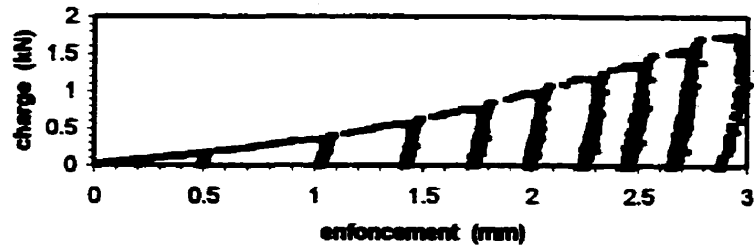


BC_24

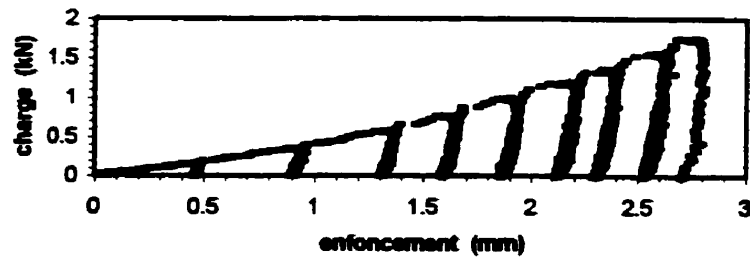


BC_25**BC_26****BC_27**

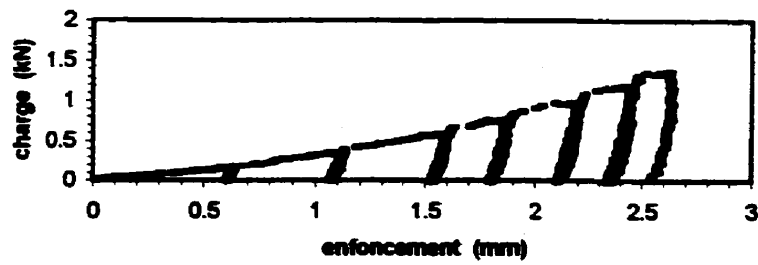
BC_28



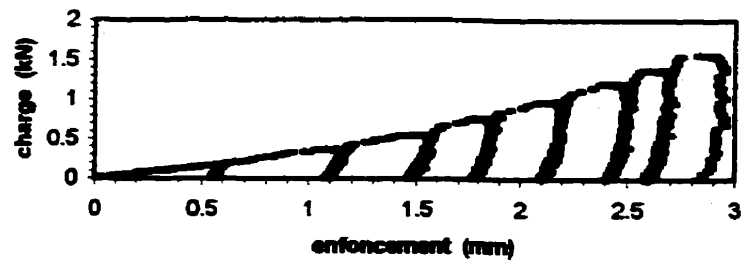
BC_29



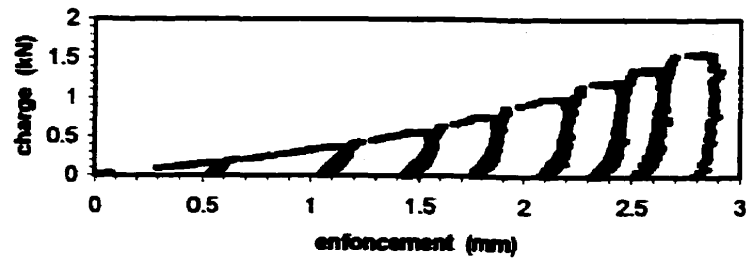
BC_30



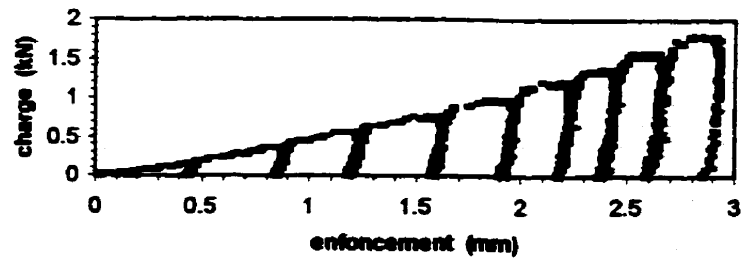
BC_31



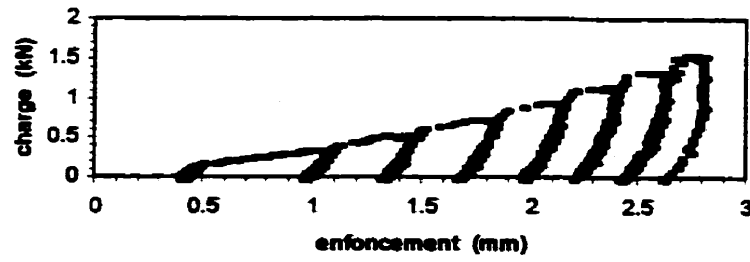
BC_32



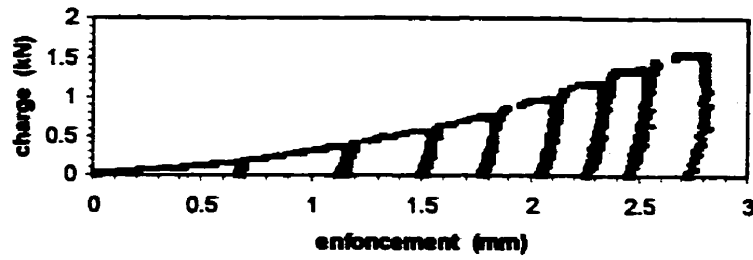
BC_33



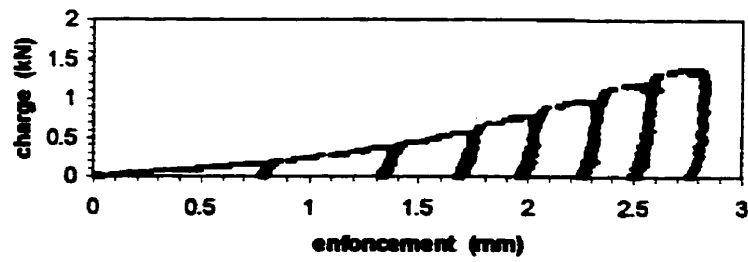
BC_34



BC_35



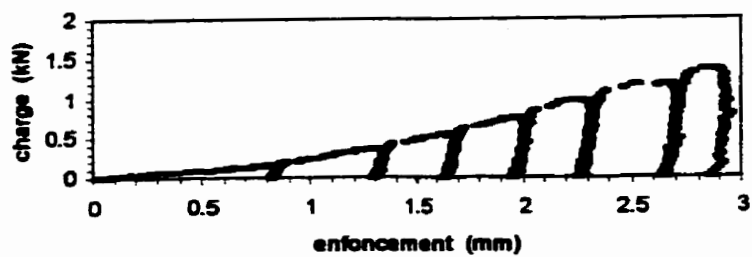
BC_36



BC_37



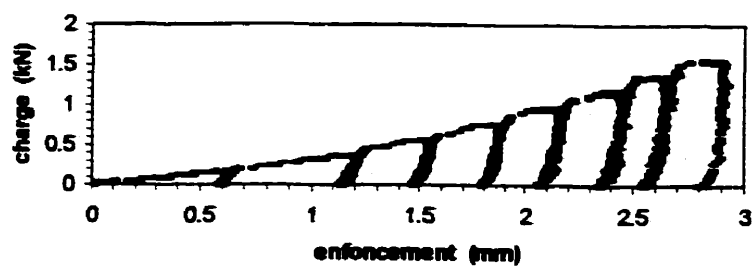
BC_38



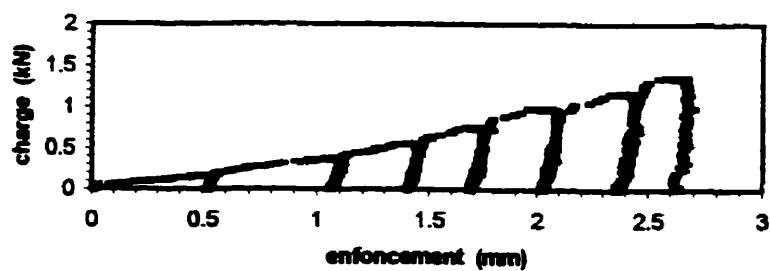
BC_39



BC_40



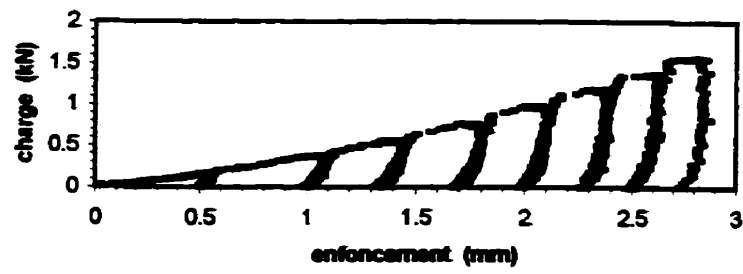
BC_41



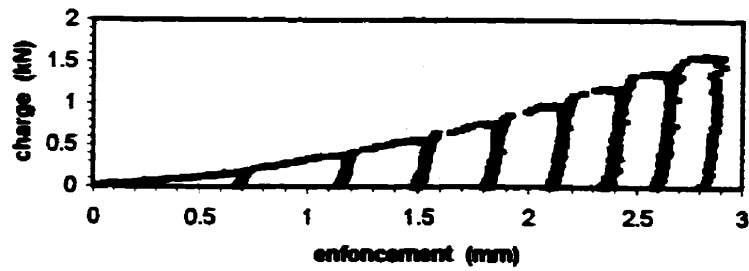
BC_42



BC_43



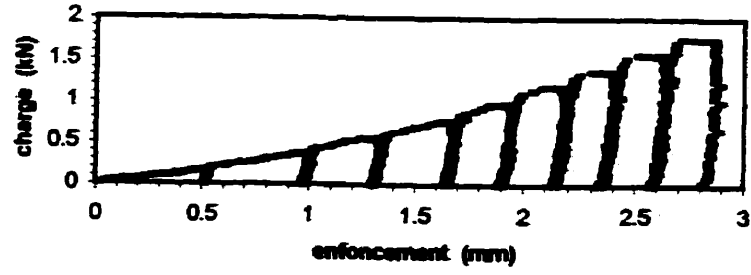
BC_44



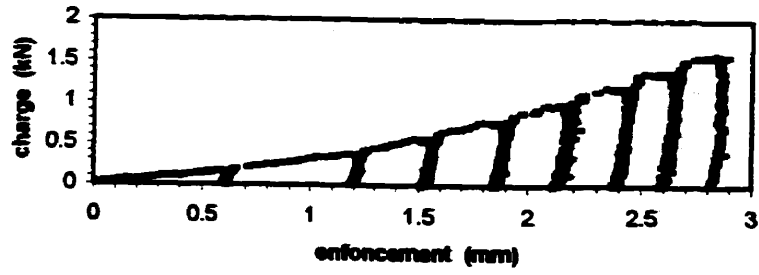
BC_45



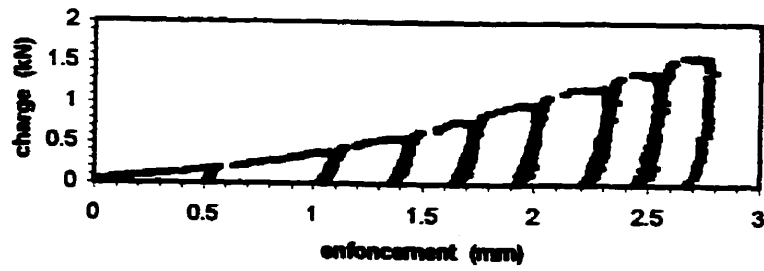
BC_46



BC_47



BC_48



BC_49



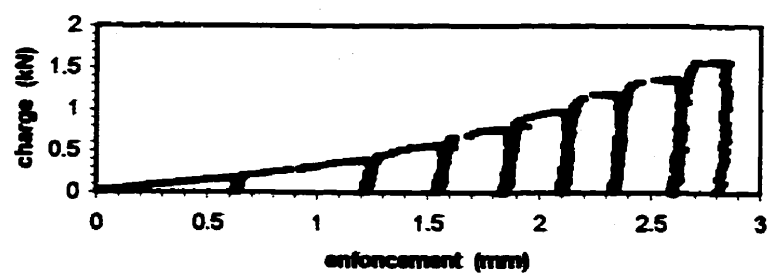
BC_50



BC_51



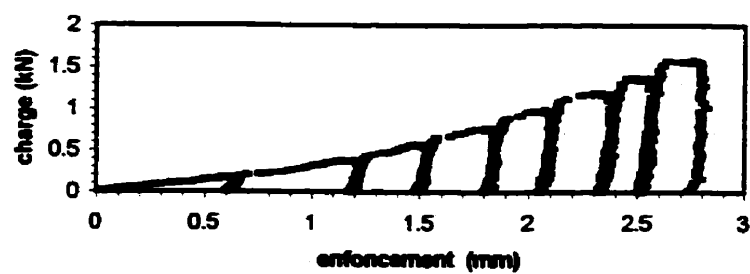
BC_52



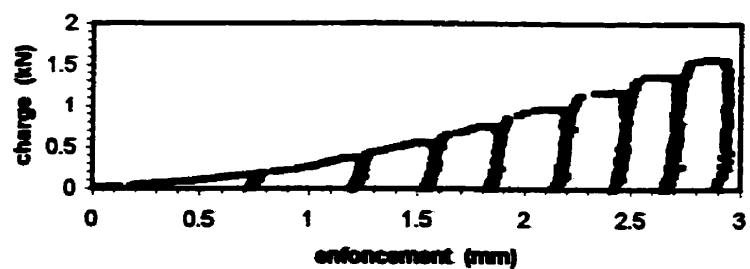
BC_53



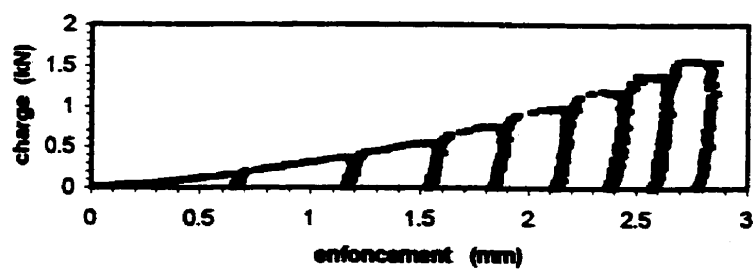
BC_54



BC_56



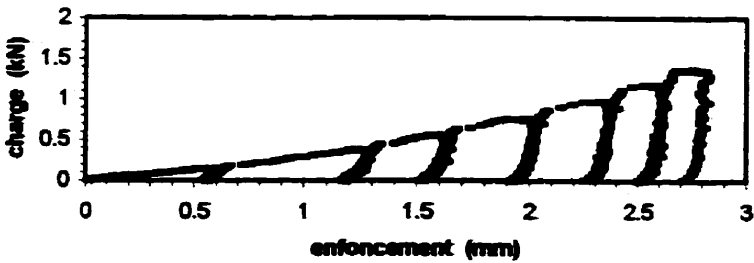
BC_56



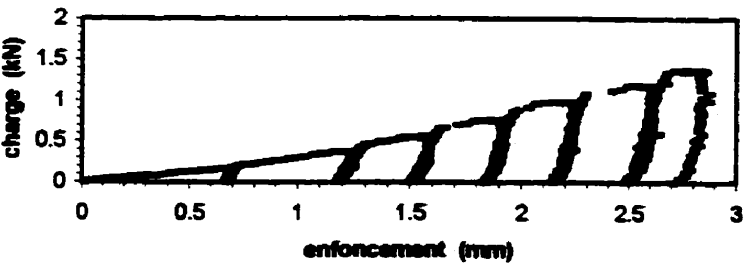
BC_57



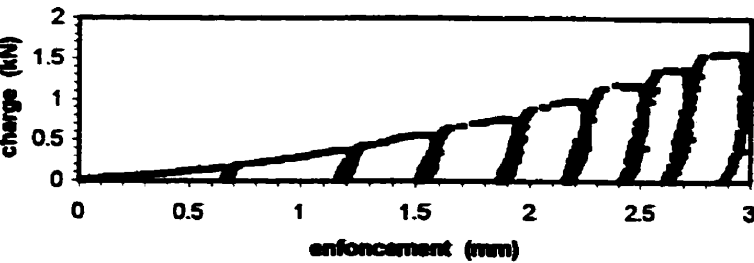
BC_58



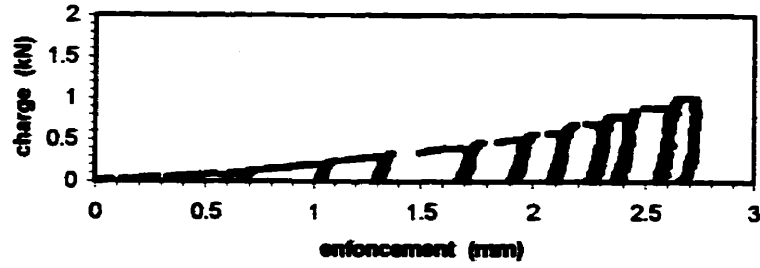
BC_59



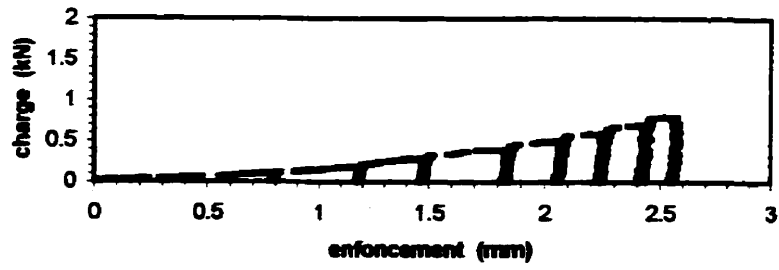
BC_60



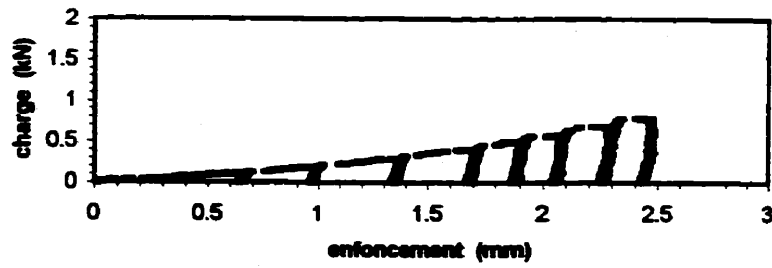
BF_3



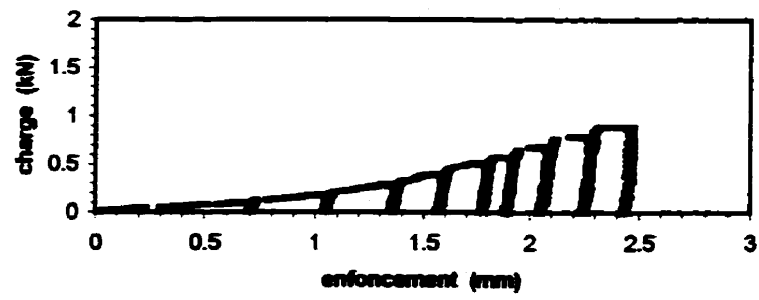
BF_4



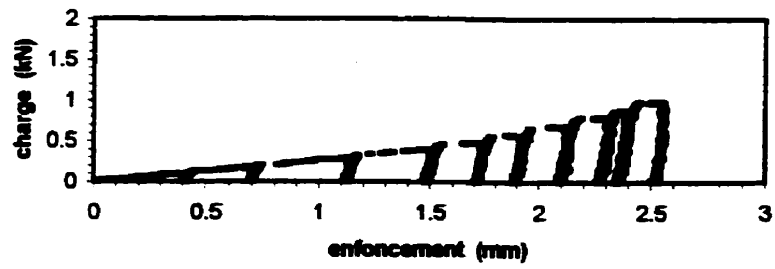
BF_5



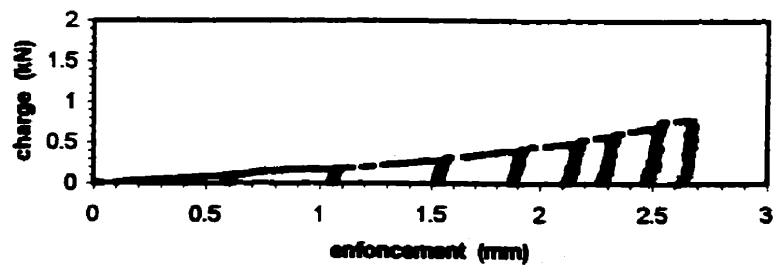
BF_6

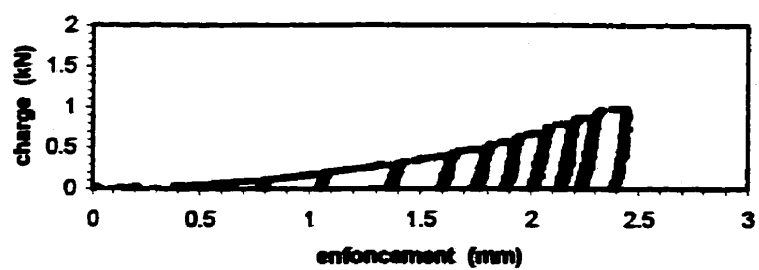
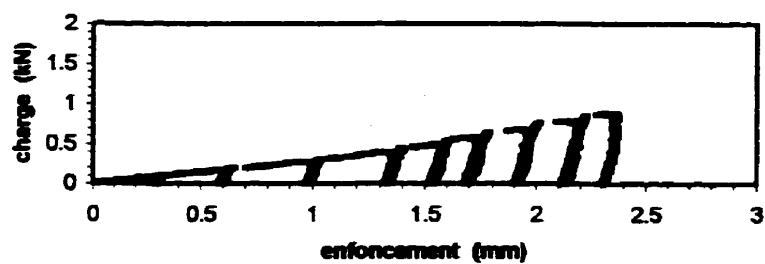
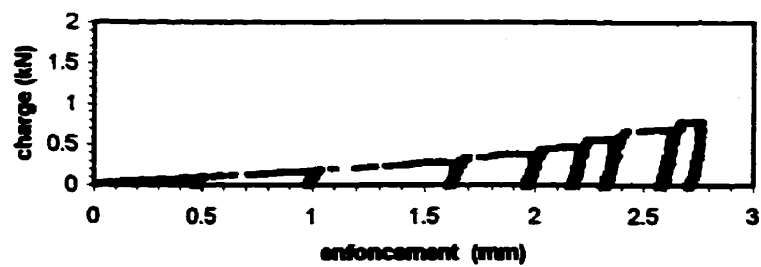


BF_7

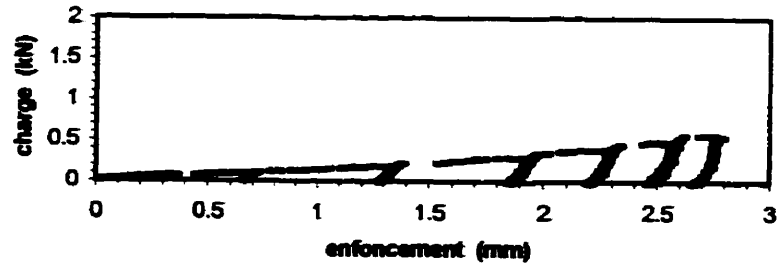


BF_8

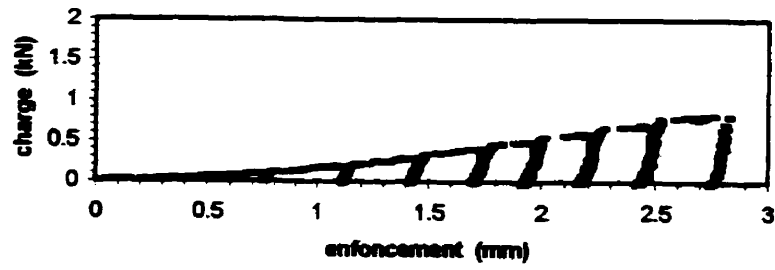


BF_9**BF_10****BF_11**

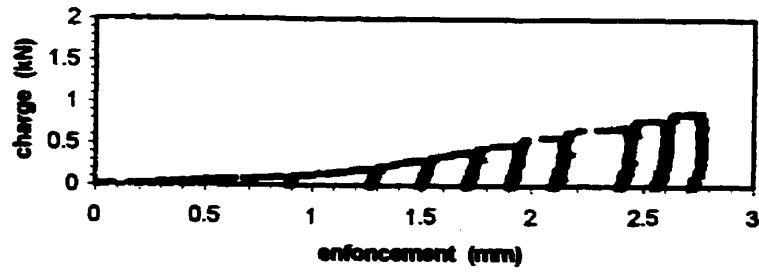
BF_12



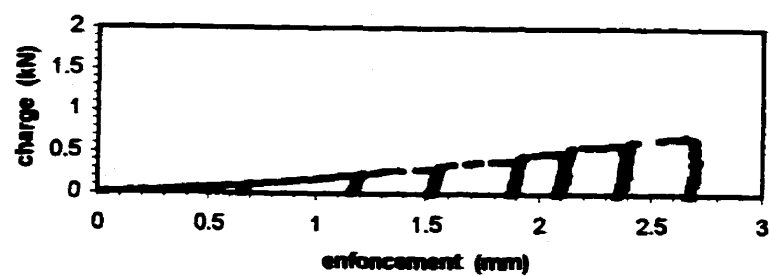
BF_13



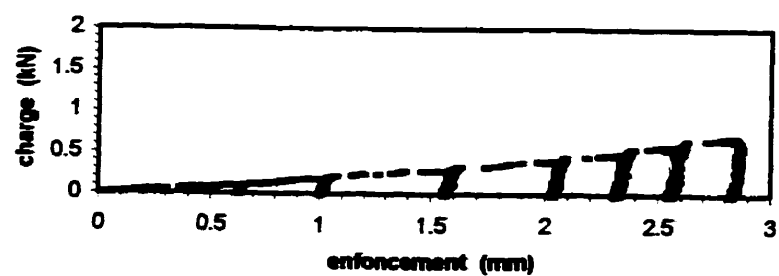
BF_14



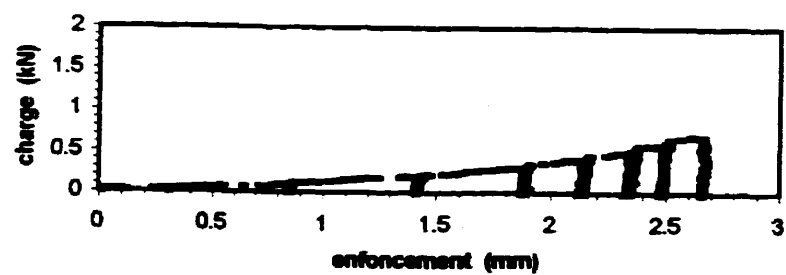
BF_15



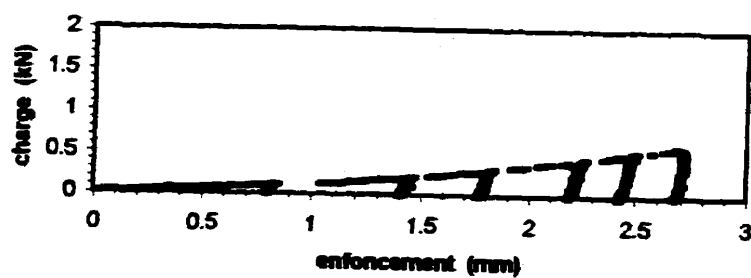
BF_16



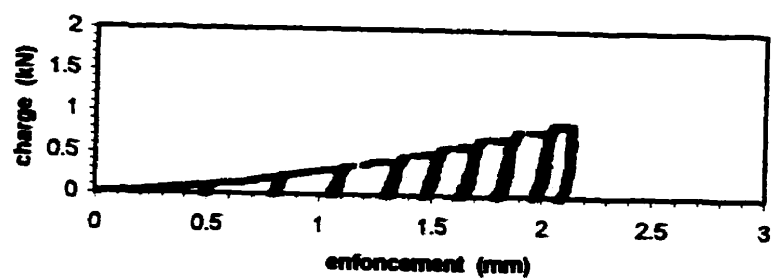
BF_17



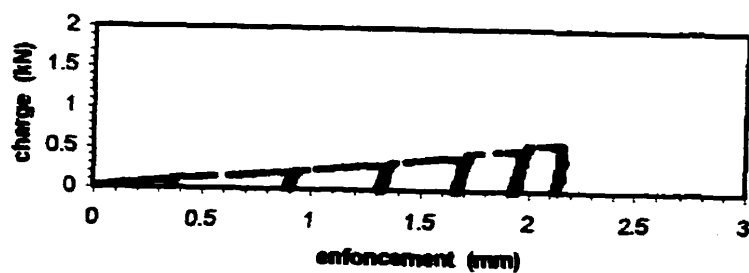
BF_18



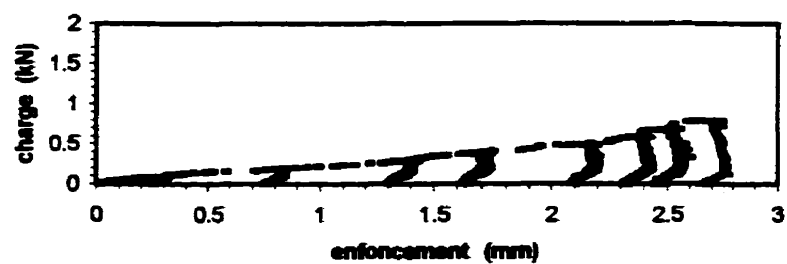
BF_19



BF_20



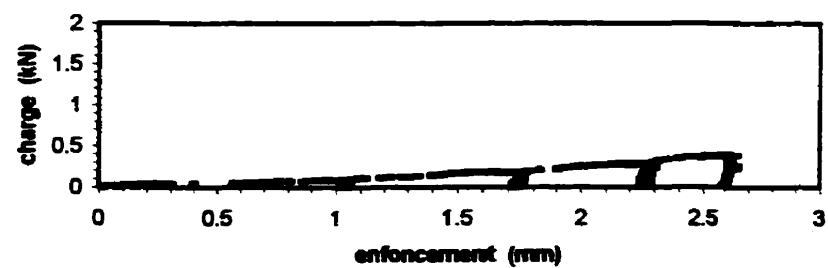
BA_8



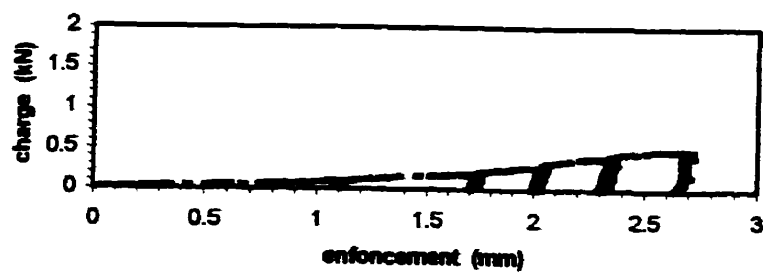
BA_9



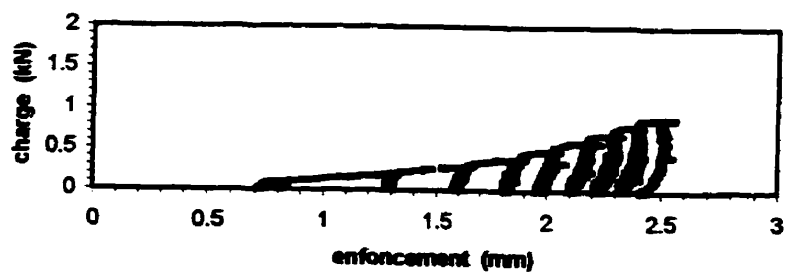
BA_10



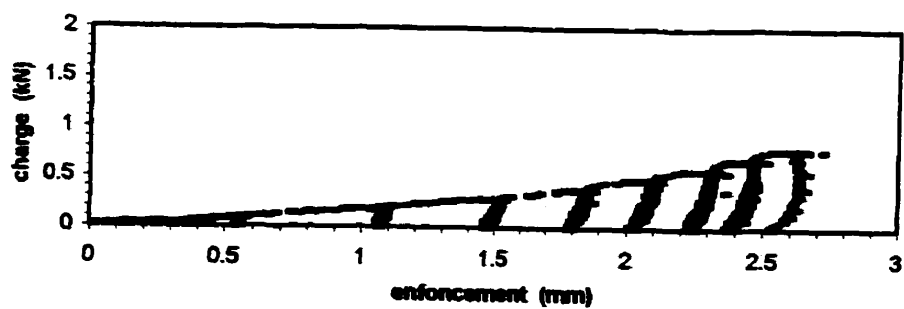
BA_11



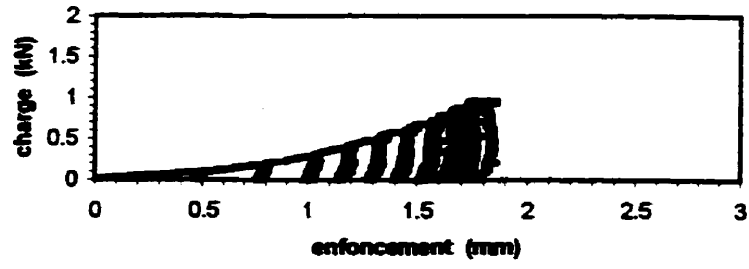
BA_12



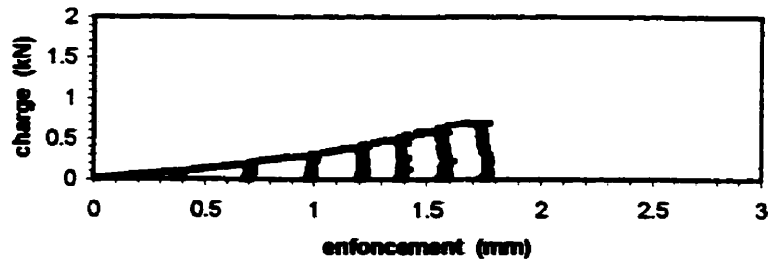
BA_13



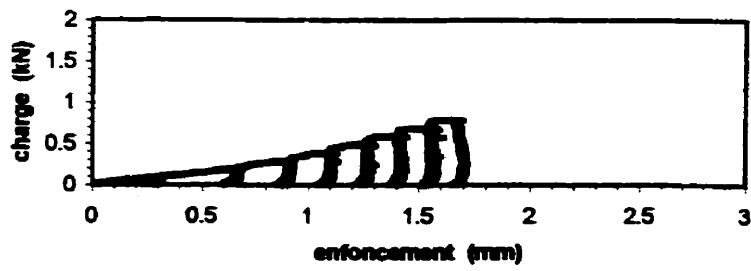
BA_14



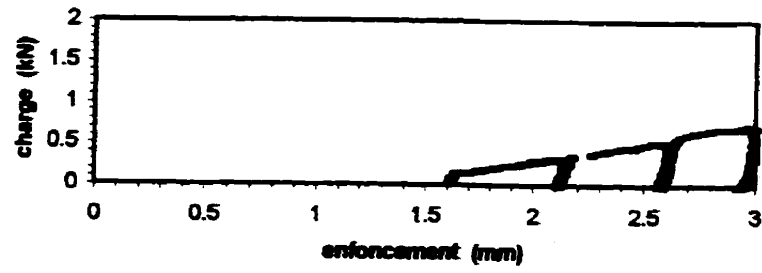
BA_15



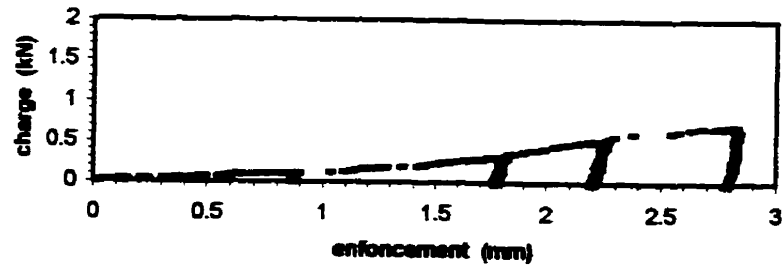
BA_16



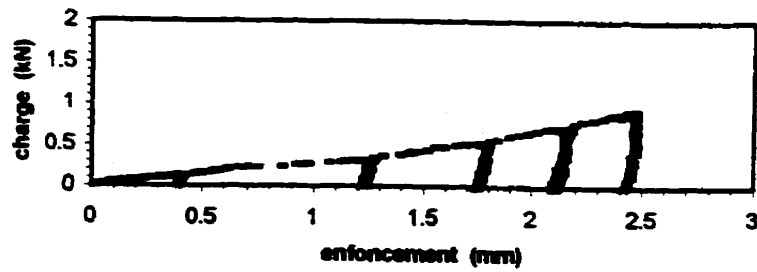
BA_17



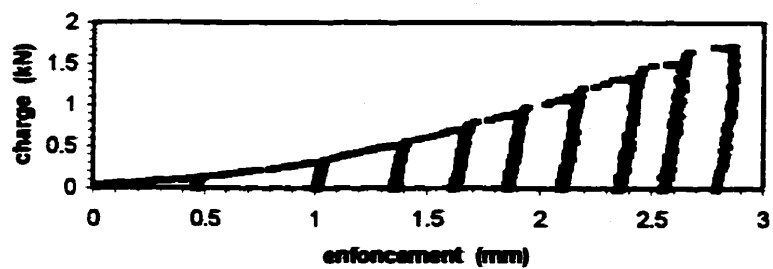
BA_18



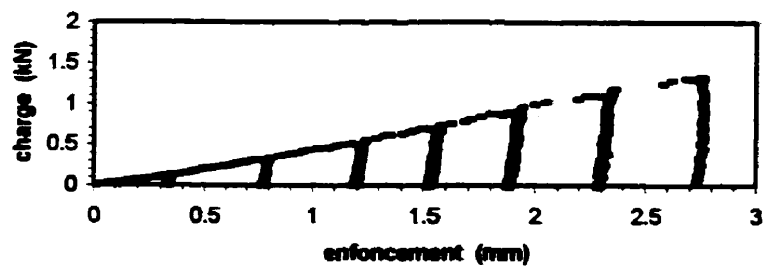
BA_19



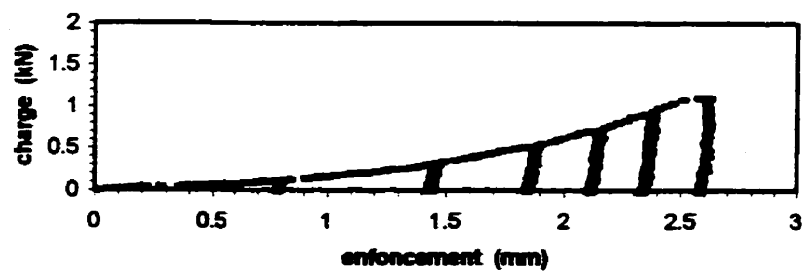
BA_20



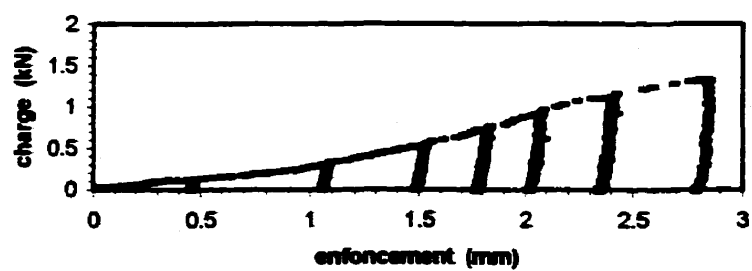
BA_21



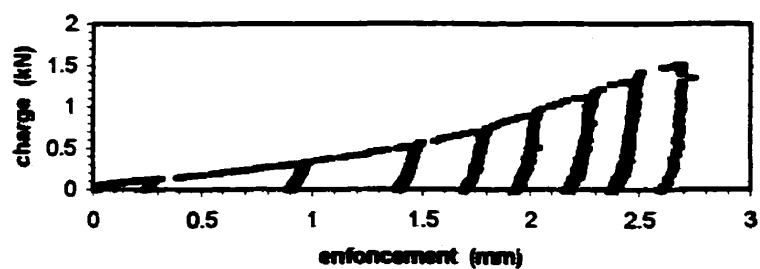
BA_22



BA_23



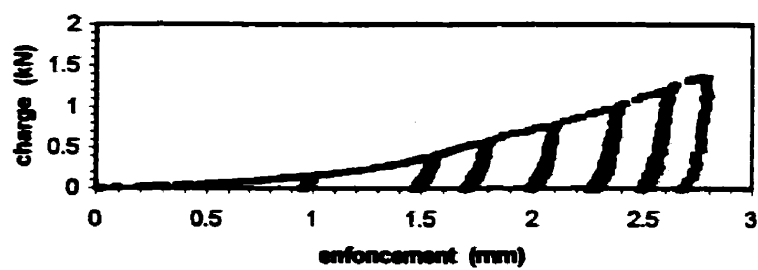
BA_24



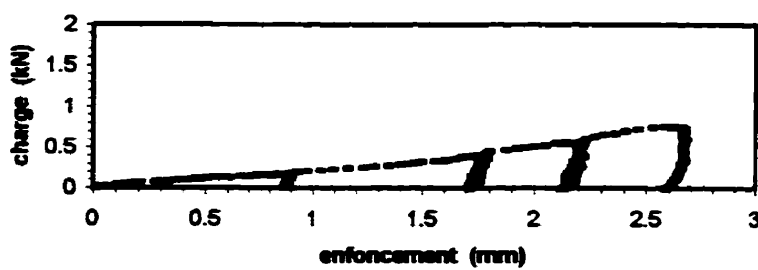
BA_25



BA_26



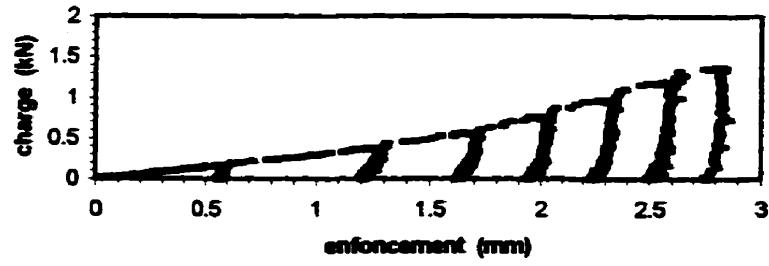
BA_27



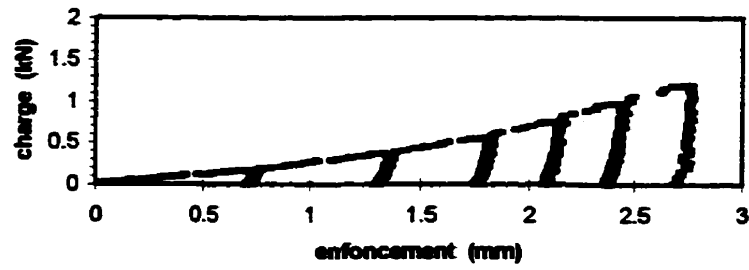
BA_28



BA_29



BA_30



BA_31



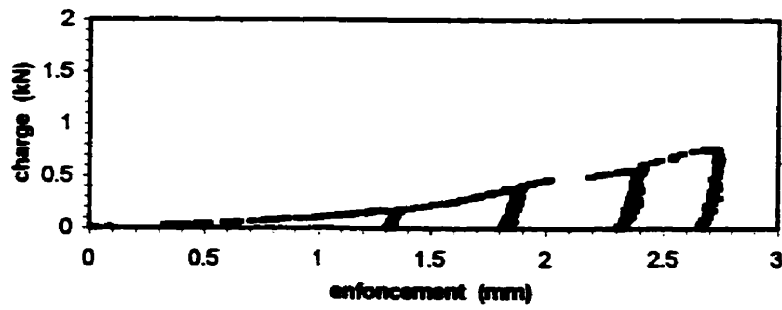
BA_32



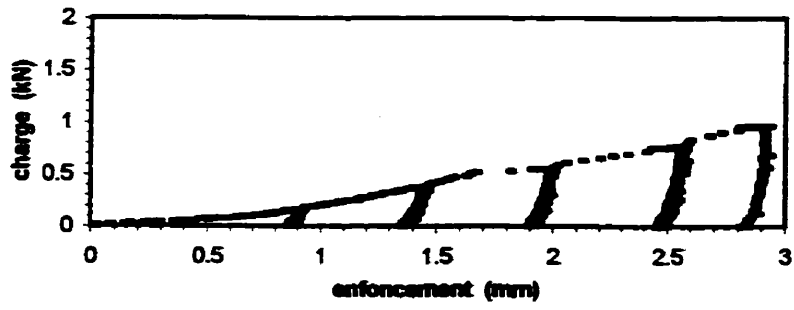
BA_33



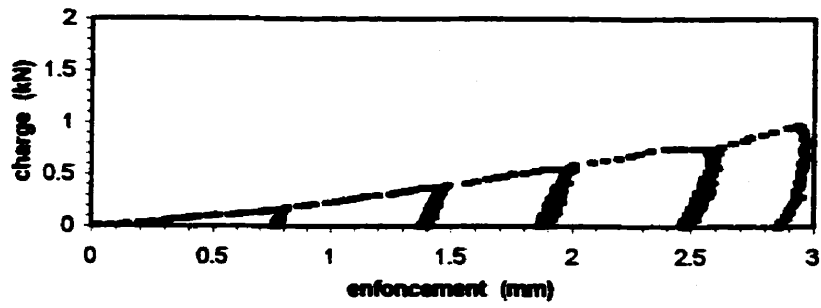
BA_34



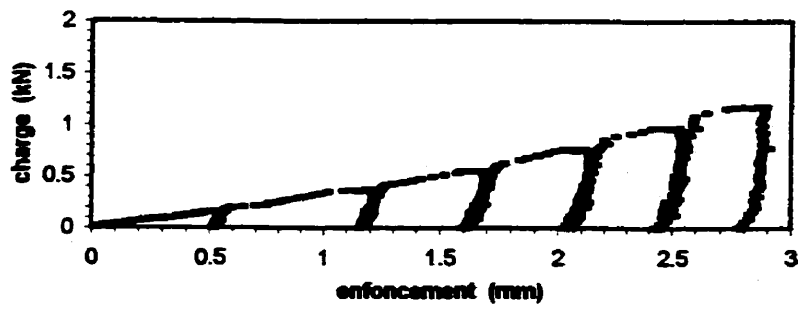
BA_35



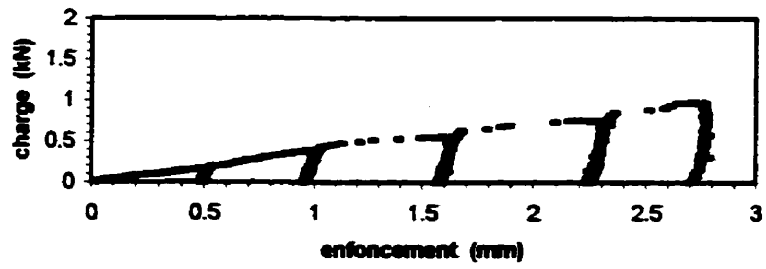
BA_36



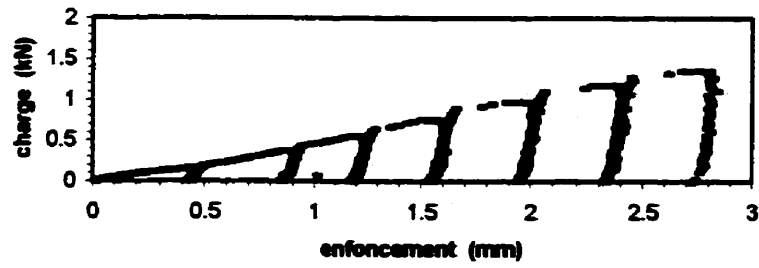
BA_37



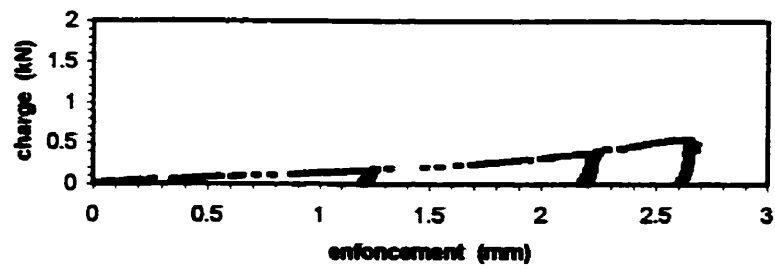
BA_38



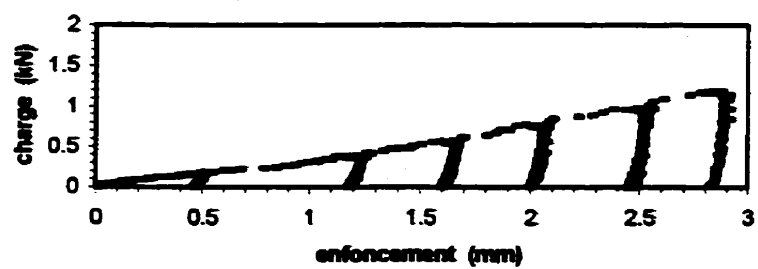
BA_39



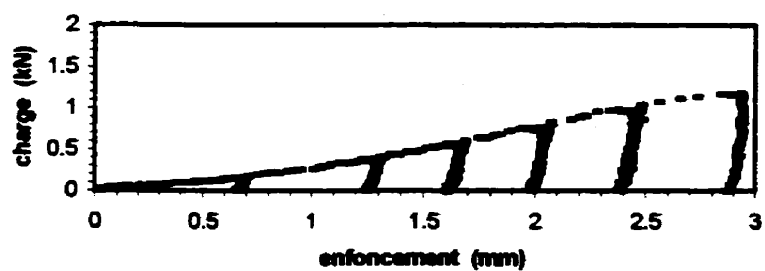
BA_40



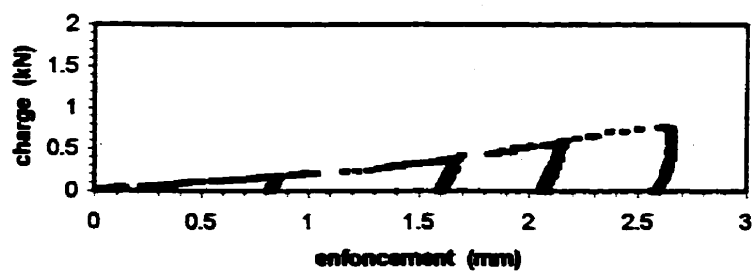
BA_41



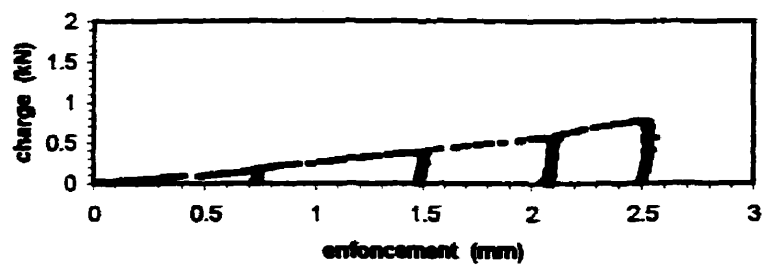
BA_42



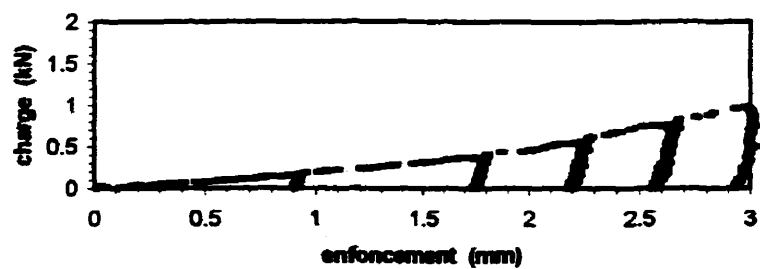
BA_43



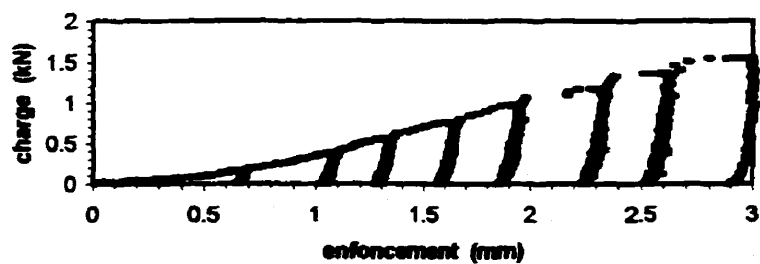
BA_44



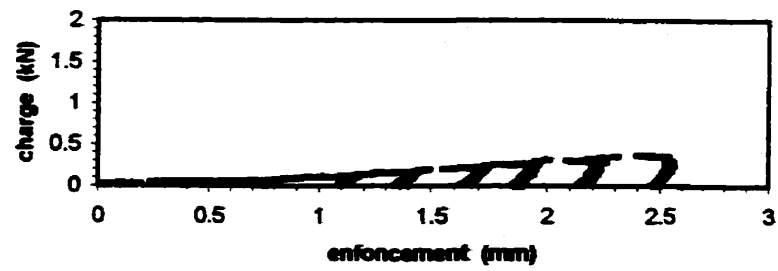
BA_45



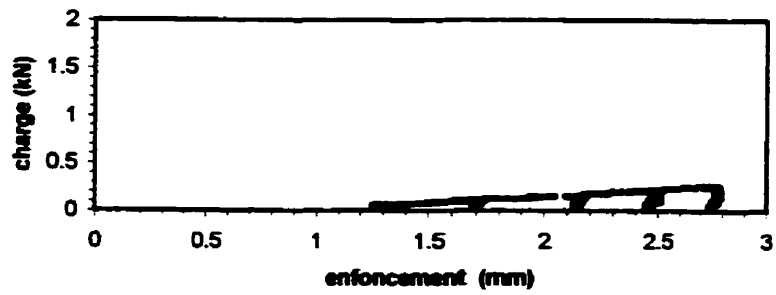
BA_46



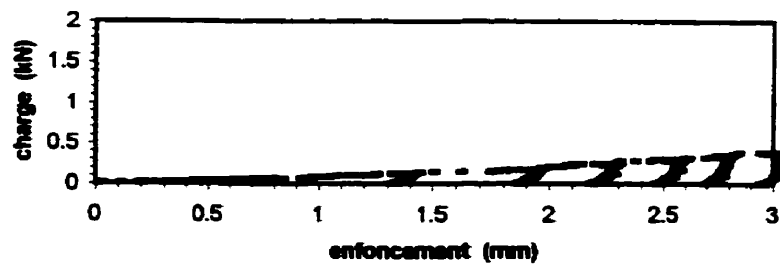
BD_1

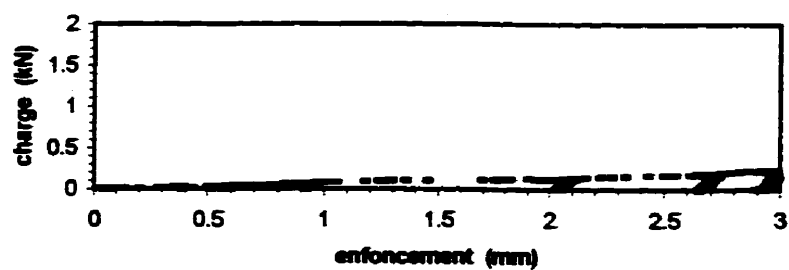
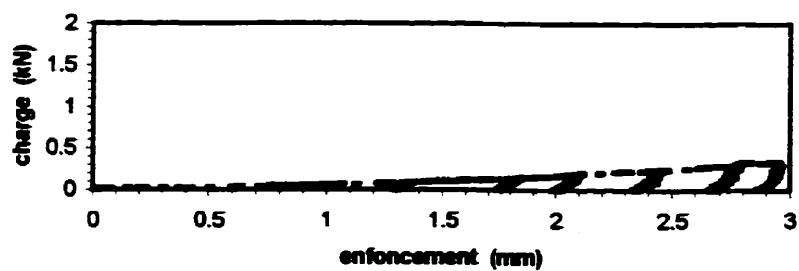


BD_2



BD_3

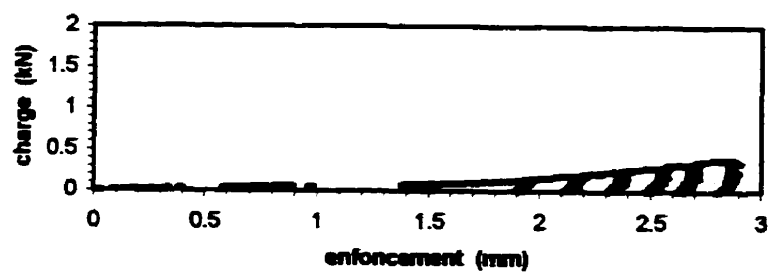


BD_4**BD_5****BD_6**

BD_7



BD_8



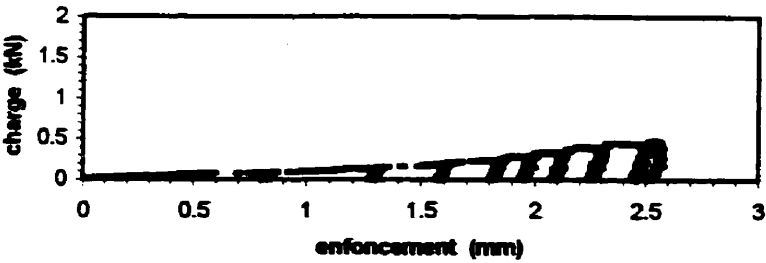
BD_9



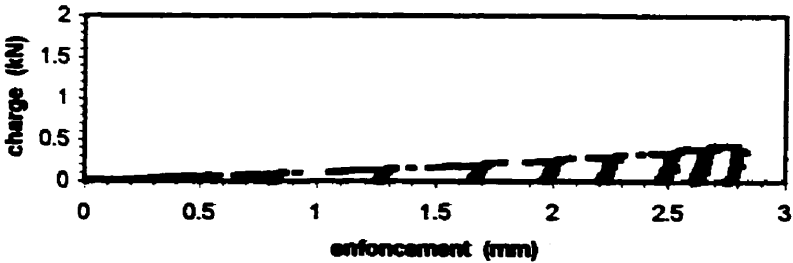
BD_10



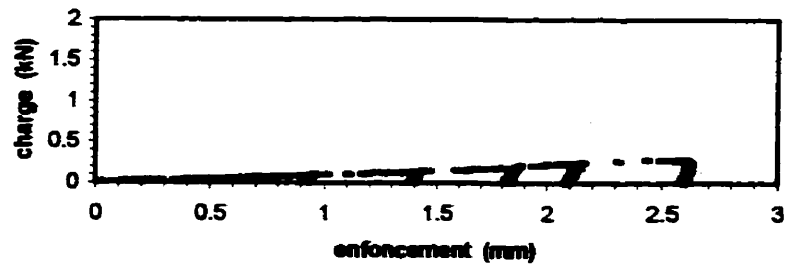
BD_11



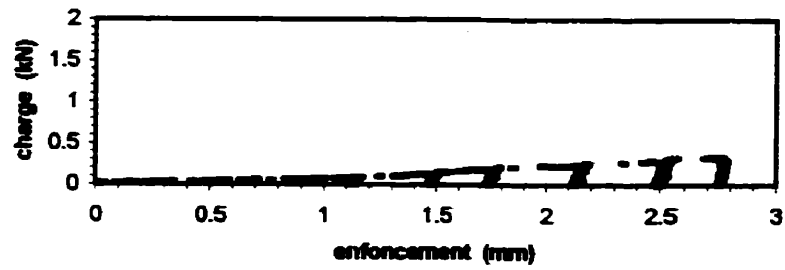
BD_12



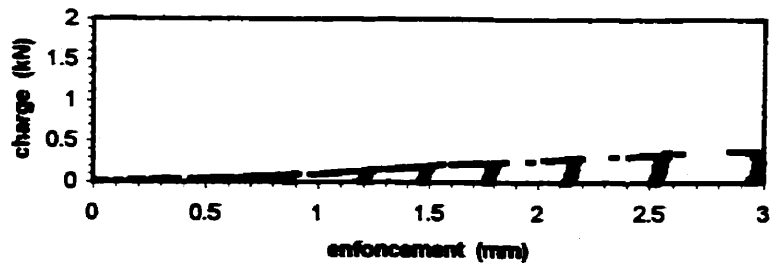
BD_13



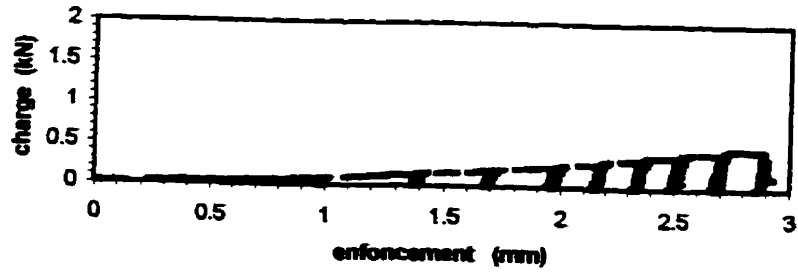
BD_14



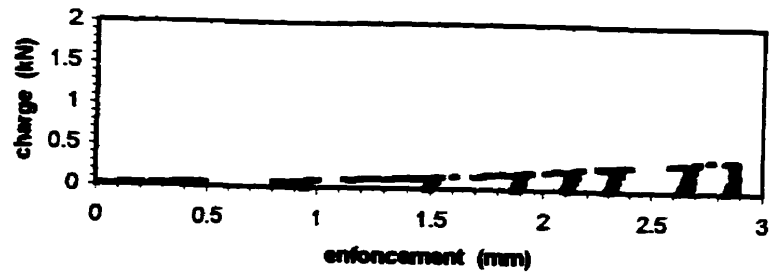
BD_15



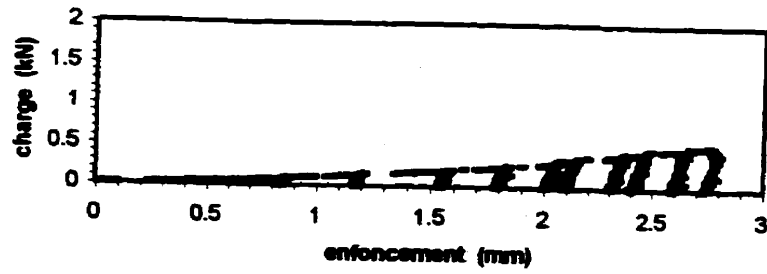
BD_16



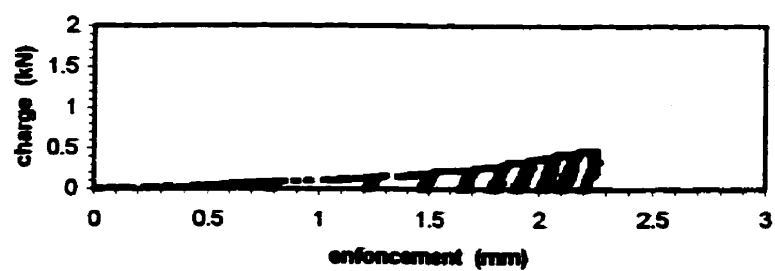
BD_17



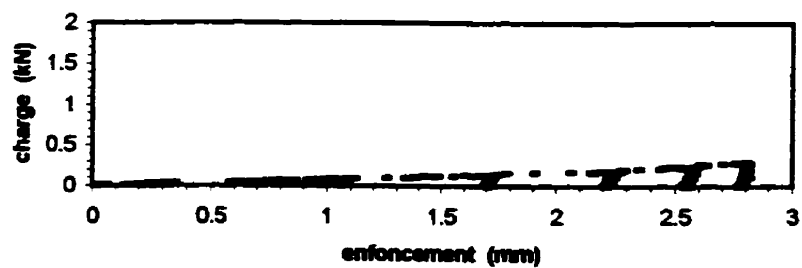
BD_18



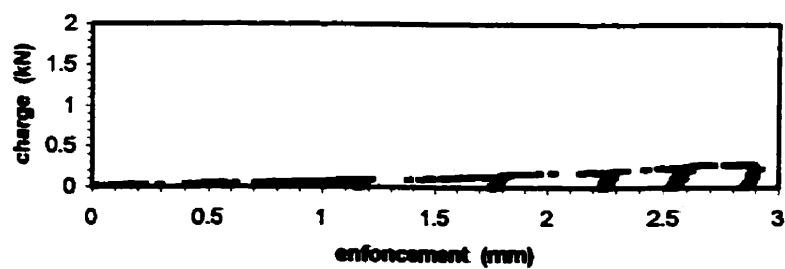
BD_19



BD_20



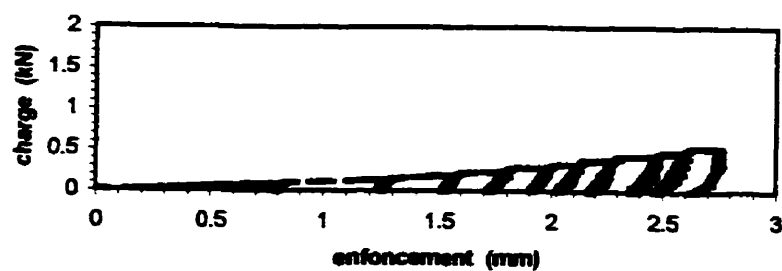
BD_21



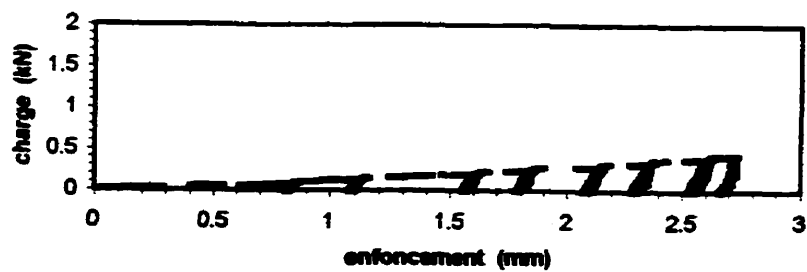
BD_22



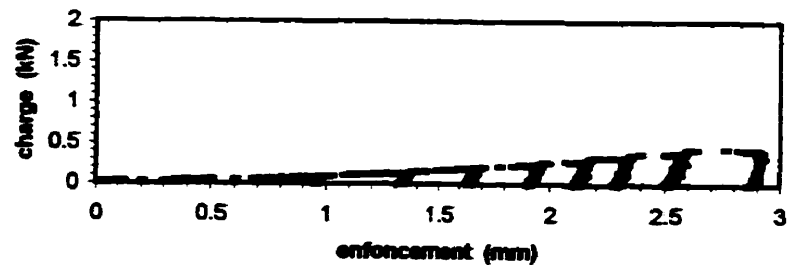
BD_23



BD_24



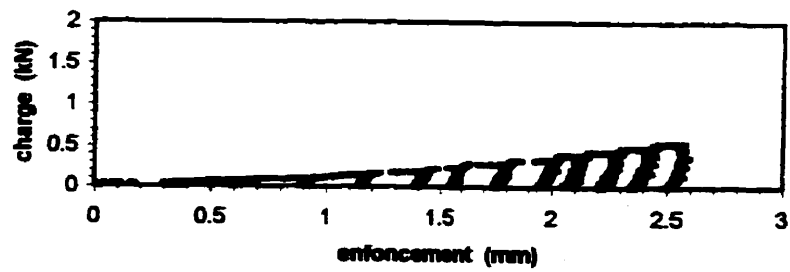
BD_25



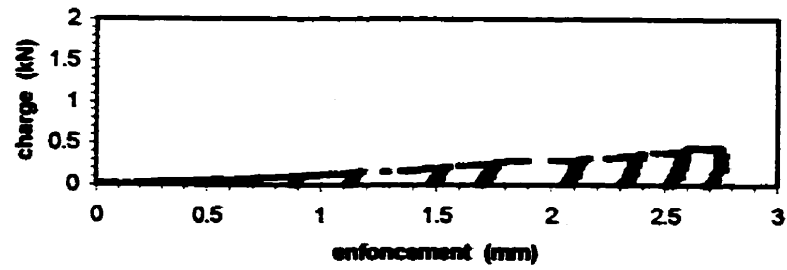
BD_26



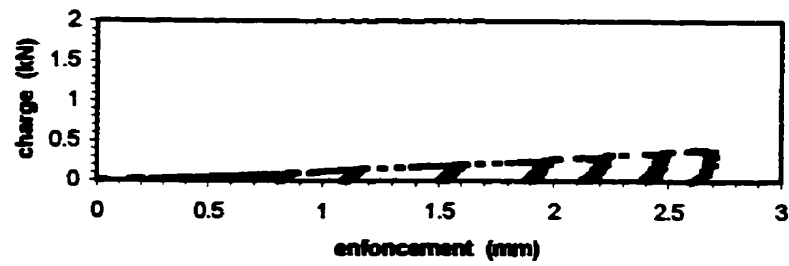
BD_27



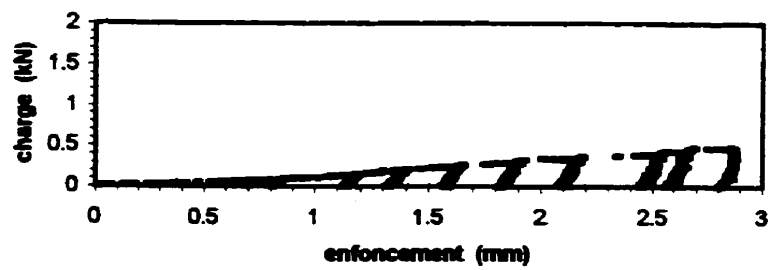
BD_28



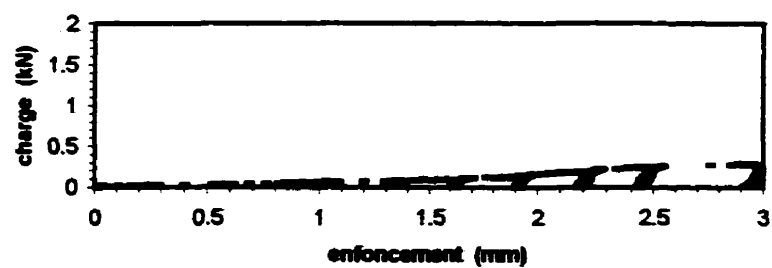
BD_29



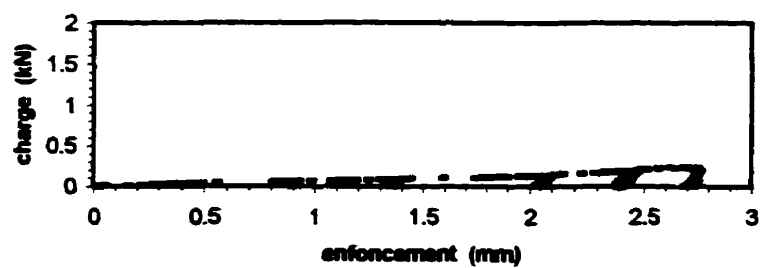
BD_30



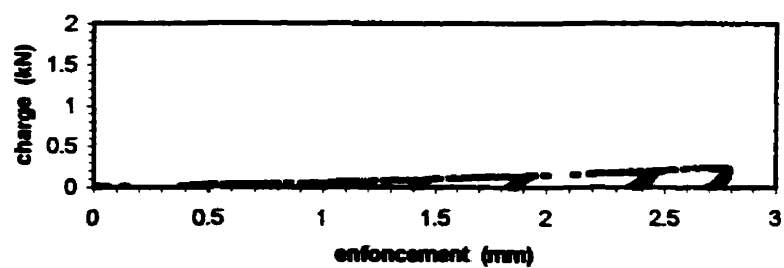
BD_31



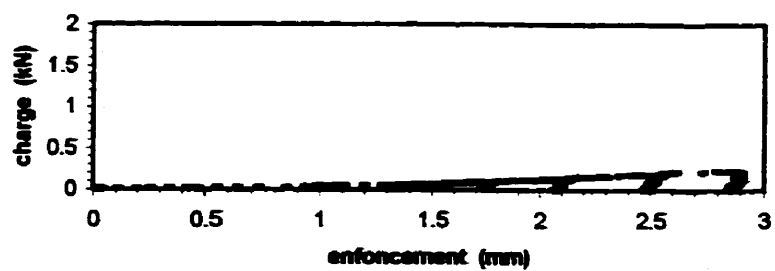
BD_32



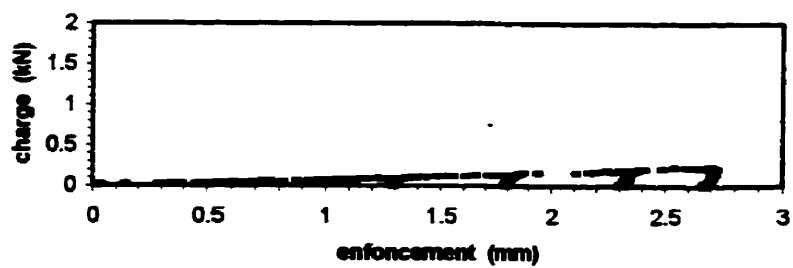
BD_33



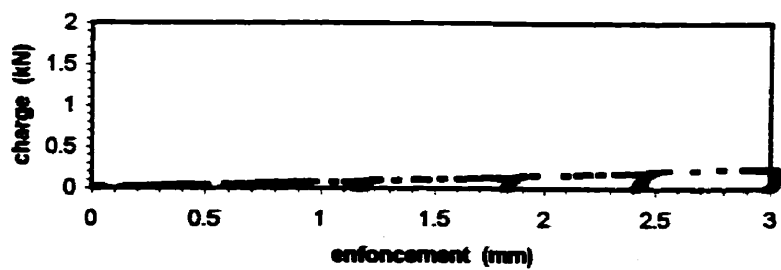
BD_34



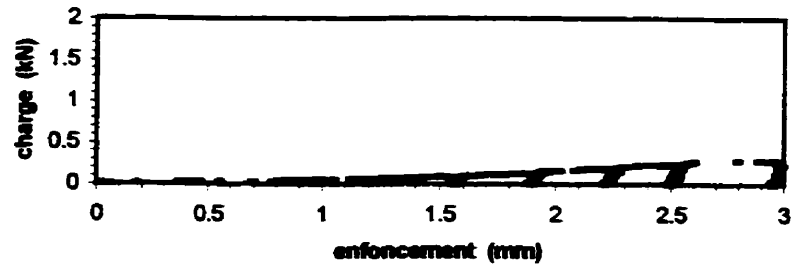
BD_35



BD_36



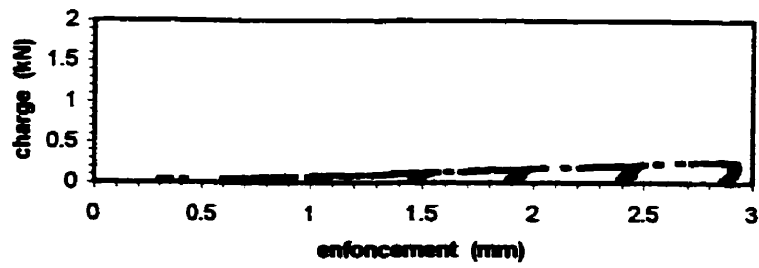
BD_37



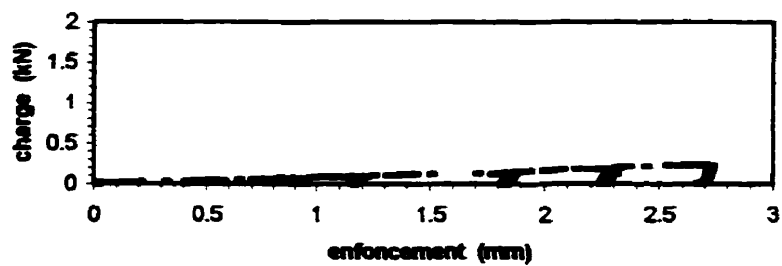
BD_38



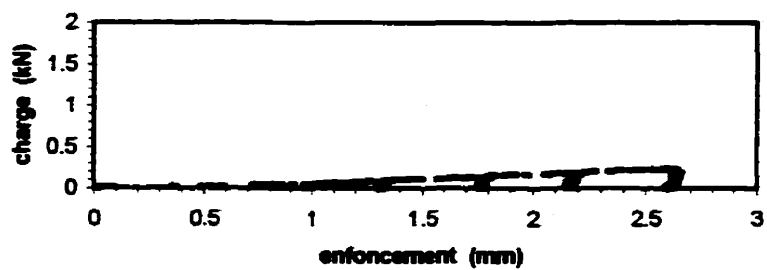
BD_39



BD_40



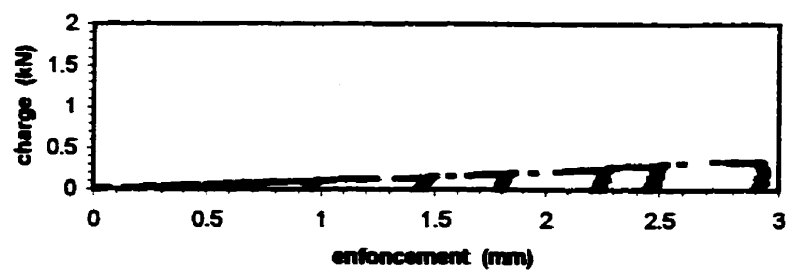
BD_41



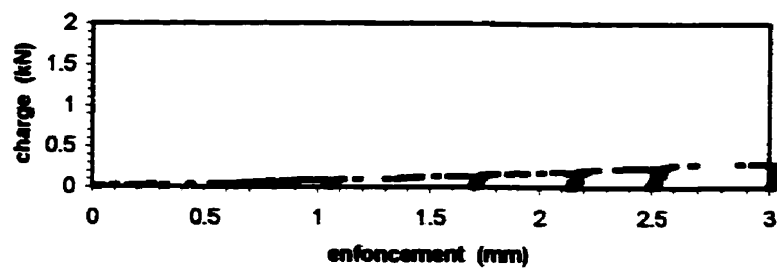
BD_42



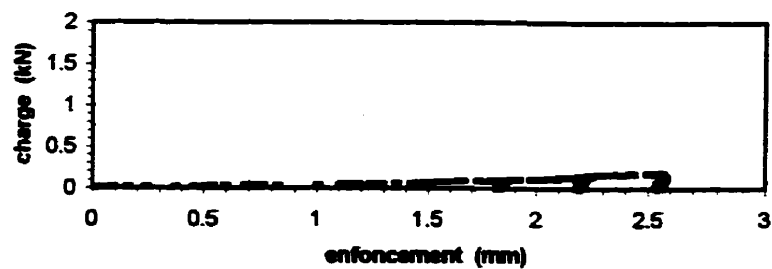
BD_43



BD_44



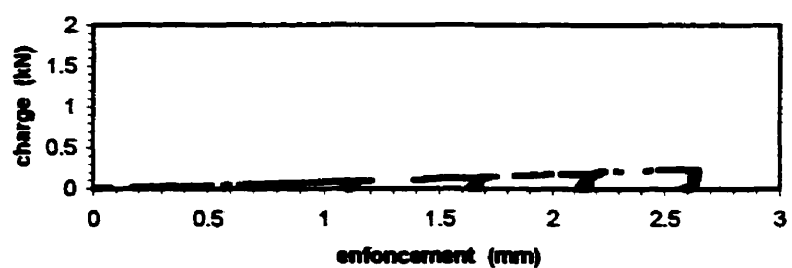
BD_45



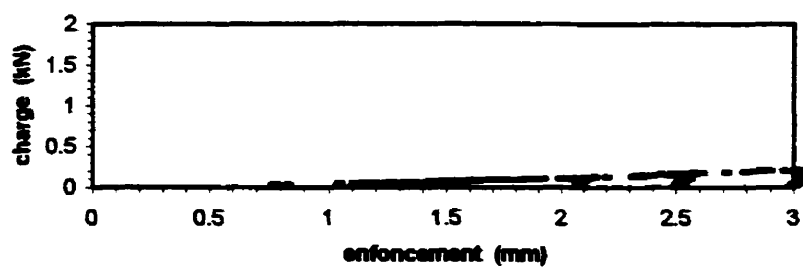
BD_46



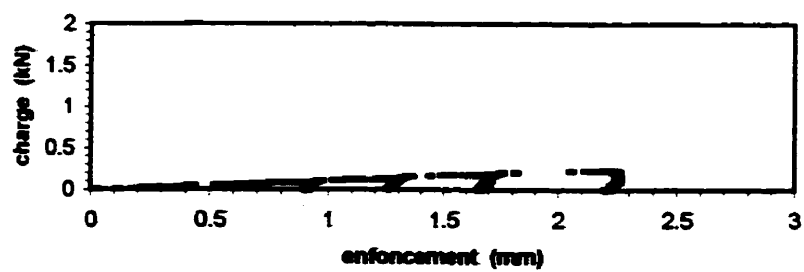
BD_47



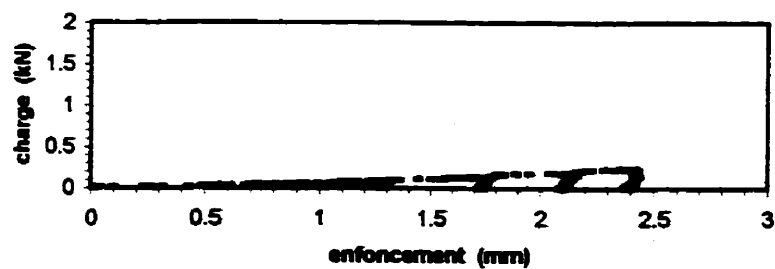
BD_48



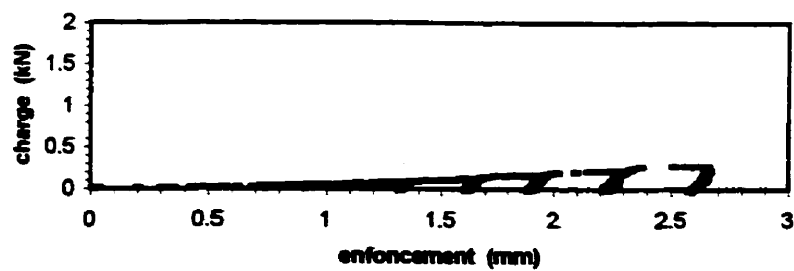
BD_49



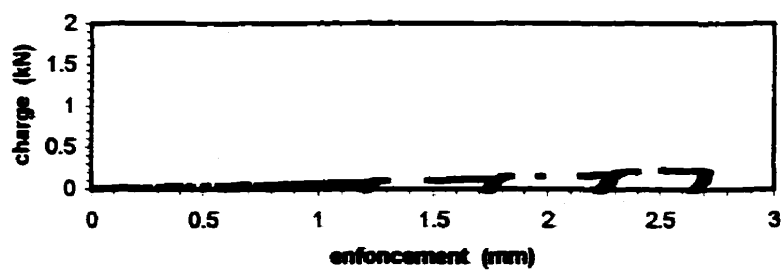
BD_50



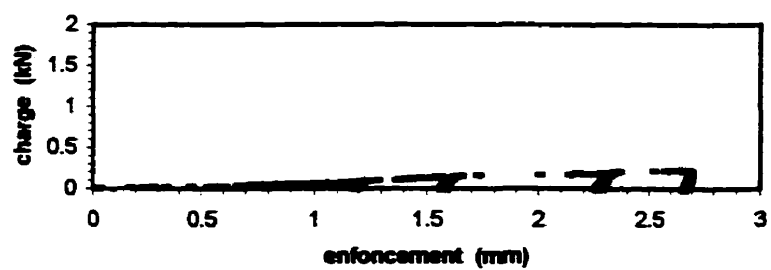
BD_51



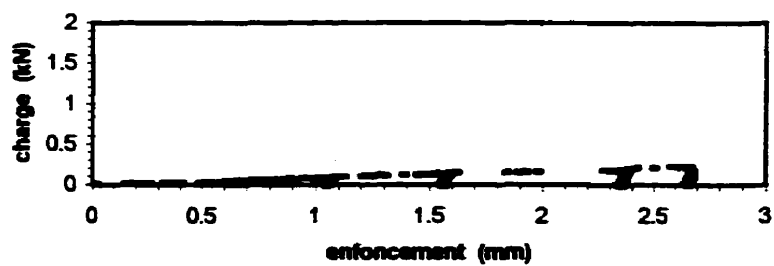
BD_52



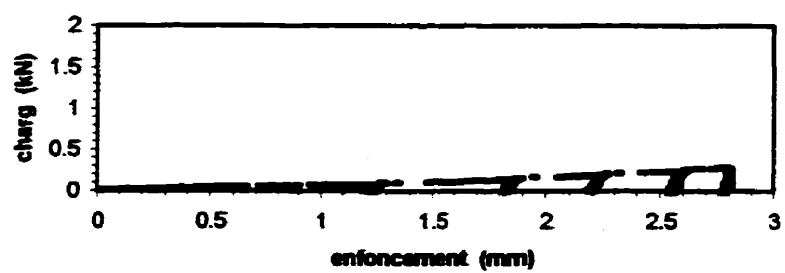
BD_53



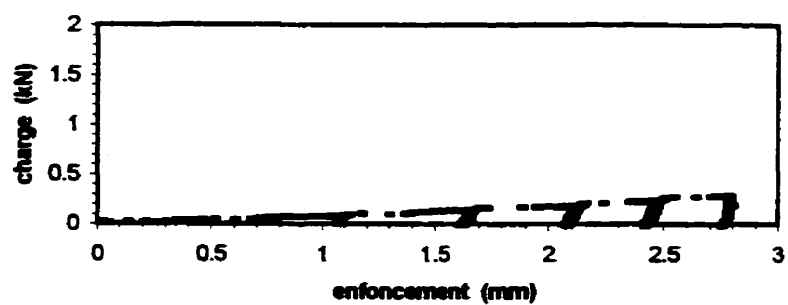
BD_54



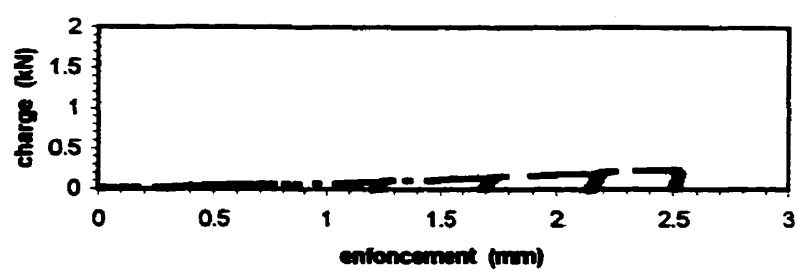
BD_55



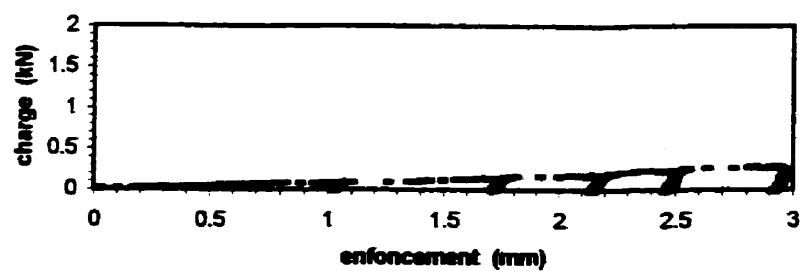
BD_56



BD_57



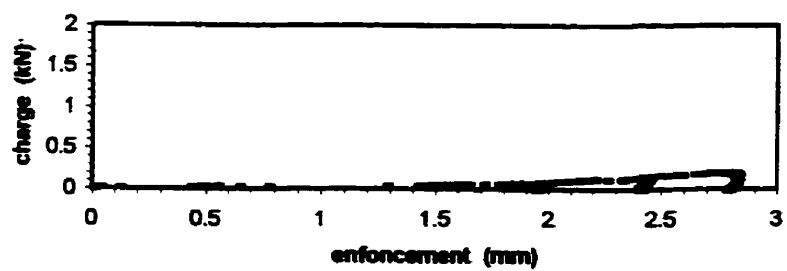
BD_58



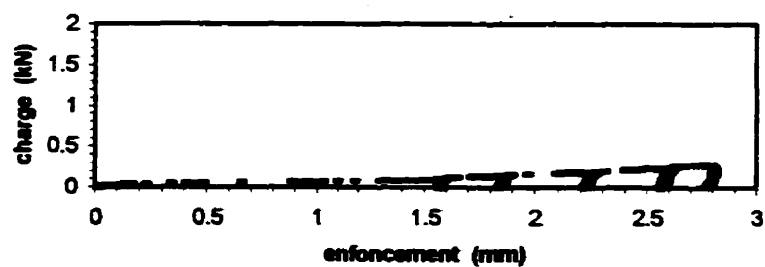
BD_59



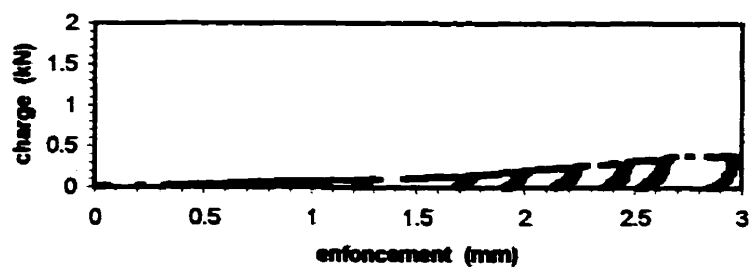
BD_60



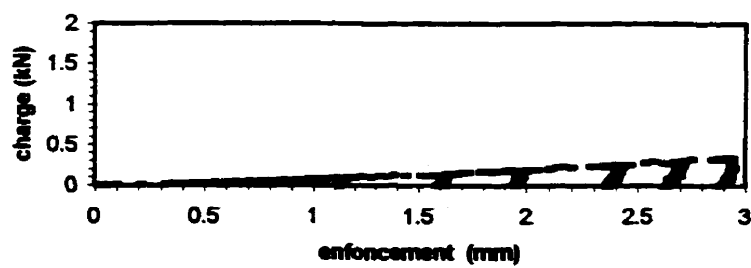
BE_1

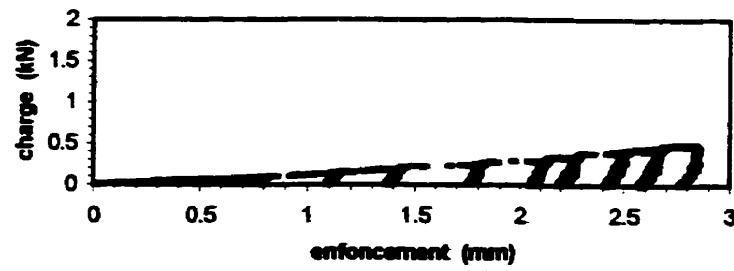
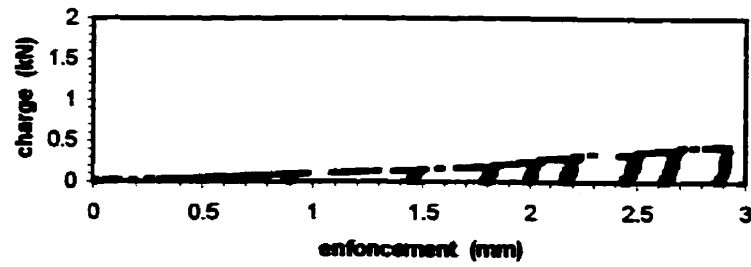
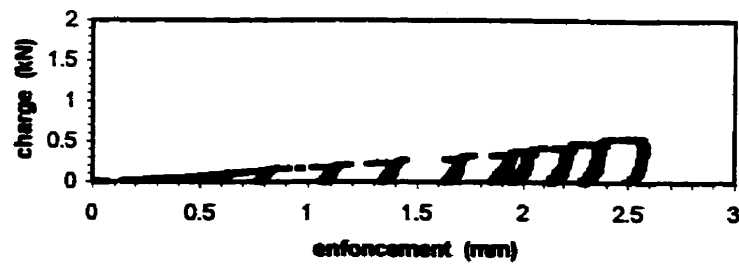


BE_2

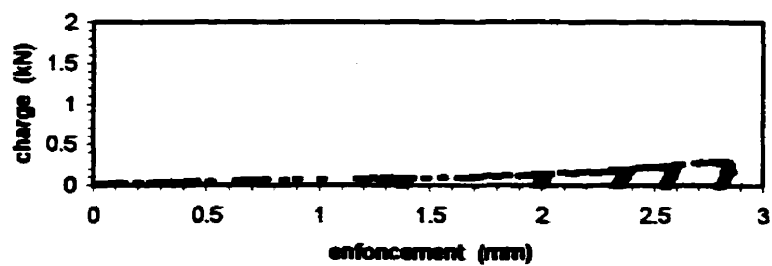


BE_3

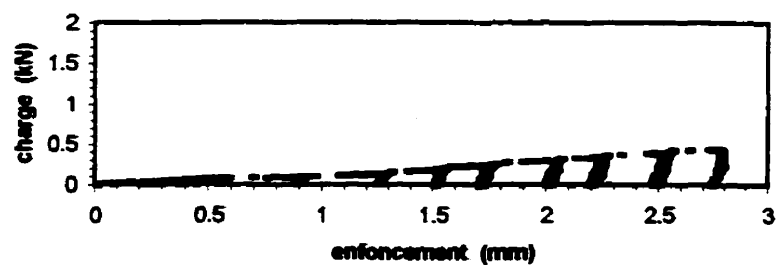


BE_4**BE_5****BE_6**

BE_7



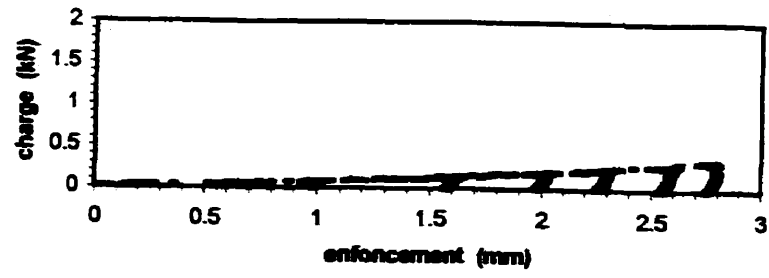
BE_8



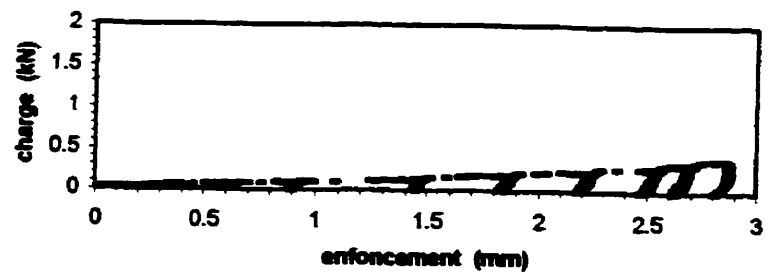
BE_9



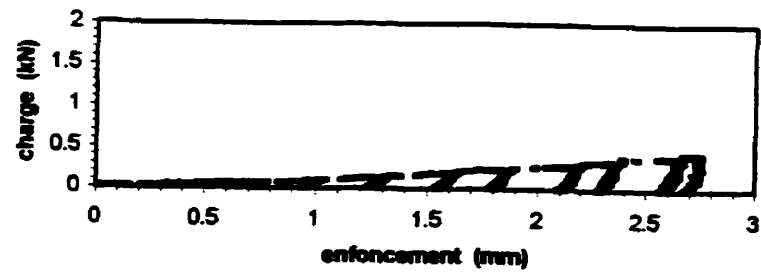
BE_10



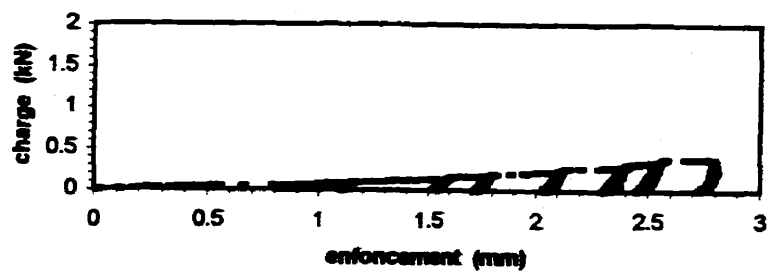
BE_11



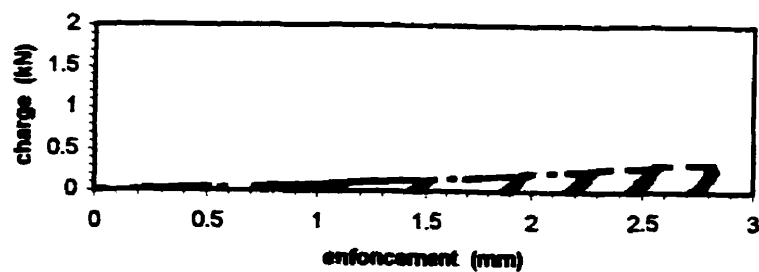
BE_12



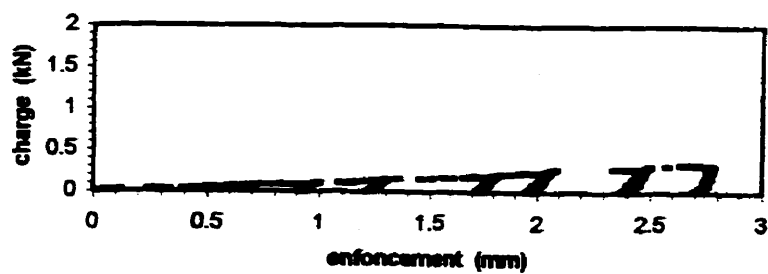
BE_13



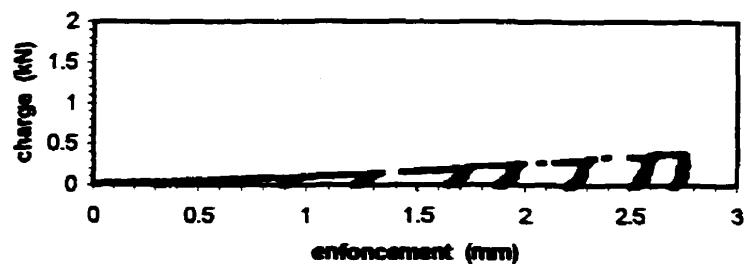
BE_14



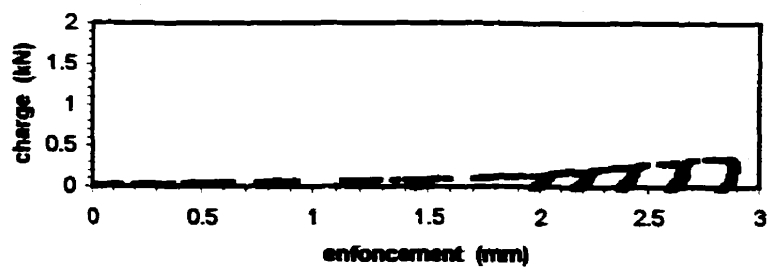
BE_15



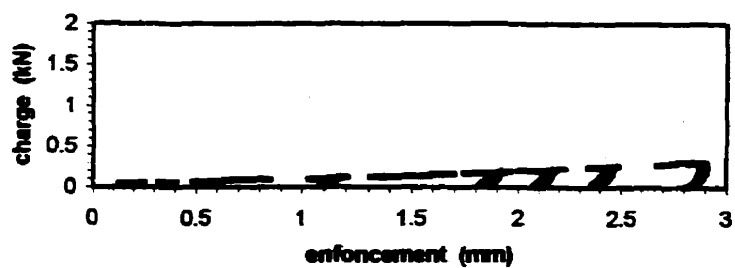
BE_16



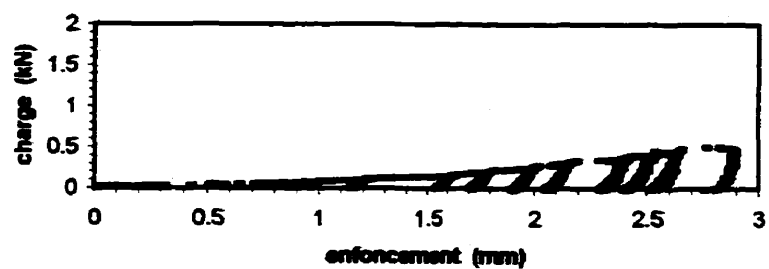
BE_17



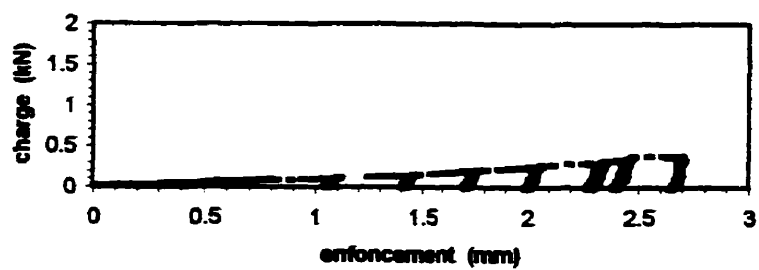
BE_18



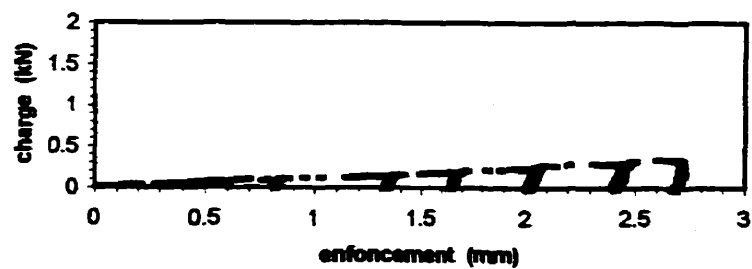
BE_19

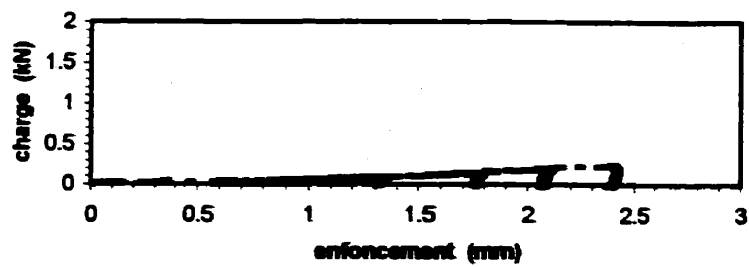
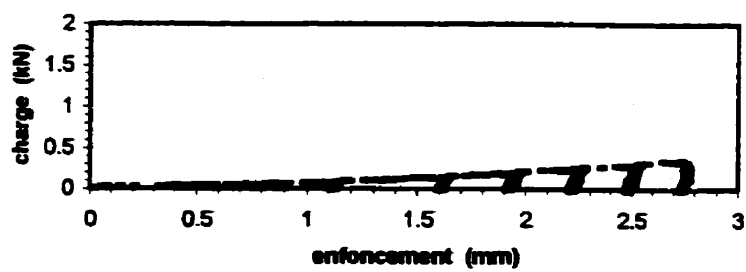
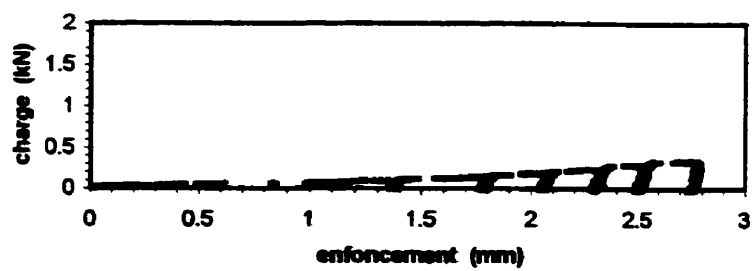


BE_20

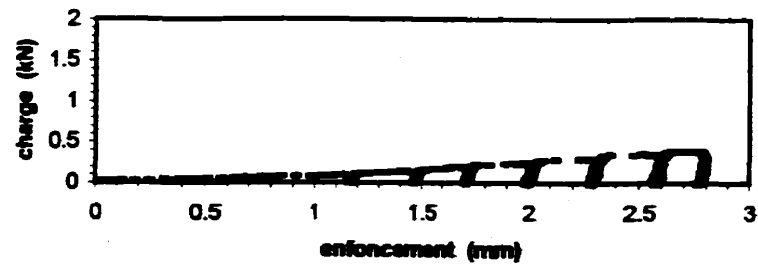


BE_21

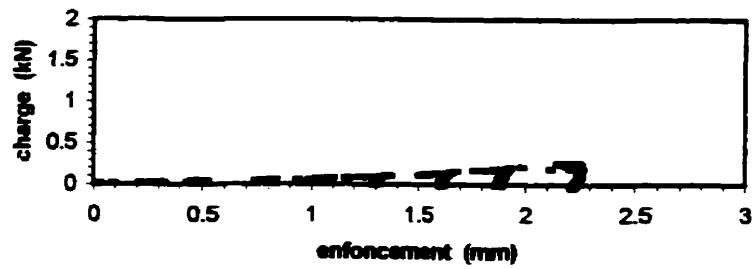


BE_22**BE_23****BE_24**

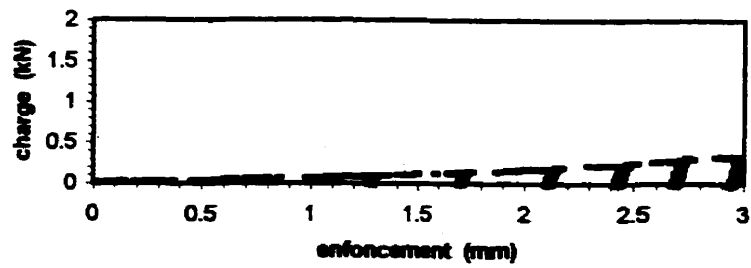
BE_25



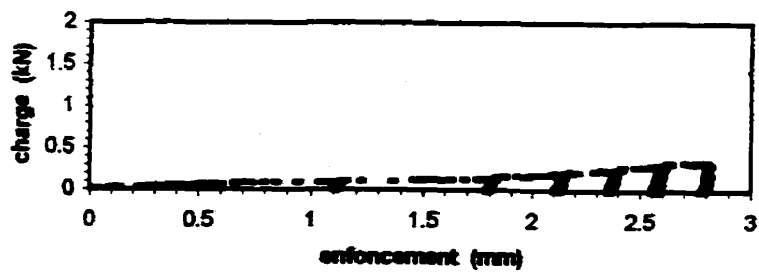
BE_26



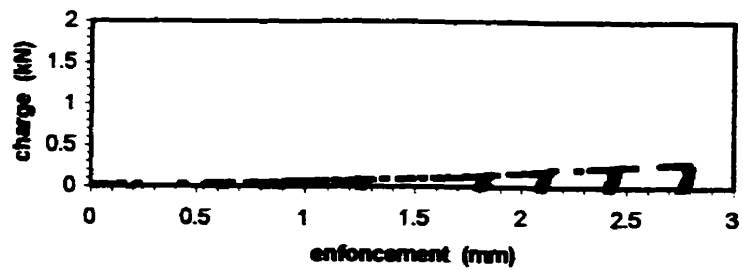
BE_27



BE_28



BE_29



BE_30

