UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

LE POINÇONNEMENT DES ROCHES FRAGILES NON POREUSES EN TANT QU'ESSAI IN SITU PALLIATIF

par

Bernardo CRUZ

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAÎTRE ES SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

Avril 1989

© Bernardo Cruz 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

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

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

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

ISBN 0-315-50198-7

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Cette thèse intitulée:

LE POINÇONNEMENT DES ROCHES FRAGILES
NON POREUSES EN TANT QU'ESSAI IN SITU PALLIATIF

présentée par: Bernardo Cruz

en vue de l'obtention du grade de: Maître Es Sciences Appliquées
(M.Sc.A.)

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

Monsieur Robert Corthésy, Ph.D., président

Monsieur Denis E. Gill, Ph.D., directeur de recherche

Monsieur Robert P. Chapuis, Ph.D.

SOMMAIRE

L'objectif du mémoire est de proposer une méthodologie d'interprétation de l'essai de poinçonnement de parois de trous de sonde en tant que moyen palliatif de détermination du module de Young et de la résistance en compression uniaxiale des roches fragiles non poreuses.

Les modèles déjà publiés permettant de simuler les différentes facettes des essais de poinçonnement sont revus et critiqués. Cette analyse permet l'élaboration d'une méthodologie faisant intervenir des poinçons sphérioconiques et un mode opératoire impliquant une mise en charge cyclique, la charge maximale atteinte d'un cycle à l'autre croissant par incréments de façon à produire une dizaine de cycles avant l'écaillage. Ce mode d'exécution des essais a l'avantage de permettre de séparer l'enfoncement total du poinçon en enfoncement élastique et en enfoncement permanent. L'enfoncement élastique est utilisé pour le calcul du module de Young alors que la résistance en compression unixiale est déduite du mécanisme qui est considéré comme régissant l'enfoncement permanent.

La méthodologie d'interprétation proposée est sommairement testée à l'aide d'essais de poinçonnement. Les valeurs des modules de Young prédites sont légèrement inférieures à celles données par les essais conventionnels normalisés. Quant aux valeurs de résistances en compression uniaxiale prédites, elles sont à toutes fins pratiques égales à celles obtenues par les essais conventionnels normalisés si on les soumet à une correction d'échelle qui découle de l'analyse de la dispersion des résultats d'essais.

ABSTRACT

The objective of this research is to propose an interpretation methodology of the borehole indentation test when it is used as an indirect means of determining both the Young's modulus and the unconfined compressive strength of dense brittle rocks.

The published models permitting simulations of the different aspects of rock indentation test are reviewed and criticized. Following this analysis, a methodology is elaborated for spherioconical indentors; this methodology involves a test procedure which implies cyclic indentor loading, the maximum load reached at the end of a cycle increasing from one cycle to another by such an amount that about ten cycles can take place before the first chipping. This test procedure has the following advantage: the elastic penetration can be isolated from the permanent penetration. The former is used to determine the Young's modulus while the uniaxial compressive strength is deducted from the mechanism which is considered to be responsible for the latter.

The proposed methodology is validated to some extent using indentation test results. The values of the Young's modulus obtained when applying the methodology to the test results are slightly lower than those given by the standardized conventional tests. As far as the unconfined compressive strengths are concerned, the methodology yields values which are about the same as those obtained from standardized conventional tests if the proper size effect correction is made. The size effect correction factor is deducted from the analysis of the indentation test results as suggested by the proposed methodology.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements les plus sincères au Dr. Denis E. Gill, professeur titulaire au département de génie minéral de l'École Polytechnique de Montréal qui a guidé la présente recherche.

Je remercie mes collègues étudiants de grades supérieurs; les résultats expérimentaux utilisés dans le présent mémoire ont été tirés de leurs travaux.

Des remerciements vont à mesdames Line Parisien et Christiane St-Pierre ainsi qu'à André Lacombe pour l'aide apportée à l'édition de ce document.

L'auteur a profité de l'aide financière du Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, du Ministère de l'Éducation du Québec et de l'École Polytechnique de Montréal; il tient à remercier ces organismes.

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire iv

Abstract v

Remerciements vi

Liste des symboles x

Liste des tableaux xii

Liste des figures xiii

Chapitre 1 - Introduction 1

1.1 Mise en situation 1

1.2 Objectif du présent projet 1

Chapitre 2 - Revue bibliographique 3

2.1 Le poinçonnement des roches fragiles 4

2.2 Modèles existants 5

2.2.1 Utilisation de l'enfoncement élastique du poinçon 6

2.2.2 Utilisation de l'enfoncement permanent du poinçon 8

A) Relation charge-enfoncement permanent pour un poinçon dièdre 9

B) Relation charge-enfoncement permanent pour un poinçon conique 11

C) Relation charge-enfoncement permanent pour un poinçon sphérioconique 12

2.2.3 Utilisation de la charge de 1er écaillage 13

2.2.4 Modèles empiriques 14

2.2.5 Facteurs supplémentaires à considérer pour l'interprétation de l'essai de poinçonnement 15

A) Effet d'échelle 15

B) Effet de confinement 15

C) Effet de la courbure des parois poinçonnées 16

D) Effet de l'environnement 16

Chapitre 3 - Méthode proposée 17

3.1 Appareillage 17

3.2 Conduite de l'essai 18

3.3 Interprétation proposée 19

3.3.1 Détermination du module de Young 19

3.3.2 Détermination de la résistance en compression uniaxiale 20

Chapitre 4 - Résultats 23

4.1 Détermination du module de Young 23

4.1.1 Calcaire de St-Marc 23

4.1.2 Granite de Barre 24

4.2 Détermination de la résistance en compression uniaxiale 26

Chapitre 5 - Discussion 29

5.1 Le module de Young 29

5.2 La résistance en compression uniaxiale 31

Chapitre 6 - Conclusions et recommandations 35

Références 38

Figures 41

Annexe A - Résultats des essais de poinçonnement en laboratoire considérés dans le mémoire 57

Annexe B - Effet des dimensions finies des éprouvettes sur les enfoncements élastiques mesurés lors d'essais de poinçonnement en laboratoire 63

Annexe C - Détermination du facteur d'échelle 65

Annexe D - Résultats des essais conventionnels normalisés sur le calcaire de St-Marc 70

Annexe E - Résultats des essais conventionnels normalisés sur le granite de Barre 73

LISTE DES SYMBOLES

a: Rayon de l'aire chargée projetée d'un poinçon conique sur la paroi poinçonnée; demi-largeur de l'aire chargée projetée d'un poinçon dièdre; rayon d'un poinçon cylindrique plat.

C_o: Résistance en compression uniaxiale.

$\overline{C_o}$: Moyenne arithmétique de la résistance en compression uniaxiale.

C_o^*: Mode de la résistance en compression uniaxiale.

d_e: Enfoncement élastique d'un poinçon.

d_p: Enfoncement permanent d'un poinçon.

d_{pa}: Enfoncement permanent apparent d'un poinçon sphérioconique.

d_t: Enfoncement total d'un poinçon.

E: Module de Young.

$\overline{E}$: Moyenne arithmétique du module de Young.

F: Paramètre défini par l'équation (3.3.2b).

$G(C_o)$: Fonction de distribution de probabilité de la résistance en compression uniaxiale.

i: Indice.

n: Valeur de l'indice; facteur d'échelle.

N: Composante normale à la paroi du faux nez de la charge appliquée à un poinçon.

P: Charge appliquée à un poinçon.

P_c: Charge appliquée à un poinçon conique.

P_d: Charge appliquée à un poinçon dièdre.

q: Pression de contact normale à la paroi d'un faux nez.

q_c: Pression suivant l'aire chargée projetée d'un poinçon conique sur la paroi poinçonnée.

q_d: Pression suivant l'aire chargée d'un poinçon dièdre sur la paroi poinçonnée.

q_f: Pression de contact normale à la paroi du faux nez causant sa progression.

R: Rayon de courbure de la pointe sphérique d'un poinçon sphério-conique.

s: Longueur de l'arête du faux nez.

S_c: Paramètre de forme de Meyerhoff.

T: Composante tangentielle à la paroi du faux nez de la charge appliquée à un poinçon.

V: Volume.

V_R: Volume effectif d'un essai de poinçonnement lorsqu'il s'en reporte à la résistance.

α: Demi-angle dièdre d'un poinçon dièdre; demi-angle au sommet d'un poinçon conique ou sphérioconique; paramètre de la fonction de densité de probabilité de Weibull.

β: Demi-angle au sommet du faux nez; paramètre de la fonction de densité de probabilité de Weibull.

δ: Angle de frottement roche broyée - roche intacte.

ϕ: Angle de frottement interne de la roche.

ν: Coefficient de Poisson.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 4.1: Évaluation du module de Young - Calcaire de St-Marc.

Tableau 4.2: Évaluation du module de Young - Granite de Barre.

Tableau 4.3: Évaluation de la résistance en compression uniaxiale - Calcaire de St-Marc.

Tableau 5.1: Comparaison des modules obtenus dans le présent mémoire aux modules découlant des essais conventionnels normalisés

Tableau 5.2: Rapport modules publiés obtenus par poinçonnement/modules obtenus par essais conventionnels normalisés.

Tableau 5.3: Comparaison de la résistance en compression uniaxiale du calcaire de St-Marc obtenue dans le présent mémoire à la résistance découlant des essais conventionnels normalisés.

Tableau 5.4: Rapport résistances en compression uniaxiale publiées obtenues par poinçonnement/résistances obtenues par essais conventionnels normalisés.

Tableau A.1: Données des essais de poinçonnement. Dernier cycle complet avant le premier écaillage. Calcaire de St-Marc.

Tableau A.2: Données des essais de poinçonnement. Dernier cycle complet avant le premier écaillage. Granite de Barre.

Tableau A.3: Données des essais de poinçonnement. Ensemble des cycles. Calcaire de St-Marc.

Tableau C.1: Résistances en compression uniaxiale obtenues des essais de poinçonnement. Calcaire de St-Marc.

Tableau C.2: Histogramme des résistances en compression uniaxiale du tableau C.1.

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Le poinçonnement - d'après Rochon (2).

Figure 2.2: Étapes du processus de poinçonnement d'un matériau fragile non poreux sous un poinçon obtus - d'après Rochon (2).

Figure 2.3: Poinçon dièdre en cours d'enfoncement dans un matériau fragile non poreux - d'après Pichette (5).

Figure 2.4: Figure illustrant comment l'enfoncement permanent de la pointe sphérique d'un poinçon sphérioconique peut être prédit à l'aide de cônes équivalents.

Figure 2.5: Courbe charge-enfoncement permanent (ligne pointillée) d'un poinçon sphérioconique obtenue par la méthode proposée par Gill et al. (3).

Figure 3.1: Schéma de la sonde d'essais de poinçonnement in situ conçue par Gill - d'après Gill et Ballivy (1).

Figure 3.2: Courbe charge-enfoncement obtenue lorsque l'enfoncement est mesuré à la fin du chargement d'un cycle (total) et à la fin du déchargement (permanent).

Figure 3.3: Courbe charge-enfoncement obtenue lorsque la charge appliquée au poinçon et l'enfoncement sont mesurés en continu.

Figure 3.4: Effets du contact exagérés pour fin d'illustration: (a) courbe charge-enfoncement obtenue lorsque la pointe du poinçon se trouve dans une dépression; (b) courbe charge-enfoncement obtenue lorsque la pointe du poinçon se trouve sur une protubérance.

Figure 3.5a: Détermination du rayon de l'aire chargée projetée sur la surface poinçonnée dans le cas d'un poinçon sphérioconique; la pointe sphérique n'est pas entièrement enfoncée.

Figure 3.5b: Détermination du rayon de l'aire chargée projetée sur la surface poinçonnée dans le cas d'un poinçon sphérioconique; la pointe sphérique est entièrement enfoncée.

Figure 3.6: Effet de la valeur du coefficient de Poisson sur le calcul du module de Young suivant la méthodologie proposée lorsqu'elle diffère de 0.2.

Figure 3.7: Effet de la valeur de l'angle de frottement interne sur le calcul de la résistance en compression uniaxiale suivant le méthodologie proposée lorsqu'elle diffère de 35°.

Figure 3.8: Définition du volume effectif pour la résistance en compression uniaxiale.

Figure B.1: Courbe de correction des enfoncements élastiques lorsque les essais de poinçonnement sont effectués en laboratoire suivant les normes édictées par Pichette (5); w_1 est le tassement dans le cas 1 et w_2 est le tassement dans le cas 2.

Figure C.1: Droite de régression de détermination du facteur d'échelle suivant la théorie des valeurs extrêmes pour la résistance en compression uniaxiale.

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 MISE EN SITUATION

La connaissance des propriétés mécaniques du massif rocheux est primordiale lors des différentes étapes d'un projet de grande ou de moyenne envergure. Ces renseignements intéressent tous les professionnels qui sont impliqués dans le projet, dont les ingénieurs chargés du design des différents ouvrages le constituant (galeries de dérivation, conduites forcées, fondations de barrage...).

L'ingénieur en mécanique de roches voulant connaître les propriétés du massif, possède actuellement plusieurs outils et méthodes pour y arriver. Ces méthodes dépendent des objectifs fixés (précision voulue, échelle du problème, état de l'ouvrage, etc.) de même que des contraintes économiques et de temps. Dans presque tous les cas, il faut connaître, entre autres, les propriétés des roches qui forment le massif.

1.2 OBJECTIF DU PRÉSENT PROJET

La connaissance des propriétés des roches implique l'exécution d'essais en laboratoire et par conséquent la disponibilité d'éprouvettes. Ces dernières sont le plus souvent préparées à partir de carotte de forage. Il arrive parfois qu'on ne puisse pas, lors de forages, récupérer les carottes pouvant servir aux essais en laboratoire

à cause du "disking" par exemple. On peut disposer, en d'autres occasions, de forages sans pour autant avoir en mains les carottes.

Le Laboratoire de Mécanique des Roches de l'Ecole Polytechnique de Montréal a mis au point en 1974 un appareil permettant de procéder à des essais de poinçonnement de parois de forages de divers calibres. Cette sonde, décrite par Gill et Ballivy (1), comportant un poinçon sphérioconique obtus, a été développée originalement dans le but de prédire des taux de pénétration de tunnelliers dans des formations géologiques de l'Île de Montréal caractérisées par divers problèmes de récupération de carotte de forage. Elle a été depuis commercialisée par Roctest limitée, Québec, Canada, et son utilisation a démontré avec le temps que les résultats de tels essais peuvent conduire aux propriétés mécaniques conventionnelles des roches.

L'objectif de cette recherche est de proposer une méthodologie d'interprétation de cet essai de poinçonnement de la parois de trous de forage en tant que moyen palliatif de détermination du module de Young et de la résistance en compression uniaxiale des roches fragiles non poreuses.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Pour plusieurs, le poinçonnement a été depuis longtemps l'objet de recherches dont les buts ont été très variés.

L'examen de la littérature existante sur le sujet nous permet d'observer deux tendances. La première, impliquant un grand nombre d'auteurs, étudie le poinçonnement sous l'aspect rendement énergétique (énergie pour excaver un volume unitaire de matériau ou énergie spécifique). Le but principal poursuivi est de minimiser cette énergie pour abaisser les coûts lors de travaux de forage, d'excavation (optimisation quant au choix de la géométrie de l'outil de forage par exemple). La deuxième tendance concorde avec l'objectif de cette recherche, soit l'interprétation d'essais de poinçonnement pour déterminer les propriétés mécaniques des roches.

Cette deuxième tendance concorde aussi avec l'apparition sur le marché de sondes du même type que celle conçue par Gill au début des années 1970 et décrite par Gill et Ballivy (1). En effet, en plus de celle de Roctest limitée (9) qui descend de la sonde de Gill, existe maintenant une sonde américaine à poinçons plats ou presque, décrite par Serata (10), une sonde japonaise à poinçon conique pour roches tendres dont les détails ont été publiés par Muromachi et al. (11) et une sonde australienne décrite par Enever et Walton (30) qui recommandent l'utilisation d'un poinçon plat pour les roches tendres et un poinçon conique pour les roches dures. La littérature scientifique réfère aussi à une sonde développée à l'Institut Central des Mines de Katowice en

Pologne (31), le brevet polonais datant de 1975; aucune description détaillée de cette sonde n'a pu être retracée.

2.1 LE POINÇONNEMENT DES ROCHES FRAGILES

Quoique très complexes, les recherches sur le processus de poinçonnement des roches fragiles sont nombreuses et tendent surtout à expliquer le comportement des différents types des zones formées sous le poinçon lors de l'avancement de ce dernier suite à l'application de la charge.

Ces recherches confirment l'importance que peuvent avoir sur la réaction de la roche au poinçonnement, des variables telles les propriétés mécaniques de cette dernière et le type de poinçon. Les essais en laboratoire et in situ de même que les analyses numériques rapportés ont permis de modéliser le poinçonnement en tenant compte de ces variables. Dans les études les plus récentes, une attention spéciale est accordée à la zone broyée qui se forme sous le poinçon, laquelle, comme on le verra plus loin, joue un rôle important dans l'élaboration des modèles.

Concernant la description qualitative du phénomène, il apparaît que le principal facteur conditionnant le poinçonnement est le type de matériau testé.

Les articles traitant du sujet peuvent être regroupés en deux (2) grandes catégories: l'une comportant des articles traitant du comportement des matériaux dits fragiles et l'autre, du comportement de ceux dits ductiles ou plastiques. Selon l'un ou l'autre cas, les étapes du

poinçonnement en seront modifiées. Si on se réfère aux figures 2.1 et 2.2 résumant la situation, on constate que lorsqu'on est en présence de matériaux fragiles la pénétration du poinçon est caractérisée princi-palement par la formation de trois (3) types de fractures: par extension, radiales et de cisaillement (responsable de l'écaillage). Par contre, si l'on est en présence d'un matériau ductile, on enregistrera presqu'uniquement des déformations plastiques.

Dans le cas du présent mémoire, on se limitera aux matériaux fragiles non poreux soumis à l'action de poinçons sphérioconiques obtus (poinçon conique parfait compris). Il y aura donc toujours formation d'un faux nez (zone broyée) et des ruptures par cisaillement. Ces fractures partent de cette zone broyée, à une certaine profondeur sous le poinçon et s'étendent jusqu'à la paroi poinçonnée produisant ainsi ce qu'on conviendra d'appeler "écailles". Le processus par lequel ces écailles sont formées, sera appelé "écaillage".

Si, après un premier écaillage, la charge sur le poinçon est subséquemment accrue, le faux nez progressera et on assistera à un deuxième écaillage, débutant évidemment à une profondeur supérieure au premier, puis à un troisième et ainsi de suite.

2.2 MODÈLES EXISTANTS

Les modèles d'interprétation de l'essai de poinçonnement mettent à profit plusieurs facettes différentes des résultats d'essais. Ils peuvent être regroupés en catégories se rapportant à chacune de ces facettes. Ces catégories sont:

a) Modèles utilisant l'enfoncement élastique du poinçon.

b) Modèles utilisant l'enfoncement permanent du poinçon.

c) Modèles utilisant la charge de 1er écaillage.

d) Modèles empiriques.

De plus, les essais de poinçonnement en général et ceux qui sont effectués in situ en particulier, font intervenir des conditions qui diffèrent soit des essais usuels en laboratoire: échelle, courbure des surfaces poinçonnées, présence de contraintes aux points de poinçonnement, etc. On trouve aussi dans la littérature scientifique des ouvrages qui traitent de ces aspects.

2.2.1 Utilisation de l'enfoncement élastique du poinçon

L'expression de l'enfoncement élastique d'un poinçon cylindrique plat dans une masse s'obtient à partir de la théorie classique de l'élasticité. Si a est le rayon de l'aire chargée, et P, la charge appliquée (le poinçon est rigide), on trouve facilement (14) que:

$$d_e = \frac{0.5\ P\ (1 - \nu^2)}{Ea} \qquad (2.2.1a)$$

où d_e est l'enfoncement élastique, P, la charge appliquée au poinçon, E, le module de Young de la roche et ν, le coefficient de Poisson de la roche.

L'équation (2.2.1a) a été utilisée par plusieurs auteurs, dont entre autres, Wagner et Schümann (15), Serata et al. (16) et Cook et al. (19), en relation avec des résultats d'essais de poinçonnement faisant intervenir des poinçons plats ou possédant un très grand rayon de

courbure; ce groupe d'auteurs considèrent qu'antérieurement au premier écaillage, il y a une phase d'enfoncement uniquement élastique.

Gill et al. (3) ont proposé d'utiliser l'équation (2.2.1a) pour les poinçons coniques et sphérioconiques en considérant que le symbole a devient le rayon de l'aire chargée projetée à l'élévation du plan constituant la paroi poinçonnée, on a alors:

$$d_e = \frac{0.5\ P_c\ (1 - \nu^2)}{Ea} \qquad (2.2.1b)$$

où P_c est la charge appliquée par le poinçon conique ou sphérioconique. Puisque l'enfoncement d'un tel poinçon implique la formation d'un faux nez très tôt dans le processus (presqu'au début du chargement et, par conséquent, bien avant le premier écaillage), l'enfoncement total mesuré n'est pas uniquement élastique. Il faut donc isoler l'enfoncement permanent. En appliquant la charge par cycles, la charge maximale atteinte d'un cycle à l'autre étant croissante (voir figure 3.3), il est possible de séparer l'enfoncement total en ses composantes élastique et plastique pour autant que la charge ne produise pas d'écaillage.

Un essai comparable à l'essai de poinçonnement est utilisé depuis longtemps en mécanique des roches pour déterminer le module de Young (E). L'échelle est beaucoup plus grande (essais in situ) et les semelles de répartition de charge sont plates, flexibles ou rigides; c'est l'essai de charge portante. Avec ces essais, une valeur de ν est généralement postulée pour obtenir une valeur de E. Etant donné que ce paramètre est de l'ordre de 0.2 et qu'il est porté au carré, un tel choix arbitraire a généralement peu d'effet sur les résultats comme il le sera démontré à la section 3.3.1.

2.2.2 Utilisation de l'enfoncement permanent du poinçon

On trouve dans la littérature scientifique quelques modélisations de l'enfoncement de poinçons par déformation plastique d'un milieu ductile. Cheatham (25) a proposé un modèle mathématique analytique reliant la charge d'un poinçon dièdre à son enfoncement, le seuil d'écoulement étant défini par une parabole. Pariseau et Fairhurst (26) ont aussi proposé un tel modèle, le seuil d'écoulement étant défini par le critère de Coulomb. Une analyse à la rupture (borne supérieure) approximative de la pénétration d'un poinçon pyramidal dans un milieu obéissant au seuil d'écoulement de Mohr-Coulomb, montrant une faible résistance en tension de même qu'une perte de résistance post-pic, la règle d'écoulement étant non associée, a été publiée par Michalowski (27). Ces modèles ne sont d'aucune utilité pour celui qui s'intéresse à la relation charge-enfoncement dans le cas de roches fragiles non poreuses.

Wang et Lehnhoff (28) ont élaboré un code informatique modélisant par éléments finis les mécanismes d'enfoncement (élastique et permanent) de poinçons dans les roches fragiles peu poreuses. Ce modèle ne peut être appliqué aux poinçons coniques puisqu'il a été conçu dans un espace à deux dimensions.

Le modèle de prévision de l'enfoncement permanent de poinçons dièdre, conique et sphérioconique proposé par Gill et al. (3) pour les roches fragiles non poreuses, fournit une relation entre l'enfoncement permanent et la résistance en compression uniaxiale de la roche

poinçonnée. Le présent mémoire tire donc profit de ce modèle et l'auteur juge à propos de le présenter en détail.

A) Relation charge-enfoncement permanent pour un poinçon dièdre

La figure 2.3 illustre une section à travers un poinçon dièdre d'angle 2α enfoncé verticalement dans une masse de roche fragile non poreuse limitée par un plan horizontal. La section montrée est le plan de l'angle dièdre.

Les segments de droite AB et BC délimitent la zone appelée faux nez.

Le poinçon est soumis à une charge verticale P_d ; N et T sont les composantes normales et tangentielles à AB et BC en réaction à P_d. La géométrie de cette figure permet d'écrire:

$$a = d_p \operatorname{tg} \alpha \qquad (2.2.2a)$$

$$s = \frac{d_p \operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta} \qquad (2.2.2b)$$

Les conditions d'équilibre font que:

$$P_d = 2(N \sin \beta + T \cos \beta) \qquad (2.2.2c)$$

où β est le demi-angle au sommet du faux nez. Si on pose que δ est l'angle de frottement le long des segments AB et BC, on a, à la limite:

$$T = N \operatorname{tg} \delta \qquad (2.2.2d)$$

En combinant les équations (2.2.2c) et (2.2.2d), on obtient:

$$P_d = 2\, N(\sin \beta + \cos \beta \operatorname{tg} \delta) \qquad (2.2.2e)$$

Soit $q = N/s$ (2.2.2f)

c'est-à-dire que q est la pression normale de contact entre le faux nez et la roche intacte.

L'enfoncement progresse pour autant que cette pression de contact q atteint une valeur telle que la roche intacte est broyée et devient partie du faux nez. Soit q_f la valeur de q qui fait progresser l'enfoncement.

L'établissement de l'expression de q_f est possible en empruntant à la théorie de l'expansion des cavités. En admettant que la progression du faux nez coïncide avec la condition qui provoque le broyage de la roche autour d'une cavité en expansion sous l'influence d'une pression interne, on peut écrire, en l'absence d'une pression ambiante:

$$q_f = \frac{C_o}{2} (1 + \cos 2\,\delta) \qquad (2.2.2q)$$

où C_o est la résistance en compression uniaxiale de la roche intacte à l'échelle du problème et δ, l'angle de frottement entre la roche broyée et la roche intacte.

Il est évident qu'au fur et à mesure que progresse le faux nez, la grandeur de la force N, requise pour continuer la progression, augmente même si q_f est constant - équation (2.2.2q). C'est pourquoi, toute progression du faux nez requiert une augmentation de P_d - équation (2.2.2c).

La combinaison des équations (2.2.2.b) et (2.2.2f) donne, en considérant $q = q_f$:

$$N = q_f\, d_p \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sin \beta} \qquad (2.2.2h)$$

en remplaçant l'équation (2.2.2h) dans l'équation (2.2.2c), on trouve:

$$P_d = 2\ q_f\ d_p\ \text{tg}\ \alpha \left(1 + \frac{\text{tg}\ \delta}{\text{tg}\ \beta}\right) \qquad (2.2.2i)$$

L'équation (2.2.2i) est la relation qui existe entre P_d (la charge) et d_p (l'enfoncement permanent) durant un essai de poinçonnement à l'aide d'un poinçon dièdre, si on admet que le faux nez apparaît au premier contact entre le poinçon et la masse rocheuse.

B) <u>Relation charge-enfoncement permanent pour un poinçon conique</u>:

L'expression définie par l'équation (2.2.2i) est valable pour un poinçon dièdre et, le passage à une expression équivalente pour un poinçon conique est possible. Pour procéder à ce passage, il faut définir d'abord q_d, la pression verticale induite par P_d, laquelle est calculée pour l'élévation du plan limitant la masse de roche, c'est-à-dire:

$$q_d = P_d/2a \qquad (2.2.2j)$$

Similairement pour un poinçon conique, on peut écrire:

$$q_c = P_c/\pi a^2 \qquad (2.2.2k)$$

où P_c est la charge totale appliquée au poinçon. On a alors:

$$q_c = S_c\ q_d \qquad (2.2.2l)$$

où pour le présent cas, le facteur de forme de Meyerhoff a pour expression:

$$S_c = 1 + 0.2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}\right) \qquad (2.2.2m)$$

ϕ étant le frottement interne de la roche broyée. En substituant les équations (2.2.2j), (2.2.2k) et (2.2.2m) dans l'équation (2.2.2l), on trouve:

$$P_c = \frac{a\pi}{2} P_d \left[1 + 0.2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}\right)\right] \qquad (2.2.2n)$$

En remplaçant dans l'équation (2.2.2n) P_d par sa forme explicite donnée par l'équation (2.2.2i) et en considérant l'équation (2.2.2a), on trouve:

$$P_c = \pi\, d_p^2\, q_f\, tg^2\, \alpha \left(1 + \frac{tg\, \delta}{tg\, \beta}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}\right)\right] \qquad (2.2.2o)$$

C'est l'équation qui relie la charge P_c à l'enfoncement permanent d_p d'un poinçon conique parfait.

C) Relations charge-enfoncement permanent pour un poinçon sphérioconique

Gill et al. (3) ont proposé d'étendre l'équation (2.2.2o) au poinçon sphérioconique. La façon de procéder est résumée aux paragraphes qui suivent.

La figure 2.4 montre comment la portion de la sphère constituant la pointe du poinçon est découpée et représentée approximativement par une série de cônes droits. Le premier cône (figure 2.4a) est caractérisé par un angle au sommet de $2\alpha_1$ et par un enfoncement d_{pa1} qu'on appelle enfoncement apparent; l'enfoncement réel de la portion de la sphère constituant la pointe du poinçon est d_{p1}. On définit les mêmes paramètres pour les autres cônes.

La figure 2.5 rapporte les courbes charge contre enfoncement pour des poinçons coniques dont les angles aux sommets sont $2\alpha_1$, $2\alpha_2$ et $2\alpha_3$ et illustre l'obtention de la relation charge-enfoncement (la ligne pointillée) du poinçon sphérioconique de la figure 2.4.

2.2.3 Utilisation de la charge de 1er écaillage

Lorsqu'on effectue un essai de poinçonnement sur des roches fragiles non poreuses, avec un poinçon obtus (c'est le cas étudié dans le présent projet), il se produit, à un moment donné, ce qu'on convient d'appeler l'écaillage.

Le 1er écaillage correspondrait à la propagation instable d'une fracture de cisaillement à travers la roche intacte (le long de OA, sur la figure 2.6) en partant de la zone broyée ou immédiatement dessous, et s'étendant jusqu'à la paroi poinçonnée.

Sur la courbe charge contre enfoncement obtenue à partir d'un essai de poinçonnement, on peut identifier facilement et clairement ce point (point E sur les figures 3.2 et 3.3) même dans le cas des poinçons sphérioconiques. Celui-ci apparaît sur les graphiques comme une discontinuité dans la courbe charge-enfoncement. Dans le cas de poinçons cylindriques plats, la charge tombe pratiquement à zéro suite à l'écaillage.

Paul et Sikarskie (6) ont proposé un modèle permettant de prédire la charge d'un premier écaillage produit par un poinçon dièdre lorsque la roche en jeu est fragile, isotrope et non-poreuse. Ce modèle a été étendu aux matériaux anisotropes par Benjumea et Sikarskie (4) et par

Altiero et Sikarskie (20) alors que Miller et Sikarskie (8) et Lundberg (22) l'ont adapté au poinçons coniques entre autres. Dans tous ces modèles, il est admis que la manière dont la charge du poinçon est transmise à la roche dépend de la géométrie du poinçon et de l'angle de frottement entre le poinçon et la roche intacte et broyée. Dutta (7) a repris ces modélisations en supposant que la transmission de la charge du poinçon à la roche dépendait uniquement du matériau.

Les modèles proposés par Miller et Sikarskie (8) et Lundberg (22) font intervenir les paramètres de Coulomb alors que celui de Dutta (7), la résistance en compression uniaxiale et l'angle de frottement interne. Les charges de premier écaillage prédites en utilisant ces modèles s'avèrent toujours trop grandes. D'après Lundberg (22), pour faire de bonnes prévisions, il faut utiliser des valeurs de résistance en compression uniaxiale, des angles de frottement interne et de frottement poinçon-roche plus petites que les valeurs réelles.

2.2.4 Modèles empiriques

L'appareil de poinçonnement de laboratoire NCB décrit par Sylvain (21) donne des résultats qui montrent de très bonnes corrélations avec la résistance en compression uniaxiale des roches testées. Le paramètre mesuré de ces essais de poinçonnement est la charge appliquée à un poinçon conique à géométrie définie, nécessaire pour produire un enfoncement total de 0.025 pouce. L'essai in situ standard proposé par Muromachi et al. (11) conduit à la détermination d'un indice qu'ils tentent de relier aux propriétés conventionnelles sur une base purement statistique.

2.2.5 Facteurs supplémentaires à considérer pour l'interprétation de l'essai de poinçonnement

A) Effet d'échelle

Une attention particulière doit être accordée à l'interprétation des résultats obtenus d'un essai de poinçonnement. En effet, l'échelle de l'essai est relativement petite, soit de l'ordre de s^3 (voir figure 2.3). Ainsi, si on veut déduire à partir d'un essai de poinçonnement une propriété mécanique équivalente à celle obtenue par des essais conventionnels normalisés, on doit tenir compte de ce fait. Aucun auteur ayant proposé des moyens de déduire des propriétés mécaniques conventionnelles des essais de poinçonnement ne propose de correction pour l'échelle.

B) Effet du confinement

Pichette (5) a démontré lors d'essais en laboratoire, la difficulté d'un poinçon à pénétrer la roche à mesure que le confinement augmente.

Par ailleurs, des essais faits par Rochon (2), avec une sonde de terrain, dans un forage exécuté dans un bloc de roche chargé tridimensionnellement en laboratoire, ont montré que l'effet de confinement était contrôlé par la plus petite des contraintes principales agissant perpendiculairement au poinçon (c'est souvent la contrainte intermédiaire dans le cas d'un trou de forage).

Lorsqu'on fait un essai in situ les résultats obtenus soient influencés par la position de la sonde le long du trou. Négliger cet effet dans l'interprétation des résultats peut conduire à une sous-évaluation de certaines propriétés et à une sur-évaluation de certaines autres propriétés.

C) Effet de la courbure des parois poinçonnées

Rochon (2) a aussi étudié l'effet de la courbure de la surface poinçonnée. Ses travaux démontrent que les résultats ne sont que très peu affectés par ce facteur lorsque le diamètre des forages est supérieur à 2 pouces, la différence étant d'environ 5%.

D) Effet de l'environnement

Mills et al. (23) ont étudié, en relation avec la variation des taux de pénétration des foreuses, l'effet d'un surfactant cationique sur la réaction de deux granites au poinçonnement. Bien qu'ils aient observé une augmentation de la taille des fragments produits, les résultats rapportés ne permettent pas de statuer sur l'incidence du surfactant sur les courbes charge-enfoncement.

Il est toutefois généralement reconnu que les roches en présence de fluides montrent des modifications dans leur comportement qui ne sont pas négligeables (24); la définition de l'environnement est donc indispensable pour bien caractériser les conditions d'essais.

CHAPITRE 3

MÉTHODE D'INTERPRÉTATION PROPOSÉE

La méthode d'interprétation proposée est une combinaison de modèles présentés au chapitre 2. Elle accepte le mécanisme de poinçonnement proposé par Gill et al. (3).

Ainsi, on ne s'intéressera qu'aux essais de poinçonnement effectués avec un poinçon sphérioconique obtus dans des matériaux fragiles non poreux, ce qui nous assurera toujours, en plus de l'existence d'un faux nez, d'une rupture par fractures de cisaillement qui s'étendront jusqu'à la surface, produisant ainsi l'écaillage.

3.1 APPAREILLAGE

La figure 3.1 montre le schéma d'un appareil qui a été utilisé par Gill et Ballivy (1) pour effectuer des essais de poinçonnement in situ. L'enfoncement du poinçon est mesuré hydrauliquement par le circuit B et le tube gradué A. Ce circuit sert aussi au rappel du poinçon à la fin de l'essai. La charge est appliquée à l'aide du circuit hydraulique A; elle est mesurée à l'aide du transducteur E. Dans les versions commercialisées de cet appareil, les déplacements du poinçon sont mesurés relativement au bâti de la sonde à l'aide de transducteurs.

Pour les roches à faible résistance, l'expérience montre qu'il est préférable d'utiliser des poinçons coniques avec une extrémité sphérique dont le rayon de courbure est inférieur à 2.38 mm. Toutefois, la tête de tels poinçons s'émousse rapidement avec les roches dures et il vaut

mieux utiliser, dans ces cas, des poinçons dont le rayon de courbure de la sphère est égal ou supérieur à 2.38 mm. L'utilisation de poinçons à pointe sphérique de petit diamètre a pour avantage, relativement aux poinçons cylindriques plats, de permettre, toutes choses étant égales, de plus grands enfoncements; les mesures sont alors plus précises.

3.2 CONDUITE DE L'ESSAI

L'essai de poinçonnement de parois de trous de forage auquel réfère le présent projet se fait par cycles de chargement et de déchargement. Ceci permet de séparer facilement l'enfoncement élastique de l'enfoncement permanent.

À chaque cycle, on note l'enfoncement total à la fin du chargement et l'enfoncement permanent à la fin du déchargement de façon à tracer une courbe du type de celle de la figure 3.2. Si l'acquisition des données est continue, on produit alors une courbe comme celle de la figure 3.3.

La grandeur des cycles de chargement et de déchargement est fonction du type de roche. Elle doit permettre, idéalement, l'obtention d'une dizaine de cycles avant le premier écaillage (points E des figures 3.2 et 3.3).

À l'occasion de plusieurs essais in situ, les valeurs obtenues lors des premiers cycles de chargement et de déchargement sont telles que les courbes charge-enfoncement correspondantes comportent une des anomalies montrées à la figure 3.4. D'après Rochon (2), ces anomalies sont dues à la présence d'aspérités (figure 3.4a) ou de protubérances

(figure 3.4b) sur la surface avec laquelle le poinçon vient en contact. Ceci découle du fait que le contrôle de la qualité des surfaces des parois des forages ne peut être poussé au point que toutes les aspérités ou toutes les protubérances soient absentes. Selon l'objectif poursuivi, les premiers cycles de tels essais sont rejetés ou l'essai au complet est rejeté.

3.3 INTERPRÉTATION PROPOSÉE

3.3.1 Détermination du module de Young

L'équation (2.2.1a), combinée à l'équation (2.2.2a), donne, dans le cas d'un poinçon conique et sphérioconique:

$$E = \frac{0.5\ P\ (1 - \nu^2)}{d_e\ a} \qquad (3.3.1a)$$

où E est le module de Young, P, la charge appliquée au poinçon, d_e, l'enfoncement élastique du poinçon (voir figure 3.3), ν, le coefficient de Poisson et a, le rayon de l'aire chargée projetée sur le plan de la surface poinçonnée. Les figures 3.5 illustrent les relations géométriques qui conduisent au calcul de ce rayon; le plan ab montré sur les figures est le plan passant par la circonférence représentant les lieux des points de tangence entre le cône et la sphère. On tire de la figure 3.5a, où R est le rayon de la sphère du poinçon et d_{pi}, l'enfoncement permanent au cycle de chargement i, que:

$$a_i = R \sqrt{1 - \sin^2 \alpha_i} \qquad (3.3.1b)$$

avec $\sin \alpha_i = \frac{R - d_{pi}}{R}$ (3.3.1c)

si $d_{pi} < R\ (1 - \sin \alpha)$ (3.3.1d)

Toutefois, si l'inégalité (3.3.1d) n'est pas vérifiée, la figure 3.5b conduit à:

$$a_i = \left[R \left(\frac{1 - \sin \alpha}{\sin \alpha}\right) + d_{pi}\right] \operatorname{tg} \alpha \qquad (3.3.1e)$$

Le coefficient de Poisson des roches étant rarement compris à l'extérieur de la plage 0.10 - 0.35, on est justifié de prendre, pour fins de calcul, un coefficient de Poisson de 0.2. Le graphique de la figure 3.6 montre, en ce faisant, que l'erreur introduite dans les calculs est inférieure, dans le cas le plus défavorable, à 9%.

L'équation (3.3.1a) peut être appliquée en tout point d'une courbe charge-enfoncement en deça de la charge de premier écaillage pour lequel on connaît l'enfoncement élastique en plus de la charge appliquée et de l'enfoncement total; l'enfoncement élastique s'obtient par déchargement du poinçon.

3.3.2 Détermination de la résistance en compression uniaxiale

La relation (2.2.2a), élaborée par un poinçon conique parfait peut être réécrite comme suit:

$$C_o = \frac{2\ P}{\pi\ d_p^2\ \operatorname{tg}^2\ \alpha\ F} \qquad (3.3.2a)$$

en posant

$$F = (1 + \cos 2\ \delta) \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \beta}\right) \left[1 + 0.2 \left(\frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}\right)\right] \qquad (3.3.2b)$$

L'utilisation de l'équation (3.3.2b) pour déterminer la résistance en compression uniaxiale requiert la connaissance de la valeur des paramètres β, δ et ϕ. L'angle α est fixé par le poinçon; c'est le demi-angle au sommet de ce dernier. L'angle β est le demi-angle au sommet du faux nez produit par l'enfoncement du poinçon, δ est l'angle de frottement roche broyée - roche intacte et ϕ est l'angle de frottement interne. D'après Gill et al. (3) on est justifié de considérer:

$$\delta \approx \phi \qquad (3.3.2c)$$

et

$$\beta \approx \frac{1}{2}(90 - \phi) \qquad (3.3.2d)$$

Sachant que l'angle de frottement interne des roches est rarement compris à l'extérieur de la plage 30°-40°, il est proposé de prendre, pour fins de calcul, un angle de 35°; l'équation (3.3.2b) donne alors, en considérant que les équations (3.3.2c) et (3.3.2d) s'appliquent, F = 5.4697. Le graphique de la figure 3.7 montre que l'erreur qui est introduite, suite aux suppositions précédentes, demeure inférieure à 8%.

Toujours d'après Gill et al. (3), l'enfoncement de la portion sphérique du poinçon peut être obtenu en découpant cette portion en cônes et en utilisant l'équation (3.3.2a) élaborée pour un cône parfait. Le mode opératoire qu'il faut suivre découle de la section 2.2.2c; il est expliqué ci-après. Ce mode opératoire nécessite une courbe charge-enfoncement comportant des cycles de chargement et déchargement (voir figure 3.3).

Soit P_i, avec i = 0, 2, 3, ..., n, les charges successives auxquelles il y a eu déchargement durant un essai de poinçonnement, P_o

étant zéro. Soit d_{pi} l'enfoncement permanent établi lorsque la charge P_i est relâchée. Le demi-angle au sommet du cône équivalent pour le cycle i a pour expression (voir figure 2.4):

$$\alpha_i = \text{arc sin}\left(\frac{R - d_{pi}}{R}\right) \qquad (3.3.2e)$$

où R est le rayon de la sphère de la pointe du poinçon. Quand $\alpha_i > \alpha$, seule une partie de la portion sphérique du poinçon est enfoncée; l'enfoncement permanent apparent du cône équivalent correspondant à l'enfoncement d_{pi} est (voir figure 3.8):

$$d_{pai} = \frac{R(1 - \sin\alpha_i)}{\sin\alpha_i} + d_{pi} \qquad (3.3.2f)$$

Quand $\alpha_i \leq \alpha$, on pose $\alpha_i = \alpha$ dans l'équation 3.3.2f pour le calcul de d_{pai}. On peut alors écrire, d'après l'équation (3.3.2a):

$$(C_o)_i = \frac{2P_i}{F\pi\, d_{pai}^2\, tg^2\alpha_i} \qquad (3.3.2g)$$

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

Dans ce chapitre du mémoire, la méthode d'interprétation est appliquée à des résultats d'essais de poinçonnement au cours desquels les enfoncements total et permanent ont été mesurés. Ces derniers proviennent de divers travaux antérieurs effectués au Laboratoire de mécanique de roches de l'École Polytechnique, travaux effectués pour d'autres fins que ceux de la présente recherche.

L'utilisation de résultats d'essais en laboratoire dans le présent mémoire plutôt que d'essais en place est volontaire. En effet, le contrôle de qualité des essais de poinçonnement en laboratoire est beaucoup plus facile à réaliser. Lors d'essais en place, les poinçonnements sont exécutés dans des forages où aucun examen visuel du déroulement de l'essai ne peut être effectué. Puisque l'objectif présentement poursuivi est, entre autres, de tester une méthodologie d'interprétation de résultats, il a été jugé préférable de s'en tenir pour le moment à des essais en laboratoire, l'utilisation de résultats d'essais in situ pouvant se faire subséquemment.

4.1 DÉTERMINATION DU MODULE DE YOUNG

4.1.1 Calcaire de St-Marc

Les résultats d'essais de poinçonnement considérés dans ce cas-ci proviennent de Pichette (5). Ces essais de poinçonnement ont été

exécutés conformément aux normes proposées par ce dernier, sur un calcaire provenant de St-Marc des Carrières, Québec, Canada.

Le cône du poinçon sphérioconique utilisé par Pichette pour les essais avait un angle au sommet de 120°, le rayon de courbure de la sphère étant 2.38 mm. L'incrément de charge, d'un cycle à l'autre, était de 890 N. Le tableau A1 de l'annexe A présente les données obtenues en laboratoire. Elles se rapportent au dernier cycle de chargement complet effectué avant le premier écaillage.

L'équation (3.3.1a) s'applique à un milieu semi-infini; c'est l'analogie qui est faite lorsqu'on procède au poinçonnement d'une paroi d'un forage dans un massif rocheux. Toutefois, dans le cas des résultats d'essais analysés dans la présente section, les essais ont été effectués sur des cylindres d'environ 54 mm de diamètre (carotte de forage de calibre NX) et de 54 mm de hauteur. L'annexe B résume une analyse de cette situation et propose une courbe permettant de corriger les enfoncements mesurés.

Le tableau 4.1 présente les valeurs des modules de Young obtenues de chaque essai. On y indique aussi la moyenne arithmétique de l'ensemble des résultats des 12 essais et l'écart type correspondant.

4.1.2 Granite de Barre

Les résultats impliqués dans cette portion du mémoire proviennent d'essais de poinçonnement exécutés par Labrie (12) sur un granite fort connu, celui de Barre, Vermont, E.-U. Les conditions d'essais décrites pour le calcaire de St-Marc (section 4.1.1) s'appliquent également à ces

TABLEAU 4.1

ÉVALUATION DU MODULE DE YOUNG - CALCAIRE DE ST-MARC

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm	a, mm	d_e, mm	d_e corr. mm	E, GPa
1.1	7117	0.6056	0.4928	1.4912	0.1128	0.0973	24.0
1.2	6227	0.4826	0.3886	1.3108	0.0939	0.0813	28.5
1.3	6227	0.4978	0.4115	1.3504	0.0863	0.0747	30.2
1.4	5338	0.5399	0.4420	1.4032	0.0979	0.0846	21.9
1.5	5338	0.4789	0.3708	1.2800	0.1081	0.0936	21.7
1.6	5338	0.4358	0.3454	1.2360	0.0931	0.0807	26.1
1.7	6227	0.6096	0.4877	1.4824	0.1219	0.1053	19.5
1.8	6227	0.4953	0.3937	1.3196	0.1016	0.0880	26.2
1.9	8006	0.6955	0.5842	1.6496	0.1113	0.0972	27.7
1.10	3558	0.2870	0.2159	1.9905	0.0711	0.0624	28.2
1.11	5338	0.4510	0.3734	1.2844	0.0776	0.0672	30.2
1.12	5338	0.5450	0.4674	1.4472	0.0776	0.0670	26.9
Moyenne				1.3538			25.9
Écart type							3.5

No: identification de l'éprouvette d'essai;
P: charge appliquée par le poinçon;
d_t: enfoncement total du poinçon;
d_p: enfoncement permanent du poinçon;
d_e: enfoncement élastique du poinçon;
a: rayon de l'aire chargée projetée sur le plan de la surface poinçonnée;
E: module de Young.

essais, sauf que les incréments de charge d'un cycle à l'autre ont varié entre 713 N et 1784 N. Les données obtenues par Labrie sont présentées au Tableau A2 de l'annexe A et elles se rapportent au dernier cycle de chargement complet effectué avant le premier écaillage.

Le tableau 4.2 présente les valeurs du module de Young obtenues de chaque essai. On y donne aussi la moyenne arithmétique de l'ensemble des résultats des 10 essais et l'écart type correspondant. Les corrections dues au fait que les dimensions des éprouvettes différentes de celles d'un milieu semi-infini ont été faites conformément au contenu de l'annexe B.

4.2 DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE

Dans la présente section, les résultats d'essais présentés au tableau A3 de l'annexe A ont été soumis au calcul de la résistance en compression uniaxiale conformément à la méthodologie décrite à la section 3.3.2. Les données propres à chaque cycle de chargement de chaque essai, lorsqu'introduites dans l'équation (3.3.2g), donnent une valeur de résistance en compression uniaxiale.

Le tableau 4.3 rapporte la moyenne arithmétique de résistance obtenue de chaque essai de même que la moyenne arithmétique et l'écart type de l'ensemble des essais.

TABLEAU 4.2

ÉVALUATION DU MODULE DE YOUNG - GRANITE BARRE

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm	a, mm	d_e, mm	d_e corr. mm	E, GPa
2.1	7126	0.278	0.102	0.689	0.176	0.164	30.3
2.2	6413	0.228	0.117	0.737	0.111	0.100	41.8
2.3	5344	0.214	0.061	0.535	0.153	0.144	33.3
2.4	6770	0.276	0.102	0.689	0.174	0.163	28.9
2.5	5344	0.253	0.122	0.752	0.131	0.122	30.3
2.6	4899	8.188	0.046	0.466	0.142	0.134	37.7
2.7	4810	8.165	0.053	0.500	0.112	0.104	44.4
2.8	3385	8.125	0.028	0.364	0.097	0.091	49.1
2.9	12025	8.371	0.119	0.743	0.252	0.232	33.5
2.10	4988	0.238	0.086	0.634	0.152	0.144	26.2
Moyenne				0.6109			35.6
Écart type							7.5

No: identification de l'éprouvette d'essai;
P: charge appliquée par le poinçon;
d_t: enfoncement total du poinçon pour la charge P;
d_p: enfoncement permanent du poinçon pour la charge P;
d_e: enfoncement élastique du poinçon pour la charge P;
a: rayon de l'aire chargée projetée sur le plan de la surface poinçonnée;
E: module de Young.

TABLEAU 4.3

ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE
CALCAIRE DE ST-MARC

No	Nb	Co, MPa
3.1	8	354.8
3.2	7	380.8
3.3	5*	382.2
3.4	6	301.1
3.5	6	383.4
3.6	5**	380.9
3.7	7	333.3
3.8	7	356.7
3.9	9	335.8
3.10	4	407.7
3.11	6	336.7
3.12	5	356.2
Moyenne		359.1
Écart type		36.8

No: identification de l'éprouvette d'essai;
Nb: nombre de cycles de chargement soumis au calcul de la résistance en compression uniaxiale;
C_o: résistance en compression uniaxiale moyenne pour l'éprouvette.

*: la charge du dernier cycle fut 6227 N;
**: la charge du dernier cycle fut 5338 N.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5.1 LE MODULE DE YOUNG

Le tableau 5.1 permet de comparer les modules de Young obtenus des essais de poinçonnement aux modules de Young obtenus suite à des essais standard conformes aux normes de l'ASTM (18). Le tableau 5.2 rapporte quelques résultats déjà publiés obtenus à l'aide de poinçons plats ou pouvant être considérés comme tels, les calculs faisant intervenir l'équation (2.2.1a) et les modules calculés étant la pente moyenne de la portion rectiligne de la courge charge-enfoncement total. Les diamètres de poinçon considérés sont inférieurs à 20.0 mm. Ces essais ont été exécutés en laboratoire.

La comparaison des rapports module obtenu par essai de poinçonnement/module obtenu par essai conventionnel normalisé, donnés aux tableau 5.1 et 5.2, montre que ceux faisant intervenir un poinçon sphérioconique sont "grosso modo" identiques à ceux déduits des essais avec les poinçons cylindriques plats.

D'après les caractéristiques géométriques du poinçon utilisé pour l'exécution des essais dont les résultats ont conduit à l'élaboration des tableaux 4.1 et 4.2, la valeur de l'enfoncement permanent qui fait que la pointe sphérique du poinçon est complètement enfouie lors d'un essai est 0.3289 mm. Dans le cas du calcaire de St-Marc, la quatrième colonne du tableau 4.1 permet de constater que seule l'éprouvette 1.10 n'a pas permis l'enfoncement complet du poinçon sphérique. L'examen de

Tableau 5.1

Comparaison des modules obtenus dans le présent mémoire aux modules découlant des essais conventionnels normalisés

Roche	Essais de poinçonnement	Essais normalisés	Rapport
Calcaire de St-Marc	25.5 MPa	54.1 MPa*	0.47
Granite de Barre	35.6 MPa	45.9 MPa**	0.78

* Voir annexe D
** Voir annexe E

Tableau 5.2

Rapports modules publiés obtenus par poinçonnement/modules obtenus par essais conventionnels normalisés (poinçons cylindriques plats)

Auteur	Roche	Rapport
Wagner et Schümann (15)*	Quartzite Shale Norite Marbre Grès	0.50 à 0.55 0.44 à 0.52 0.45 à 0.59 0.73 à 0.81 0.44 à 0.51
Serata et al. (16)**	Granite Basalt Schiste	0.65 0.78 0.54
Cook et al. (19)***	Granite	0.5 à 0.8

* Diamètres des poinçons utilisés: 3.8 mm, 7.6 mm et 15.2 mm; d'une façon générale, les rapports diminuent avec l'accroissement du diamètre du poinçon.

** Diamètre du poinçon utilisé: 5.0 mm

*** Diamètre des poinçons utilisés: 5.0 mm, 10.0 mm et 20.0 mm.

la quatrième colonne du tableau 4.2 qui rapporte les résultats d'essais sur le granite de Barre, révèle que la portion sphérique du poinçon n'a été complètement enfoncée dans aucun des cas. Le rayon moyen de l'aire chargée projetée au dernier cycle de chargement est 1.3538 mm dans le cas du calcaire de St-Marc alors que ce même rayon moyen est 0.6109 mm dans le cas du granite de Barre. Ces faits peuvent expliquer la différence entre les rapports du tableau 5.1; le volume effectif dans le cas du calcaire serait supérieur à celui du granite.

5.2 LA RÉSISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE

Le tableau 5.3 permet de comparer les résistances en compression uniaxiale obtenues des essais de poinçonnement aux résistances calculées suite à des essais standard conformes aux normes de l'ASTM (18). Le tableau 5.4 rapporte quelques résultats déjà publiés obtenus dans les conditions déjà décrites pour ceux du tableau 5.2. Les résistances rapportées dans ce tableau sont les pressions de contact moyennes poinçon-roche au moment de l'écaillage dans le cas des poinçons cylindriques plats. La comparaison des lignes Ladanyi/I et Ladanyi/II permet de constater, dans un premier temps, qu'un poinçon conique obtus donne les mêmes rapports qu'un poinçon plat si on calcule la pression de contact en prenant l'aire chargée projetée.

La comparaison des rapports résistance en compression uniaxiale (ou pression de contact ultime)/résistance obtenue par essais conventionnels normalisés donnés aux tableaux 5.3 et 5.4 montre que c'est la méthodologie proposée dans le présent mémoire qui mène au plus faible

Tableau 5.3

Comparaison de la résistance en compression uniaxiale du calcaire de St-Marc obtenue dans le présent mémoire à la résistance découlant des essais conventionnels normalisés

Essais de poinçonnement	Essais normalisés	Rapport
359.1 MPa	91.9 MPa*	3.91

* Voir annexe D

Tableau 5.4

Rapports résistances en compression uniaxiale obtenue par poinçonnement/résistance obtenues par essais conventionnels normalisés

Auteur	Roche	Rapport
Wagner et Schümann (15)[a]	Quartzite Shale Norite Marbre Grès	5.48 à 13.7 4.59 à 7.57 7.66 à 11.7 4.74 à 6.91 3.20 à 4.66
Serata et al. (16)[b]	Granite Basalt Schiste	17.9 19.4 15.4
Cook et al. (19)[c]	Granite	9.3 à 12.8
Ladanyi/I (29)[d]	Grès Chlorite	7.2 10.8
Ladanyi/II (29)[e]	Grès Chlorite Quarzite	7.1 10.5 15.4

a) Poinçons plats dont les diamètres étaient 3.8 mm, 7.6 mm et 15.2 mm; d'une façon générale, les rapports diminuent avec l'accroissement du diamètre du poinçon.
b) Poinçon plat ayant 5 mm de diamètre.
c) Poinçons plats dont les diamètres étaient 5.0 mm, 10.0 mm et 20.0 mm; d'une façon générale, les rapports diminuent avec l'accroissement du diamètre du poinçon.
d) Poinçon plat ayant 6.35 mm de diamètre.
e) Poinçon conique droit parfait ayant 120° d'angle au sommet.

rapport. Cette dernière, rappelons-le, fait intervenir un modèle mécanique de croissance de faux nez, croissance qui dépend de la résistance en compression uniaxiale; l'approche est donc totalement différente de celle de Wagner et Schümann (15), Serata et al. (16) et Cook et al. (19) qui fait intervenir uniquement la pression de contact ultime. La méthodologie proposée donne un rapport, pour le calcaire de St-Marc, de 3.91 (voir le tableau 5.3) qui à première vue serait problématique si aucune référence n'était faite à l'effet d'échelle. En effet, les valeurs de la résistance en compression uniaxiale calculées impliquent de petits volumes de roches et il n'y a pas lieu de se surprendre de la valeur élevée du rapport.

Le facteur d'échelle requis pour procéder à la correction de la résistance en compression uniaxiale obtenue des essais de poinçonnement suivant la méthodologie proposée dans le présent mémoire et rendre cette résistance comparable à celle donnée par les essais normalisés, peut être déduit de l'analyse de la dispersion de l'ensemble des résultats en mettant à profit la théorie du maillon le plus faible (17). L'annexe C montre comment; le facteur d'échelle obtenu est 0.11.

Quand à la détermination du volume effectif à considérer pour procéder à la correction, la figure 3.8 propose un modèle. Le cylindre illustré à cette figure a pour rayon a, le rayon de l'aire chargée projetée et pour hauteur, la profondeur du faux nez; son volume est alors:

$$V_R = \pi\ a^3/\mathrm{tg}\ \beta \qquad (5.3a)$$

où β est le demi-angle au sommet du faux nez. En considérant que $\beta = 27.5$, comme le suggère l'équation (3.3.2d) et le paragraphe qui suit cette équation, l'équation (5.3b) peut être récrite comme suit:

$$V_R = 6.035\ a^3 \qquad (5.3b)$$

En substituant dans l'équation (5.3b) la valeur moyenne du paramètre a, calculée dans le cas de chaque cycle de chargement à partir des données du tableau A.3, on trouve $V_R = 0.8134\ mm^3$.

L'éprouvette standard possède un volume de 247.350 mm^3. La résistance obtenue par poinçonnement corrigée pour l'effet d'échelle est (voir annexe C):

$$\overline{C_o} = 359.1 \left(\frac{247.350}{0.8134}\right)^{-0.11}$$

$$\overline{C_o} = 89.6\ MPa$$

qui est à toutes fins pratiques égale à la valeur obtenue par Pichette (5) suite à des essais standard, soit 91.7 MPa (voir annexe D).

CHAPITRE 6

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'objectif du présent projet est de proposer une méthodologie d'interprétation d'essais de poinçonnement de parois de trous de forage en tant que méthode palliative de détermination des propriétés mécaniques conventionnelles des roches fragiles non poreuses.

L'interprétation proposée fait intervenir le mécanisme de poinçonnement proposée par Gill et al. (3) et conduit à la détermination du module de Young et de la résistance en compression uniaxiale. Ce modèle s'applique à des poinçons sphérioconiques obtus; ces derniers ont l'avantage de produire des enfoncements supérieurs à ceux des poinçons plats, donc plus faciles à mesurer, tout en donnant des résultats qui peuvent être comparés à ces derniers.

La méthodologie d'interprétation proposée a été testée à l'aide d'essais de poinçonnement exécutés en laboratoire. Il a été, en effet, jugé préférable de valider cette méthodologie à l'aide d'essais dont la qualité pouvait être visuellement contrôlée; les essais in situ ne permettent pas un tel contrôle de la qualité.

Les valeurs des modules de Young obtenues à l'aide de la méthodologie proposée donnent des rapports modules de Young obtenus par poinçonnement/modules de Young obtenus d'essais normalisés qui sont comparables à ceux déjà publiés dans le cas des deux types de roche testés, malgré que ces derniers impliquent des poinçons cylindriques plats. Ceci s'explique par le fait que la méthodologie proposée élimine l'enfoncement permanent des calculs du module.

Pour ce qui a trait à la résistance en compression uniaxiale, la méthodologie proposée ne fait aucune référence à la contrainte de contact comme le font les auteurs ayant déjà publié des résultats. Elle fait intervenir un mécanisme de croissance de faux nez sous le poinçon, duquel la résistance en compression uniaxiale est tirée. Après correction pour l'effet d'échelle, la valeur de la résistance en compression uniaxiale du calcaire étudié des essais de poinçonnement est sensiblement égale à celle donnée par essais normalisés. Ce point constitue un avantage pour la méthodologie proposée; les approches déjà publiées surévaluent passablement les résistances.

La quantité de résultats d'essais soumis à l'interprétation par la méthodologie proposée se limite à deux types de roche dans le cas des modules de Young et à un type de roche dans le cas de la résistance en compression uniaxiale. Maintenant que la méthodologie a été bien établie, des résultats d'essais impliquant d'autres types de roche fragiles non poreuses devraient être analysés. Compte tenu des difficultés rencontrées dans le présent mémoire lors de l'interprétation des essais de poinçonnement, il faudra s'assurer que les instruments de mesure des enfoncements soient 10 fois plus précis que ceux utilisés jusqu'à maintenant.

Dans un deuxième temps, la méthodologie devrait être adaptée aux roches tendres tels les shales, les schistes argileux et autres; ces dernières sont souvent caractérisées par une mauvaise récupération lors de forages. Dans ces cas, le modèle décrivant le mécanisme de l'enfoncement permanent du poinçon devra être révisé.

Dans un troisième temps, l'utilisation de la méthodologie pour interpréter des résultats d'essais de poinçonnement in situ devrait être évaluée en menant en parallèle des programmes d'essais conventionnels normalisés.

RÉFÉRENCES

(1) GILL, D.E., BALLIVY, G. - Investigations géomécaniques des emplacements de tunnels en rocher sur l'Ile de Montréal, Revue Can. Géot., Vol. 13, pp. 481-497, 1976.

(2) ROCHON, P. - Le poinçonnement des parois des sondages en tant que méthode de prévision des taux de pénétration des foreuses pleine section, Mémoire de maîtrise, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 249 p., 1979.

(3) GILL, D.E., PICHETTE, C., ROCHON, P., DUBÉ, P.B. - 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. Vol. 22, pp. 103-110, 1980.

(4) BENJUMEA, R., SIKARSKIE, D.L. - A note on the penetration of a rigid wedge into a nonisotropic brittle material, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 6, pp. 343-352.

(5) PICHETTE, C. - Normalisation de l'essai de poinçonnement d'Handewith, Mémoire de maîtrise, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 181 p., 1979.

(6) PAUL, B., SIKARSKIE, D.L. - A preliminary theory of static penetration by a rigid wedge into a brittle material, Trans. Soc. Min. Eng., Vol. 232, pp. 372-383, 1965.

(7) DATTA, P.K. - A theory of percusive drill bit penetration, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 9, pp. 543-567, 1972.

(8) MILLER, M.H., SIKARSKIE, D.L. - On the penetration of rock by three-dimentional indentors, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 5, pp. 375-398, 1968.

(9) ROCTEST LTÉE - Affiche publicitaire sur le Borehole Rock Indenter, modèle BOLO-75, 1986, Montréal, Québec, Canada.

(10) SERATA, S. - Development of in situ property measuring system. Laboratory calibration and field performance of propertymeter P-100, Serata Geomechanics Inc., Internal Review Report, 53 p., 1983.

(11) MUROMACHI, T., SAKAI, Y., TSUCHIYA, H., YAMAMOTO, Y. - Borehole cone apparatus for weak rocks, Proc. Penetration Testing 1988, ISOP-1, Balkema, pp. 875-880, 1988.

(12) LABRIE, D. - Essai d'Handewith: écaillage et modélisation, Rapport UPIR, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 25 p., 1980.

(13) CORTHESY, R. - Développement d'une méthode analytique d'interprétation des mesures de pressions de terrains par la technique du "doorstopper" pour des roches anisotropes et non linéaires, Mémoire de maîtrise, Département de génie minéral, École Polytechnique de Montréal, 66p. 1982.

(14) TIMOSHENKO, S.P., GOODIER, J.N. - Theory of Elasticity, 3rd edition, Mc Graw-Hill, 506 p., 1951.

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

(16) SERATA, S., TSAI, F., MCNAMARA, J.F. - Field experience with a multiple - piston loading probe, Proc. 14th US Symp. Rock Mech., pp. 359-369, 1983.

(17) HUDSON, J.A., FAIRHURST, C. - Tensile strength, Weibull's theory and general statistical approach to rock failure, Proc. Southampton 1969 Civil Engineering Material Conference, Part 2, Wiley Interscience, pp. 901-914, 1971.

(18) Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Volume 04.08, Soil and Rock, Building Stones, Geotextiles, ASTM, 953 p., 1988.

(19) COOK, N.G.W., HOOD, M., TSAI, F. - Observation of crack growth in hard rock loaded by an indentor, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 21, pp. 97-107, 1984.

(20) ALTIERO, N.J., SIKARSKIE, D.L. - Chip formation in anisotropic rock, Rock Mech., Vol. 10, pp. 125-137, 1978.

(21) SZLAVIN, J. - Relationships between some physical properties of rock determined by laboratory test, Int. J. of Rock Mech., Vol. 11, pp. 57-66, 1974.

(22) LUNDBERG, B. - Penetration of rock by conical indenters, Int. J. of Roch Mech., Min. Sci., Vol. 11, pp. 209-214, 1974.

(23) MILL, J.J., HUNTINGTON, R.D., WESTWOOD, A.R.C. - Environment-sensitive wedge indentation behavior of granites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 13, pp. 289-290, 1976.

(24) AUBERTIN, M., GILL, D.E., GAGNON, D. - Les effets physico-chimiques des fluides interstitiels sur le comportements des roches, EPM/RT-88/31, École Polytechnique de Montréal, 64 pages, 1988.

(25) CHEATHAM, J.B. - Indentation analysis for rock having a parabolic yield enveloppe, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 1, pp. 431-440, 1964.

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

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

(28) WANG, J.K., LEHNHOFF, T.F. - Bit penetration into rock - A finite element study, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 13, pp. 11-16, 1976.

(29) LADANYI, B. - Rock failure under concentrated loading, Proc. 10th US Symp. on Rock Mech., pp. 363-387, 1968.

(30) ENEVER, J.R., WALTON, R.J. - New instruments for strength and stress measurement in coal mines, Proc. 2nd Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Belkema, pp. 59-74, 1988.

(31) SIKORA, W., KIDYBINSKI, A. - Étude de la stabilité des roches en vue de choisir le meilleur soutènement dans une voie, C.R. 6e Conf. Int. Pressions de Terrains, Banff, Canada, Thème II, C.T. 16, 18 pages, 1977.

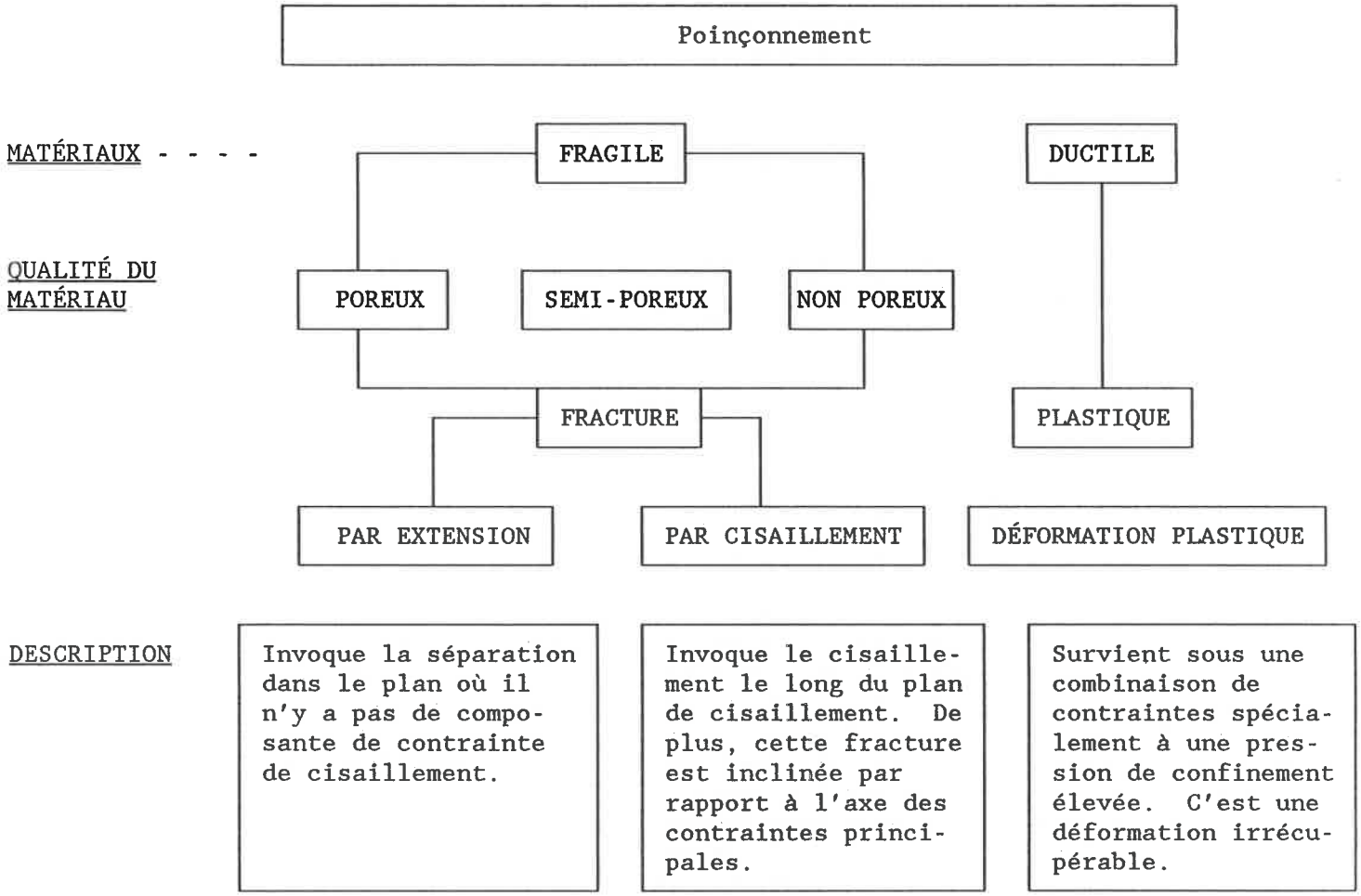


Figure 2.1: Le poinçonnement - d'après Rochon (2).

MATÉRIAU VIERGE

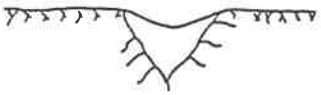
(1) Il y a d'abord une réponse du matériau sous la forme du poinçon.

RÉPONSE ÉLASTIQUE

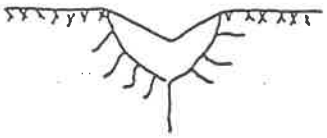
(2) Puis il y a broyage des aspérités sous et aux abords de la pointe de l'outil.

BROYAGE DES ASPÉRITES

(3) Avec l'augmentation de la charge, il y a formation d'une zone broyée sous le poinçon appelée faux nez, zone qui croît avec la charge; cette zone, devenant compactée, sera assujettie à de très grandes pressions de confinement. Selon le degré de porosité plus ou moins élevée du matériel, il ne se formera pas ou peu de fissures radiales.

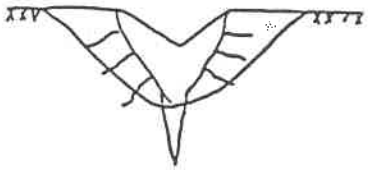


FORMATION DE LA ZONE BROYÉE



FORMATION DE LA FISSURE EXTENSIONNÉE

(4) Simultanément, une fracture du type extension se forme sous la zone broyée et avec l'augmentation de la force, elle s'étend dans le matériau vierge.



FORMATION D'ÉCAILLES

(5) Enfin, avec l'augmentation des contraintes, des fractures de cisaillement apparaissent et se propagent de façon stable au début et instable à la fin. Ces fractures partent de la zone broyée et s'étendent jusqu'à la surface produisant ainsi l'écaillage.

Figure 2.2: Étapes du processus de poinçonnement d'un matériau fragile non poreux sous un poinçon obtus - d'après Rochon (2).

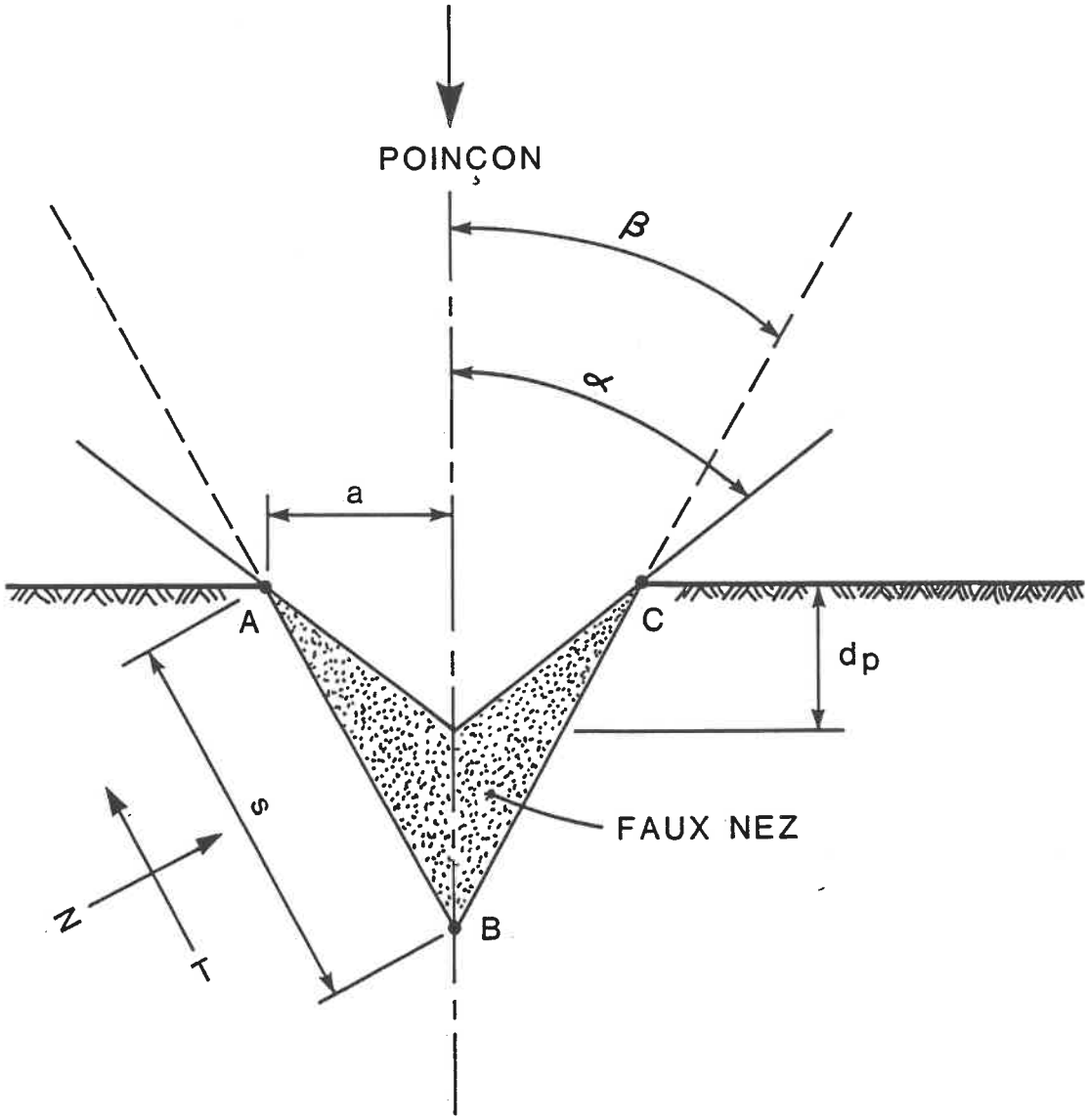


Figure 2.3: Poinçon dièdre en cours d'enfoncement dans un matériau fragile non poreux - d'après Pichette (5).

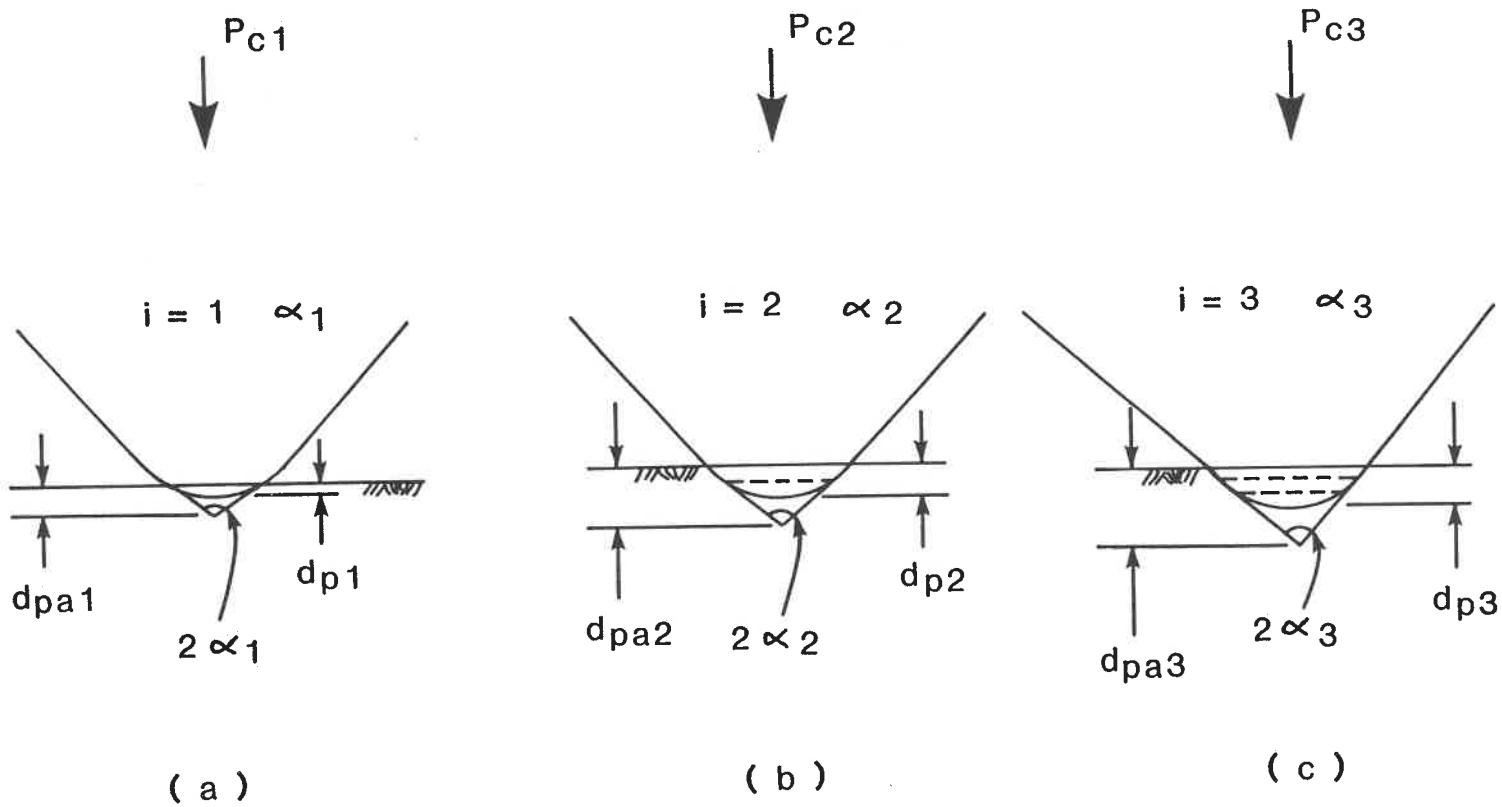


Figure 2.4: Figure illustrant comment l'enfoncement permanent de la pointe sphérique d'un poinçon sphérioconique peut être prédit à l'aide de cônes équivalents.

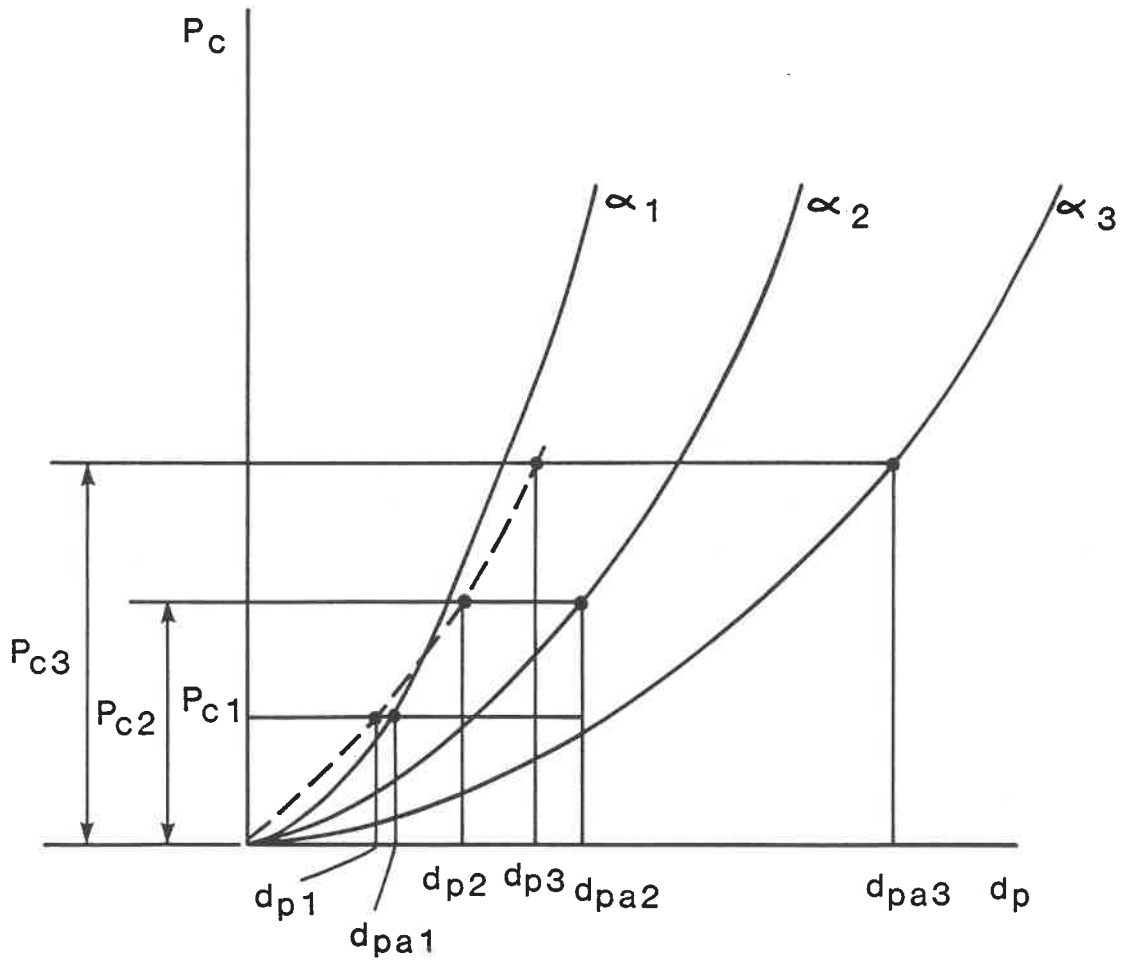
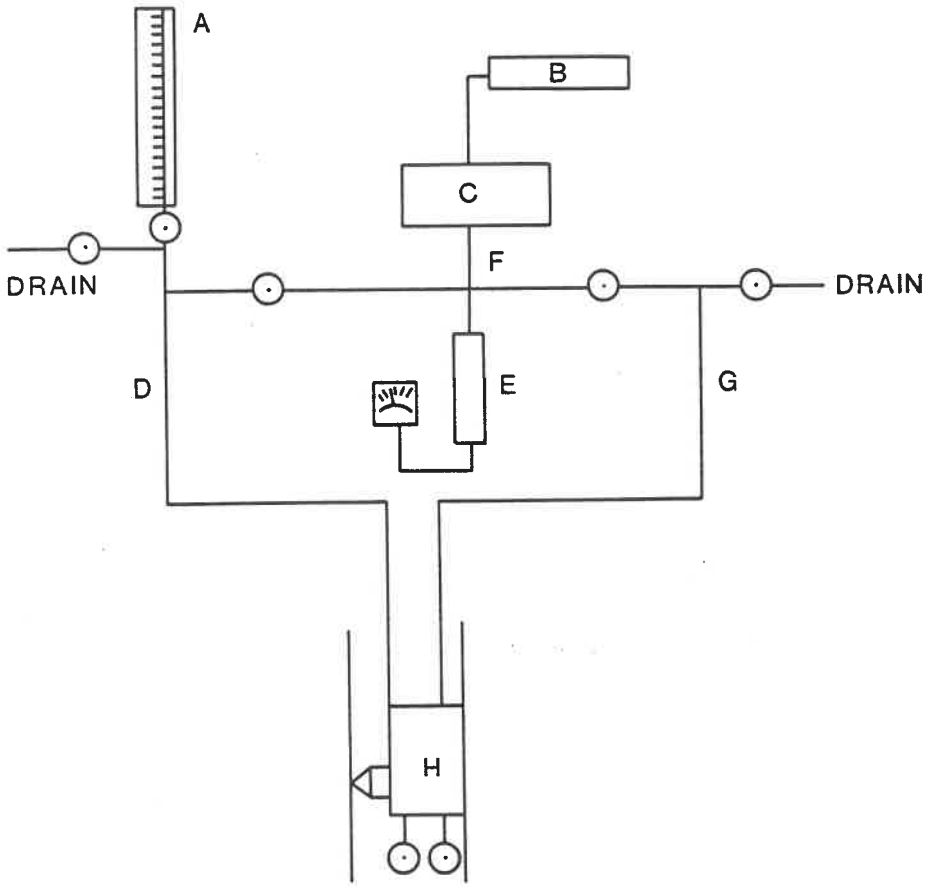


Figure 2.5: Courbe charge-enfoncement permanent (ligne pointillée) d'un poinçon sphérioconique obtenue par la méthode proposée par Gill et al. (3).



A - MESURES DE L'ENFONCEMENT
B - POMPE
C - RESERVOIR
D - CIRCUIT "B"
E - MESURES DE LA CHARGE
F - CIRCUIT COMMUN
G - CIRCUIT "A"
H - SONDE
⊙ - VALVE

Figure 3.1: Schéma de la sonde d'essais de poinçonnement in situ conçue par Gill - d'après Gill et Ballivy (1).

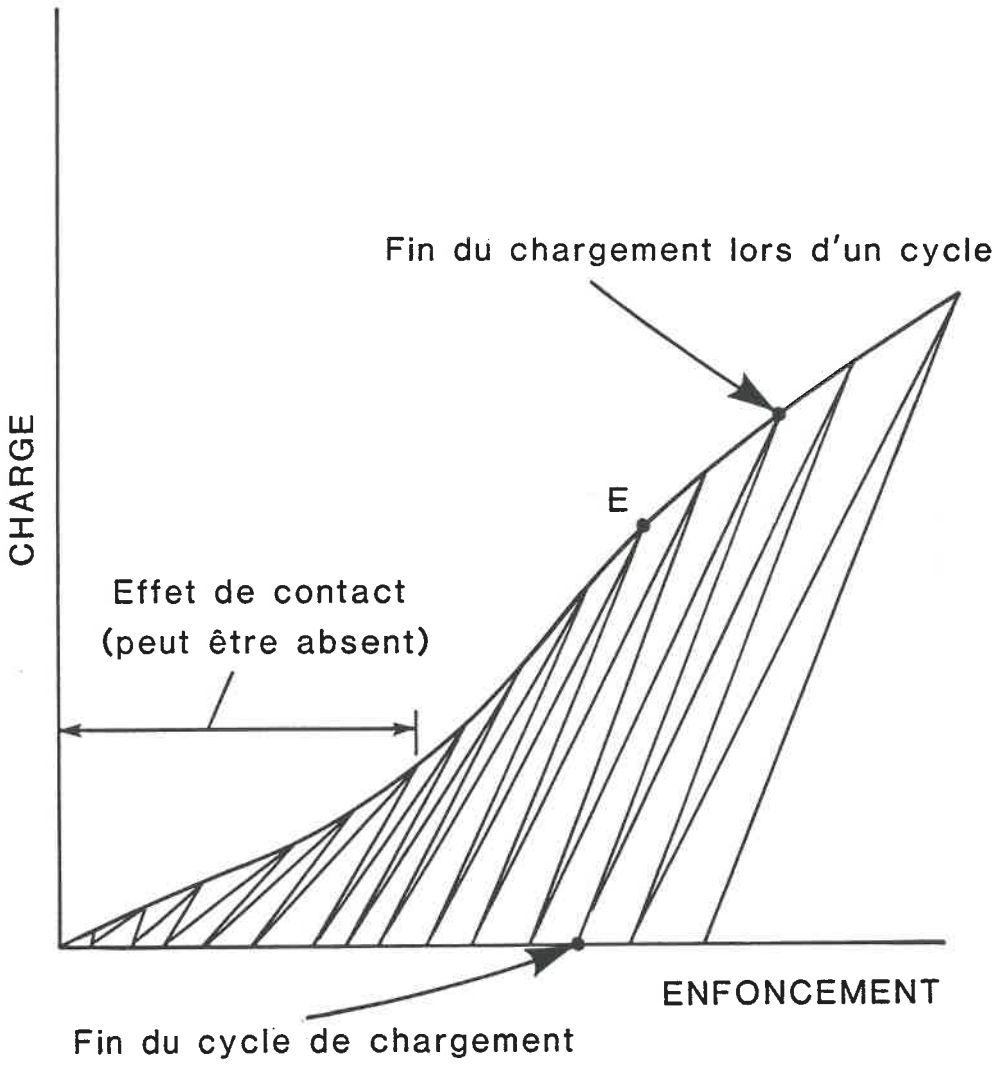


Figure 3.2: Courbe charge-enfoncement obtenue lorsque l'enfoncement est mesuré à la fin du chargement d'un cycle (total) et à la fin du déchargement (permanent).

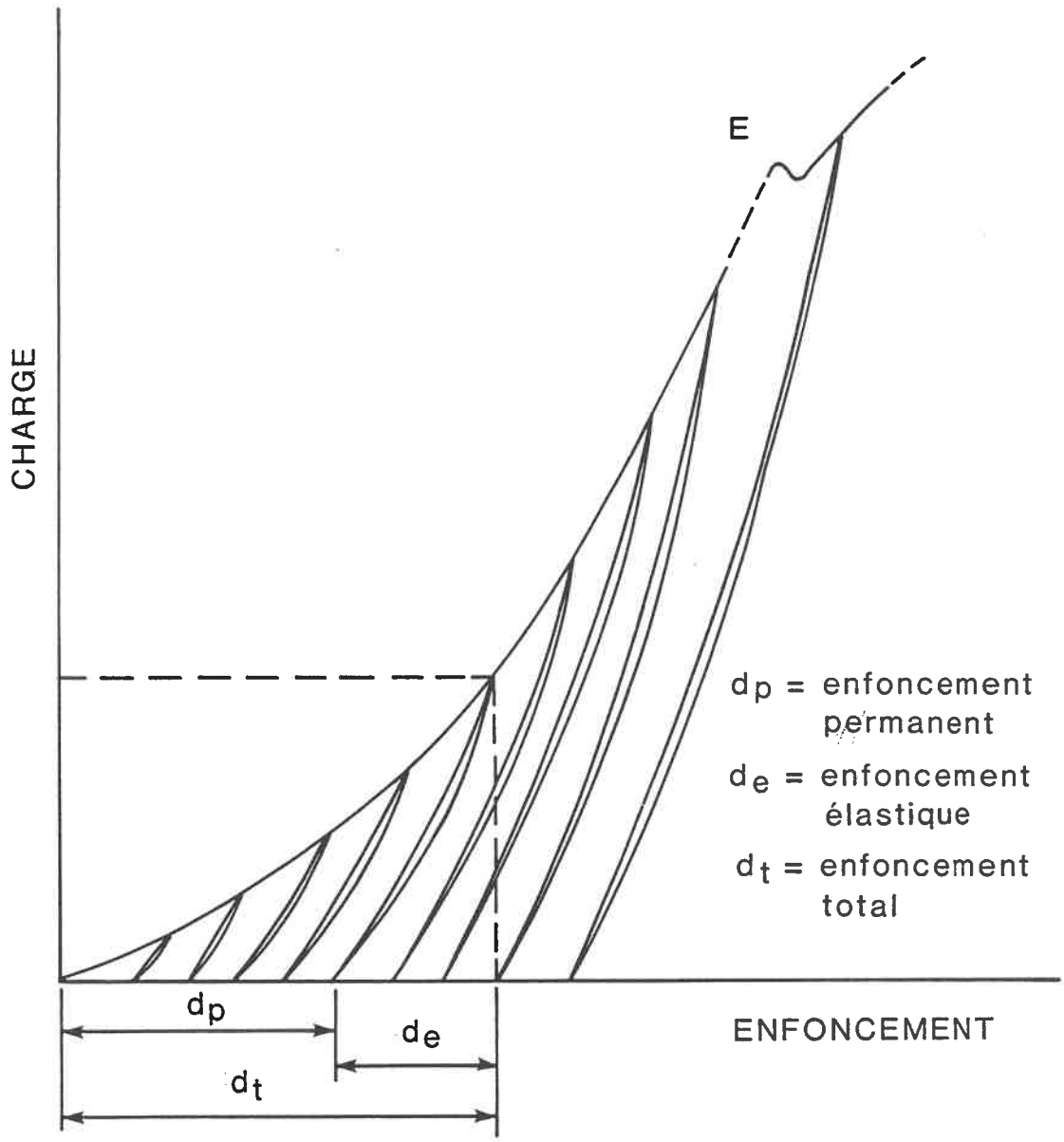
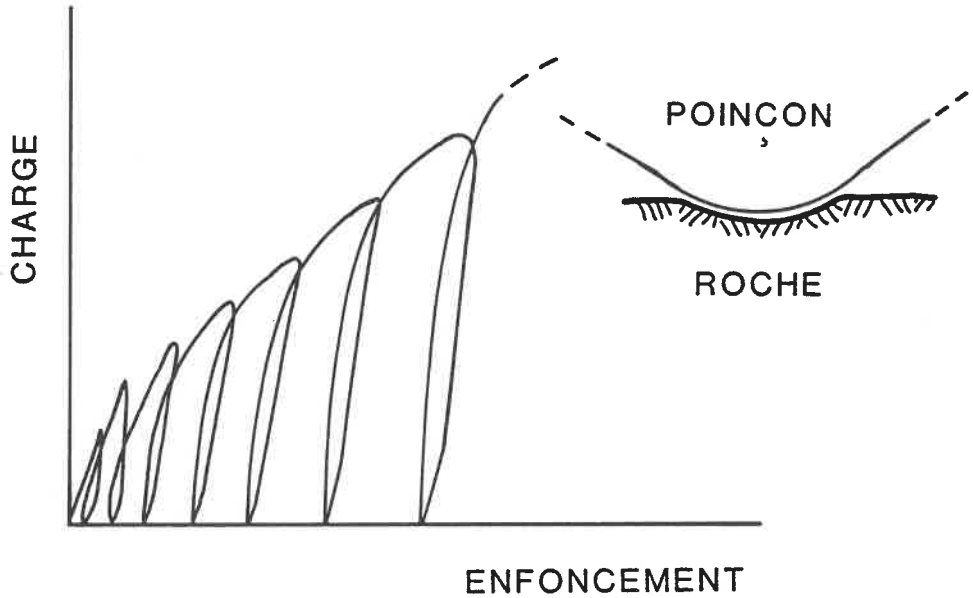
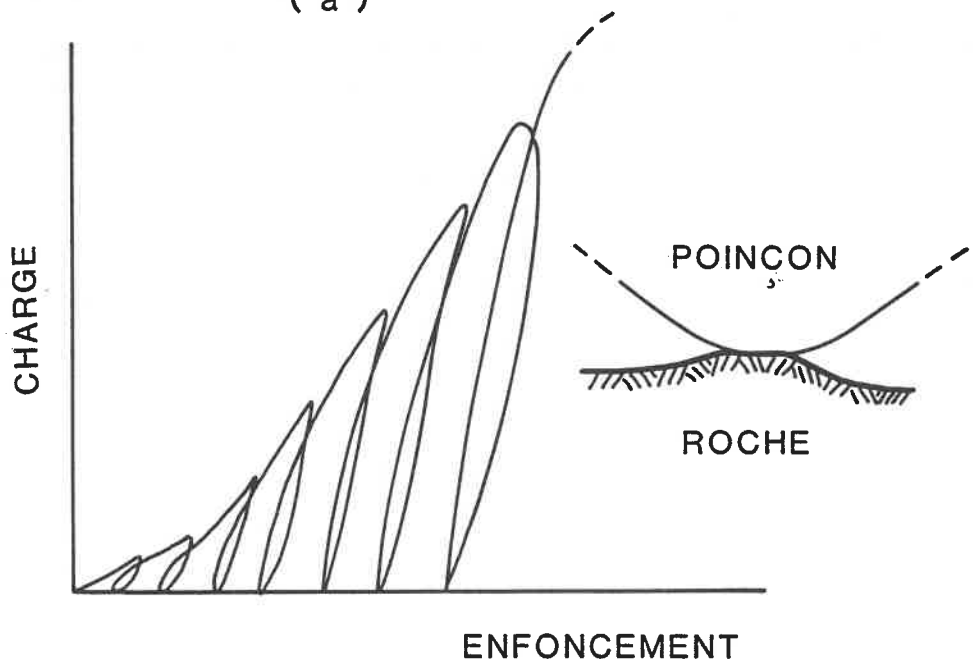


Figure 3.3: Courbe charge-enfoncement obtenue lorsque la charge appliquée au poinçon et l'enfoncement sont mesurés en continu.



(a)



(b)

Figure 3.4: Effets du contact exagérés pour fin d'illustration: (a) courbe charge-enfoncement obtenue lorsque la pointe du poinçon se trouve dans une dépression; (b) courbe charge-enfoncement obtenue lorsque la pointe du poinçon se trouve sur une protubérance.

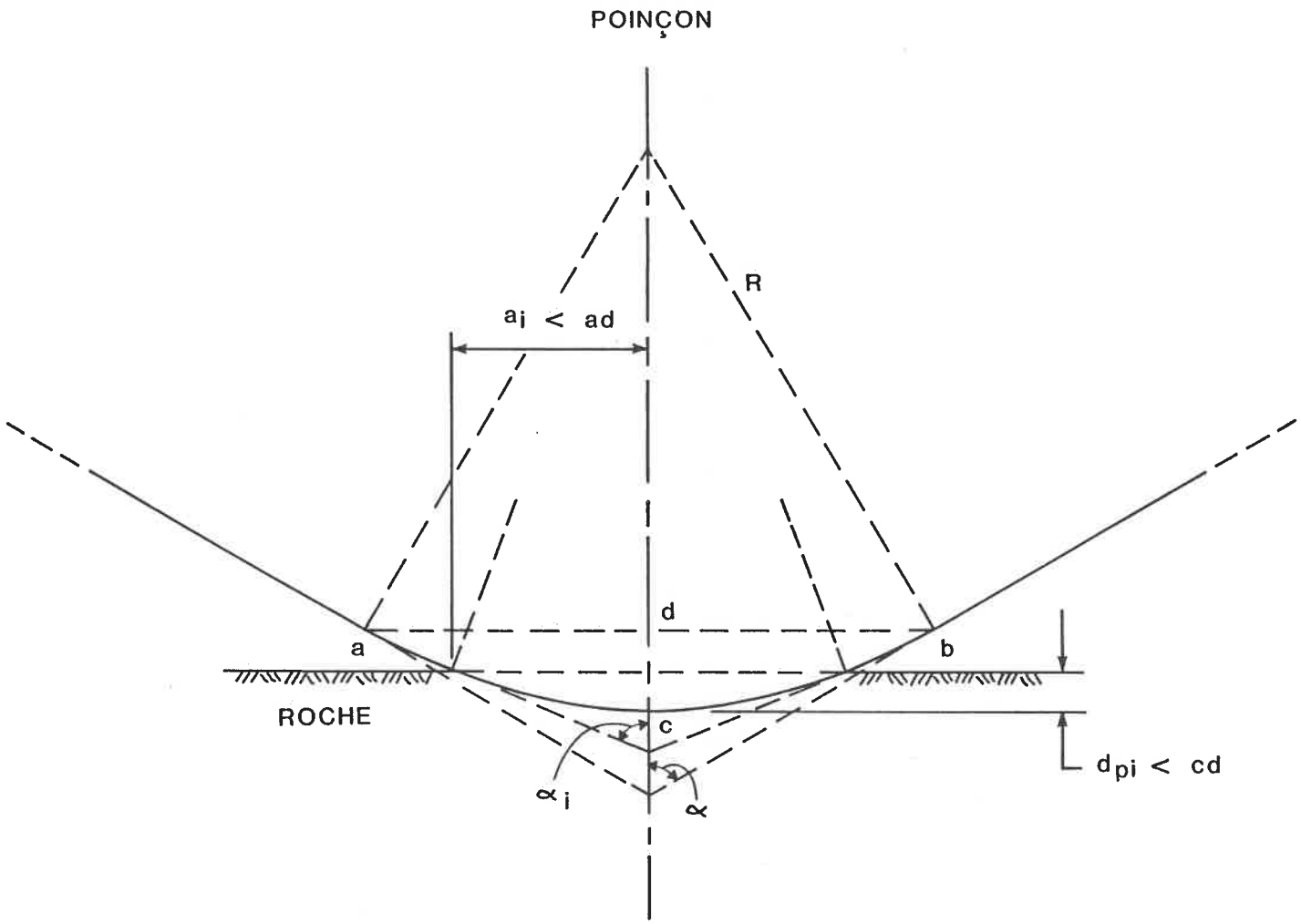


Figure 3.5a: Détermination du rayon de l'aire chargée projetée sur la surface poinçonnée dans le cas d'un poinçon sphérioconique; la pointe sphérique n'est pas entièrement enfoncée.

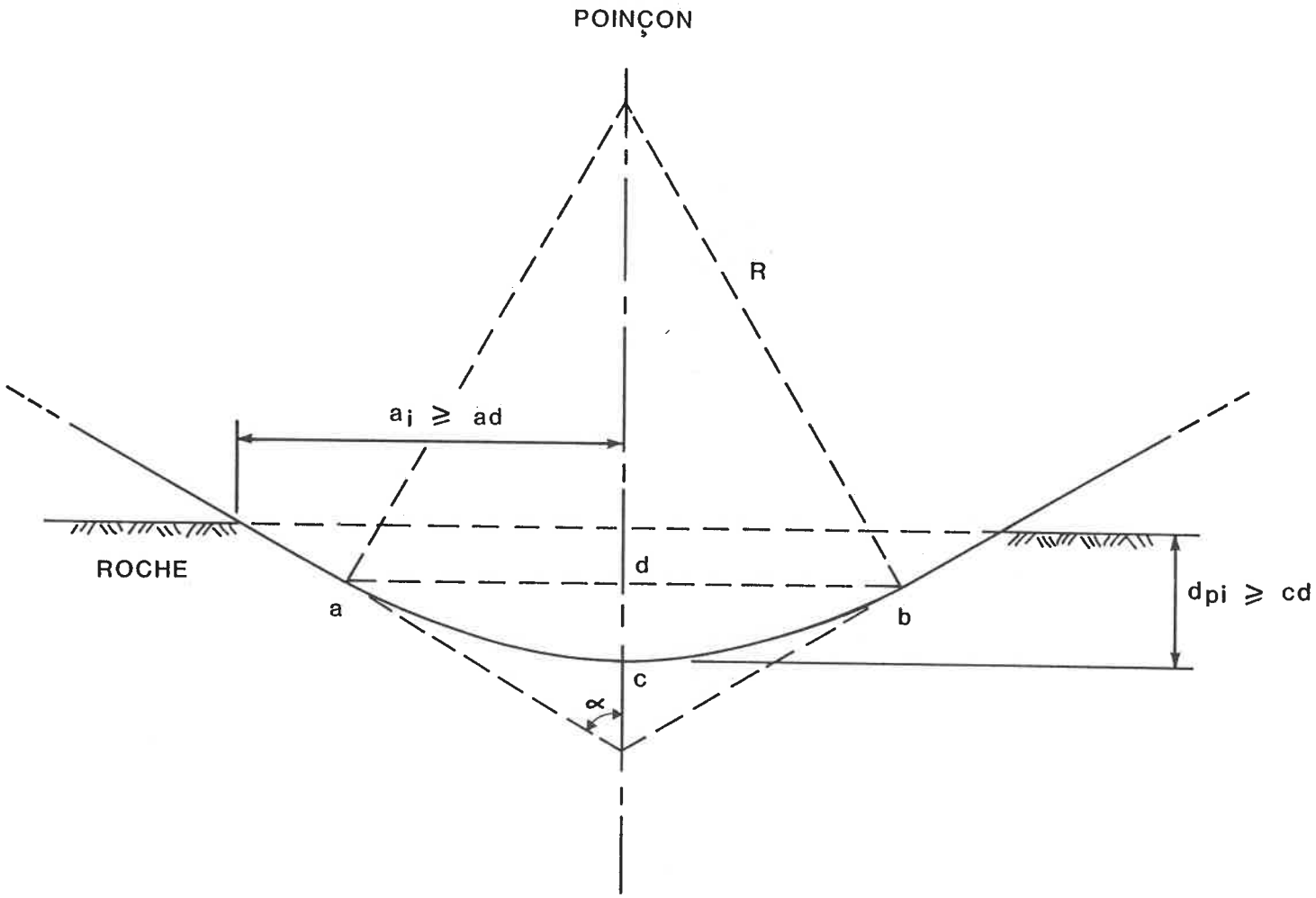


Figure 3.5b: Détermination du rayon de l'aire chargée projetée sur la surface poinçonnée dans le cas d'un poinçon sphério-conique; la pointe sphérique est entièrement enfoncée.

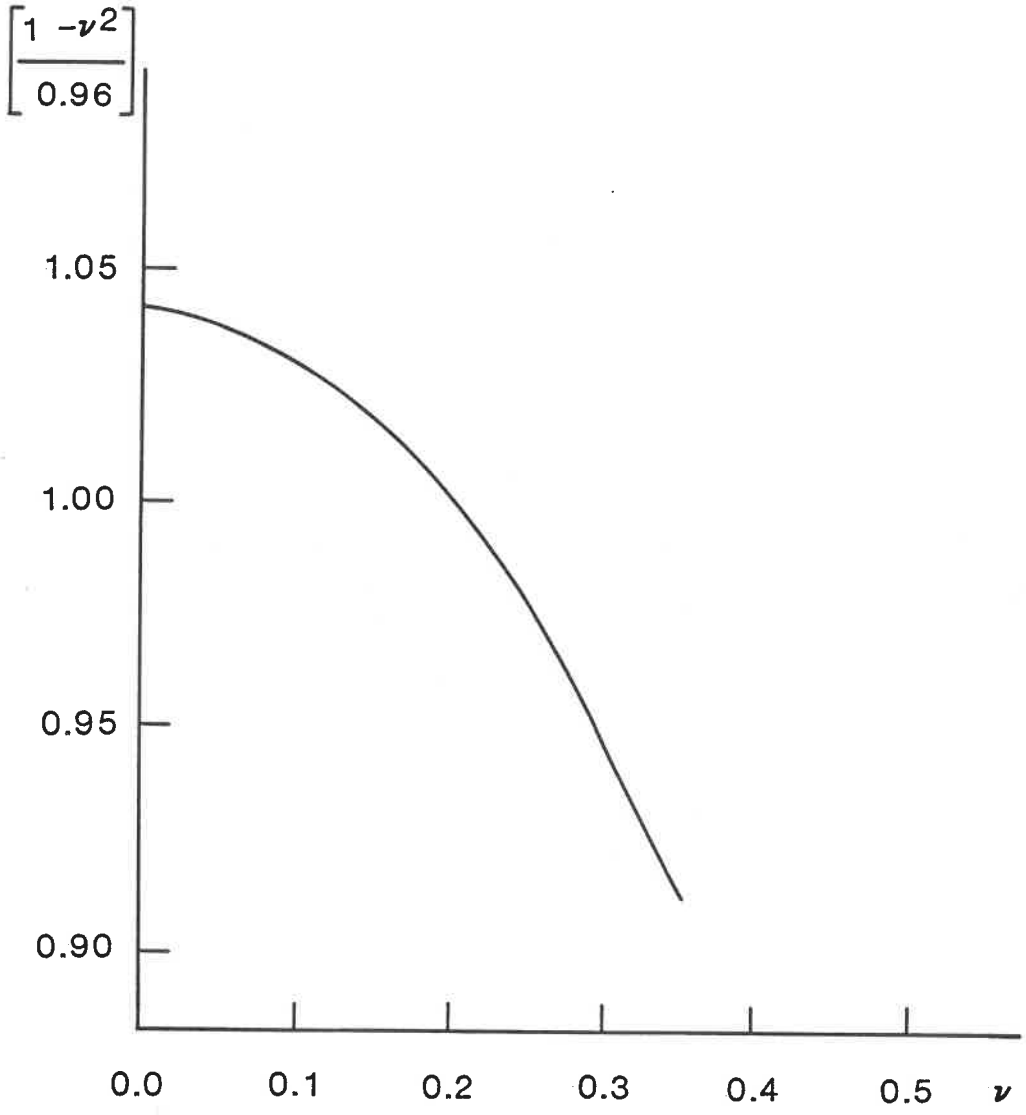


Figure 3.6: Effet de la valeur du coefficient de Poisson sur le calcul du module de Young suivant la méthodologie proposée lorsqu'elle diffère de 0.2.

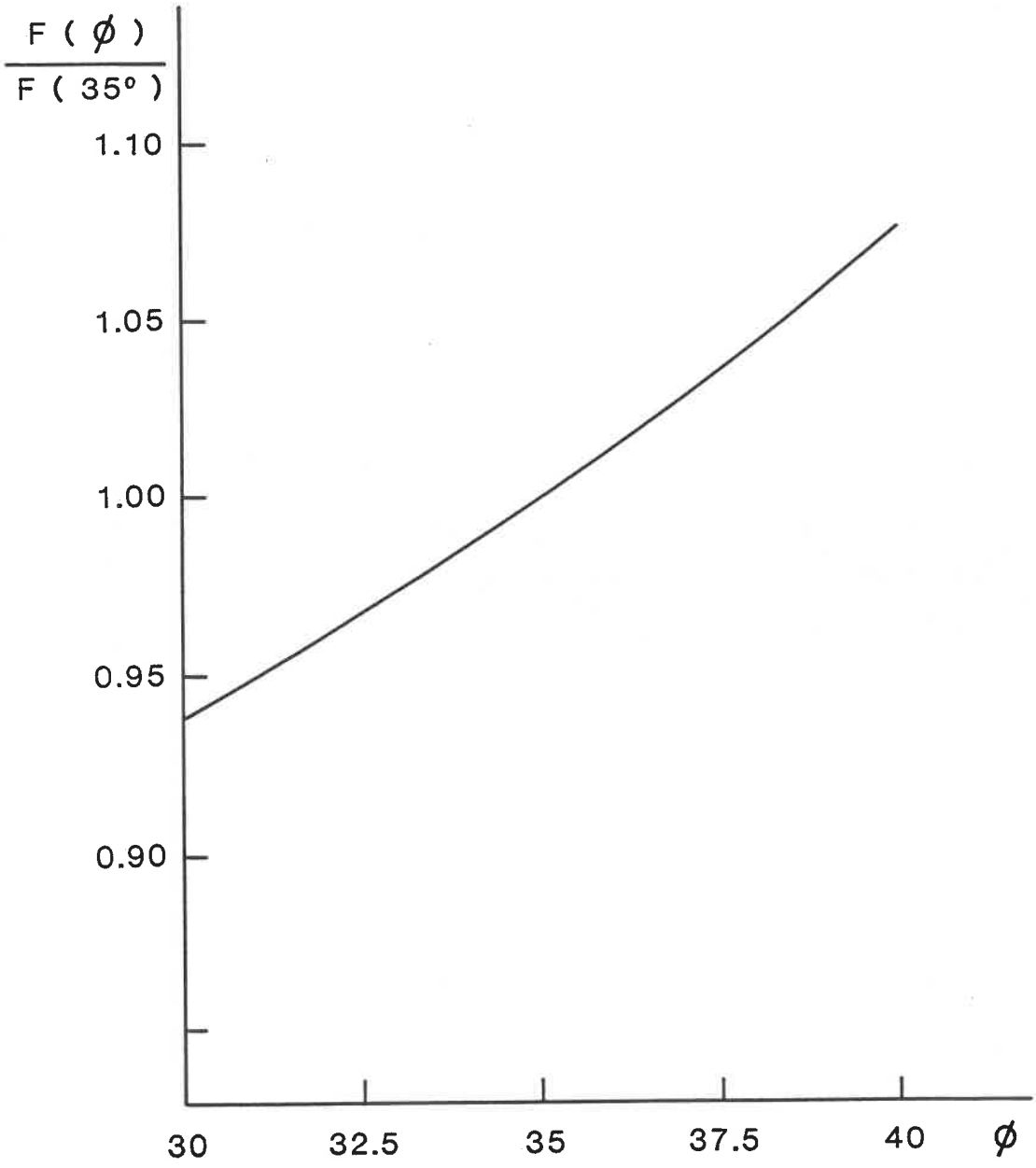


Figure 3.7: Effet de la valeur de l'angle de frottement interne sur le calcul de la résistance en compression uniaxiale suivant le méthodologie proposée lorsqu'elle diffère de 35°.

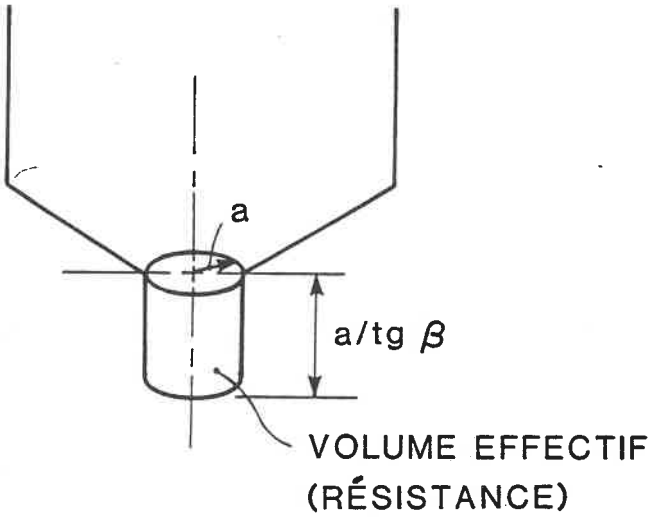


Figure 3.8: Définition du volume effectif pour la résistance en compression uniaxiale.

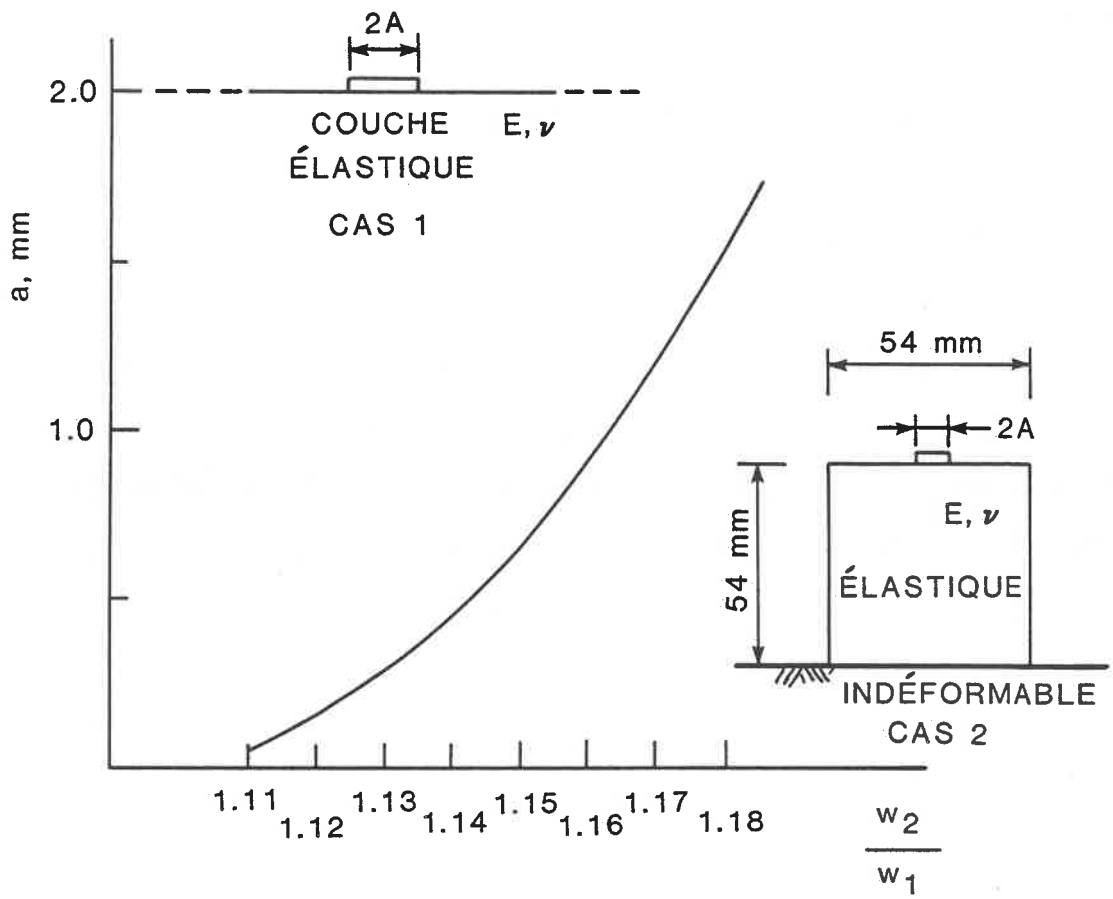


Figure B.1: Courbe de correction des enfoncements élastiques lorsque les essais de poinçonnement sont effectués en laboratoire suivant les normes édictées par Pichette (5); w_1 est le tassement dans le cas 1 et w_2 est le tassement dans le cas 2.

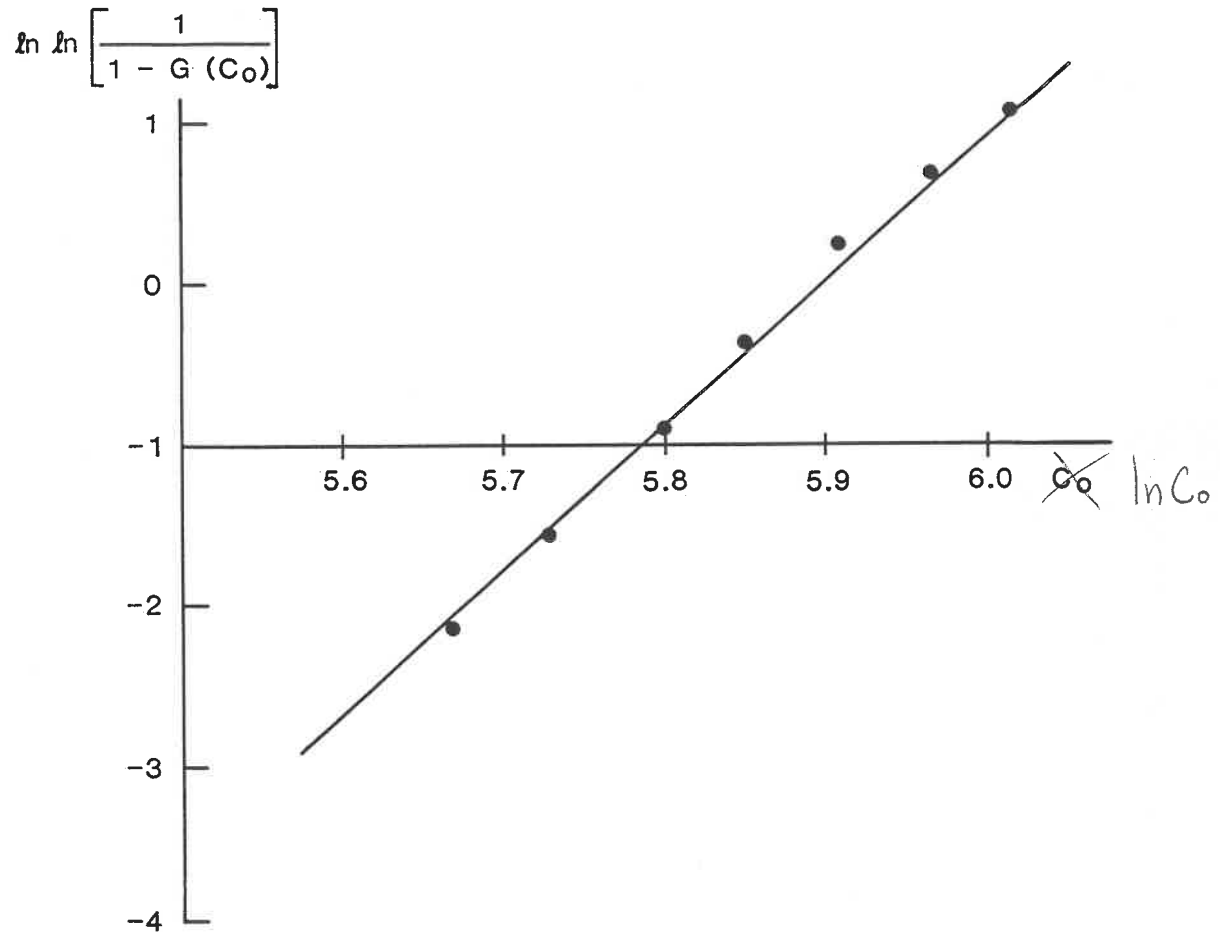


Figure C.1: Droite de régression de détermination du facteur d'échelle suivant la théorie des valeurs extrêmes pour la résistance en compression uniaxiale.

ANNEXE A

RÉSULTATS DES ESSAIS DE POINCONNEMENT

EN LABORATOIRE CONSIDÉRÉS DANS LE MÉMOIRE

TABLEAU A1

DONNÉES DES ESSAIS DE POINCONNEMENT - DERNIER CYCLE COMPLET AVANT LE PREMIER ÉCAILLAGE - CALCAIRE DE ST-MARC

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm
1.1	7117	0.6056	0.4928
1.2	6227	0.4826	0.3886
1.3	6227	0.4978	0.4115
1.4	5338	0.5399	0.4420
1.5	5338	0.4789	0.3708
1.6	6227	0.4358	0.3459
1.7	6227	0.6096	0.4877
1.8	6227	0.4953	0.3937
1.9	8006	0.6955	0.5842
1.10	3558	0.2870	0.2159
1.11	5338	0.4510	0.3734
1.12	5338	0.5450	0.4674

No: identification de l'éprouvette d'essai
P: charge atteinte lors du cycle de chargement
d_t: enfoncement total produit
d_p: enfoncement permanent produit

Diamètre des éprouvettes:
Hauteur des éprouvettes:

Les enfoncements totaux mesurés au cours des essais ont été corrigés pour la déformation du montage; le facteur de correction utilisé est 1.638×10^{-6} P (mm) où P est la charge appliquée.

TABLEAU A2

DONNÉES DES ESSAIS DE POINÇONNEMENT - DERNIER CYCLE COMPLET AVANT LE PREMIER ÉCAILLAGE - GRANITE DE BARRE

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm
2.1	7126	0.278	0.102
2.2	6413	0.228	0.117
2.3	5344	0.214	0.061
2.4	6770	0.276	0.102
2.5	5344	0.253	0.122
2.6	4899	0.188	0.046
2.7	4810	0.165	0.053
2.8	3385	0.125	0.028
2.9	12025	0.371	0.119
2.10	4988	0.238	0.086

No: identification de l'éprouvette d'essai
P: charge atteinte lors du cycle de chargement
d_t: enfoncement total produit
d_p: enfoncement permanent produit

Diamètre des éprouvettes: 54.1 mm
Hauteur des éprouvettes: 55.6 mm

Les enfoncements totaux mesurés au cours des essais ont été corrigés pour la déformation du montage; le facteur de correction utilisé est 1.638×10^{-6} P (mm) où P est la charge appliquée.

TABLEAU A3

DONNÉES DES ESSAIS DE POINÇONNEMENT - ENSEMBLE DES CYCLES - CALCAIRE DE ST-MARC

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm
3.1	890	0.0951	0.0610
	1779	0.1799	0.1346
	2669	0.2648	0.1981
	3558	0.3585	0.2667
	4448	0.4271	0.3353
	5338	0.4840	0.3886
	6227	0.5460	0.4369
	7117	0.6056	0.4928
3.2	890	0.0951	0.0787
	1779	0.1673	0.1245
	2669	0.2293	0.1803
	3558	0.3015	0.2438
	4448	0.3636	0.2896
	5338	0.4180	0.3404
	6227	0.4826	0.3886
3.3	890	0.0798	0.0559
	1779	0.1698	0.1321
	3558	0.3269	0.2591
	5338	0.4586	0.3810
	6227	0.4978	0.4115
3.4	980	0.1078	0.0787
	1779	0.1901	0.1448
	2669	0.3030	0.2464
	3558	0.3853	0.3150
	4448	0.4590	0.3708
	5338	0.5399	0.4420
3.5	890	0.0798	0.0533
	1779	0.1596	0.1118
	2669	0.2369	0.1803
	3558	0.3244	0.2489
	4448	0.4118	0.3099
	5338	0.4789	0.3708

Voir Tableau A1 pour la définition des symboles et autres remarques pertinentes.

TABLEAU A3

DONNÉES DES ESSAIS DE POINÇONNEMENT - ENSEMBLE DES CYCLES - CALCAIRE DE ST-MARC (suite)

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm
3.6	890	0.0900	0.0635
	1779	0.1622	0.1168
	3558	0.3040	0.2337
	4448	0.3712	0.2946
	5338	0.4358	0.3454
3.7	890	0.1874	0.0610
	1779	0.1723	0.1372
	2669	0.2598	0.1930
	3558	0.3650	0.2794
	4448	0.4652	0.3607
	5338	0.5348	0.4216
	6887	0.6096	0.4877
3.8	890	0.1027	0.0813
	1779	0.1825	0.1524
	2669	0.2471	0.1956
	3558	0.3117	0.2489
	4448	0.3763	0.2997
	5338	0.4358	0.3429
	6227	0.4953	0.3937
3.9	890	0.0798	0.0559
	1779	0.1673	0.1295
	2669	0.2928	0.2286
	3558	0.3726	0.3048
	4448	0.4601	0.3708
	5338	0.5196	0.4191
	6227	0.5765	0.4724
	7117	0.6360	0.5283
	8006	0.6955	0.5842
3.10	890	0.0747	0.0559
	1779	0.1444	0.1118
	2669	0.2141	0.1626
	3558	0.2870	0.2159

Voir Tableau A1 pour la définition des symboles et autres remarques pertinentes.

TABLEAU A3

DONNÉES DES ESSAIS DE POINÇONNEMENT - ENSEMBLE DES CYCLES - CALCAIRE DE ST-MARC (suite et fin)

No	P, N	d_t, mm	d_p, mm
3.11	890	0.0747	0.0584
	1779	0.2003	0.1626
	2669	0.2801	0.2286
	3558	0.3422	0.2769
	4448	0.3966	0.3277
	5338	0.4510	0.3734
3.12	890	0.0722	0.0533
	1779	0.1647	0.1219
	2669	0.2471	0.1981
	3558	0.3295	0.2769
	4448	0.4321	0.3607
	5338	0.5450	0.4674

Voir Tableau A1 pour la définition des symboles et autres remarques pertinentes.

ANNEXE B

EFFET DES DIMENSIONS FINIES DES ÉPROUVETTES SUR LES ENFONCEMENTS ÉLASTIQUES MESURÉS LORS D'ESSAIS DE POINÇONNEMENT EN LABORATOIRE

Afin de pouvoir utiliser les résultats d'essais de poinçonnement effectués au laboratoire pour tester la façon proposée de calculer le module de Young - équation (3.3.1a) - lors d'essais de poinçonnement in-situ, une série d'analyses de contraintes par éléments finis a été exécutée à l'aide du logiciel ELEFIN V.I développé au Laboratoire de mécanique des roches de l'École Polytechnique. Ces analyses ont été faites en déformation plane pour des bandes souples de longueur infinie chargées uniformément et les résultats obtenus ont permis de tracer la courbe de correction de la figure B.1. Le tassement w_1 se rapporte au cas 1 alors que le tassement w_2 se rapporte au cas 2.

Pour s'assurer que les analyses représentent adéquatement l'action d'un poinçon rigide, ce sont les tassements moyens qui ont été utilisés pour tracer la courbe; quant à la différence de forme entre le poinçon et les bandes des analyses, le facteur de forme qu'il faut utiliser se retrouve au numérateur et au dénominateur du rapport w_2/w_1 et se simplifie.

ANNEXE C

DÉTERMINATION DU FACTEUR D'ÉCHELLE

La théorie du maillon le plus faible ("weakest link theory") relie la dispersion des résultats d'essais de résistance mécanique à l'effet d'échelle (décroissance de la résistance avec la croissance des volumes des éprouvettes mises à l'essai). Si on accepte au départ que la fonction de densité de probabilité des résistances des cellules unitaires, dont le matériau est constitué, est du type Weibull, on pourrait démontrer (14) que la fonction de distribution de probabilité $G(C_o)$ est:

$$G(C_o) = 1 - \exp(\alpha C_o{}^{\beta}) \qquad (C.1)$$

où α et β sont les paramètres de la fonction et C_o, la résistance en compression uniaxiale. L'effet d'échelle s'exprime alors comme suit (14):

$$(C_o^*)_{V1} = (C_o^*)_{V2} \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{-n} \qquad (C.2)$$

où $(C_o^*)_{Vi}$ (i = 1 et 2) signifie résistance modale pour un volume V_i et n est la facteur d'échelle dont l'expression est:

$$n = 1/\beta \qquad (C.3)$$

Si la moyenne arithmétique, $\overline{C_o}$, coïncide avec le mode (distribution symétrique), C_o^* peut être remplacée par $\overline{C_o}$ dans l'équation (C.2).

L'obtention de β implique alors uniquement un jeu de valeurs C_o obtenues avec un volume donné distribué autour du mode C_o^*. L'équation (C.1) peut être réécrite et donner:

$$\exp(-\alpha C_o{}^{\beta}) = \frac{1}{1 - G(C_o)}$$

ou encore

$$\ln \ln \left\{ \frac{1}{1 - G(C_o)} \right\} = \ln \alpha + \beta \ln C_o \qquad (C.4)$$

Le paramètre β est alors la pente de la droite dont la variable dépendante est:

$$\ln \ln \left\{ \frac{1}{1 - G(C_o)} \right\}$$

et la variable indépendante est $\ln (C_o)$. Le terme $\ln \alpha$ est l'ordonnée à l'origine.

La figure C.1 montre la droite obtenue en soumettant les valeurs de résistance calculée conformément à la méthodologie proposée dans le présent mémoire et dont les moyennes par essais constituent le tableau 4.3. La pente de la droite est 0.11; c'est le facteur d'échelle cherché.

Le tableau C.1 présente les résultats individuels (par cycle, par essai) alors que le tableau C.2 est l'histogramme ayant conduit à la détermination des $G(C_o)$.

TABLEAU C1

RÉSISTANCE EN COMPRESSION UNIAXIALE OBTENUES DES ESSAIS DE POINÇONNEMENT - CALCAIRE DE ST-MARC

Éprouvette	Cycle	C_o, MPa
3.1	1	361.4
	2	332.6
	3	343.7
	4	345.6
	5	348.7
	6	361.5
	7	372.7
	8	372.5
3.2	1	280.9
	2	398.6
	3	376.1
	4	376.1
	5	399.9
	6	412.5
	7	421.8
3.3	1	393.9
	2	332.6
	3	412.9
	4	379.1
	5	392.3
3.4	1	280.9
	2	309.9
	3	279.3
	4	305.0
	5	316.0
	6	315.5
3.5	1	412.4
	2	398.6
	3	376.1
	4	368.8
	5	375.4
	6	368.9
3.6	1	347.2
	2	381.7
	3	399.8
	4	393.5
	5	406.6

Éprouvette	Cycle	C_o, MPa
3.7	1	316.4
	2	326.6
	3	352.3
	4	330.8
	5	324.8
	6	331.9
	7	325.9
3.8	1	272.3
	2	294.9
	3	347.9
	4	368.8
	5	387.2
	6	409.5
	7	416.2
3.9	1	393.9
	2	345.2
	3	299.9
	4	305.0
	5	315.9
	6	334.1
	7	341.9
	8	343.5
	9	342.4
3.10	1	393.9
	2	398.6
	3	415.6
	4	422.1
3.11	1	377.0
	2	277.1
	3	299.9
	4	333.7
	5	356.4
	6	376.6
3.12	1	412.4
	2	366.2
	3	343.7
	4	333.7
	5	324.8

TABLEAU C2

HISTOGRAMME DES RÉSISTANCES EN COMPRESSION
UNIAXIALE DU TABLEAU C1

Classe	Fréq.	Fréq. cumul.	$G(C_o)$	C_o, MPa
260				
	2	2	0.0267	270
280				
	6	8	0.1067	290
300				
	7	14	0.1867	310
320				
	11	25	0.3333	330
340				
	13	38	0.5067	350
360				
	16	54	0.7200	370
380				
	11	65	0.8667	390
400				
	8	73	0.9733	410
420				
	2	75		
440				

ANNEXE D

RÉSULTATS DES ESSAIS CONVENTIONNELS NORMALISÉS SUR LE CALCAIRE DE ST-MARC

TABLEAU D1

RÉSULTATS D'ESSAIS DE COMPRESSION UNIAXIALE (5)
DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE

Numéro d'éprouvette	Diamètre po	Longueur po	Charge lb	Résistance psi
1	2.105	4.283	48 000	13 793
5*	2.100	4.288	42 400	12 242
7	2.110	4.116	44 700	12 784
15*	2.105	3.998	41 050	11 796
23	2.100	4.300	44 100	12 732
29*	2.097	4.109	43 050	12 465
30	2.114	4.162	46 600	13 277
F*	2.097	4.281	51 500	14 911
L	2.130	4.313	54 000	15 546
N	2.105	4.297	52 800	15 172
R*	2.104	4.298	48 000	13 806
V	2.100	4.287	38 400	11 087
W*	2.099	4.281	45 750	13 221
Z	2.100	4.295	47 450	13 700
Résistance moyenne				13 324
Écart type				1 282
Coefficient de variation				9.62%

* Éprouvette ayant servi à l'obtention du module de Young

TABLEAU D2

RÉSULTATS D'ESSAIS DE COMPRESSION UNIAXIALE (5)
DÉTERMINATION DU MODULE DE YOUNG

Contrainte psi	Déformation longitudinale (μpo/po)					
	R*	F	W	29	15	5
0	0	0	0	0	0	0
1 155	165	143	190	180	177	187
2 310	303	271	340	330	330	347
3 465	465	398	478	482	478	485
4 619	563	521	602	622	613	618
5 774	713	641	730	775	748	757
6 929	848	767	857	917	887	902
8 084	987	888	985	1057	1043	1035
9 239	1117	1022	1123	1232	1207	1192
10 394	1263	1158	1282	1435	1408	
11 549	1425	1312	1485			
12 704	1642	1497	1733			
13 858		1453				

Module**: 8.02×10^6 psi pour R
8.58×10^6 psi pour F
7.79×10^6 psi pour W
7.42×10^6 psi pour 29
7.57×10^6 psi pour 15
7.64×10^6 psi pour 5

Module moyen: 7.84×10^6 psi

Écart type: 0.42×10^6 psi

Coefficient de variation: 5.35%

* Numéro d'éprouvette; voir tableau D1 pour dimensions

** Obtenu par régression linéaire avec passage forcé par l'origine des axes du diagramme contrainte-déformation

ANNEXE E

RÉSULTATS DES ESSAIS CONVENTIONNELS NORMALISÉS SUR LE GRANITE DE BARRE

TABLEAU E1

RÉSULTATS D'ESSAIS DE COMPRESSION UNIAXIALE (13)
DÉTERMINATION DU MODULE DE YOUNG

Contrainte psi	Déformation longitudinale (μpo/po)		Contrainte psi	Déformation longitudinale (μpo/po)	
	C*	B		A*	
0	0	0	0	0	
578	220	178	682	148	
1 156	410	345	1 364	301	
1 734	598	498	2 046	438	
2 312	730	623	2 728	561	
2 890	882	772	3 410	676	
4 046	1123	952	4 093	790	
5 202	1336	1135	4 715	897	
6 358	1528	1309	5 457	1004	
7 514	1706	1480	6 139	1105	
8 626	1874	1653	6 821	1210	
9 826	2057	1827	7 503	1307	
10 982	2236	1996	8 185	1412	
			8 867	1508	
			9 549	1615	
			10 231	1712	

Module tangent**: 6.54×10^6 psi pour C
6.71×10^6 psi pour B
6.71×10^6 psi pour A

Module moyen: 6.65×10^6 psi

* Numéro d'éprouvette; dimensions standards

** Obtenu par régression linéaire en ignorant le début non linéaire de la courbe contrainte-déformation

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00243342 1