

## **INFORMATION TO USERS**

**This manuscript has been reproduced from the microfilm master. UMI films the text directly from the original or copy submitted. Thus, some thesis and dissertation copies are in typewriter face, while others may be from any type of computer printer.**

**The quality of this reproduction is dependent upon the quality of the copy submitted. Broken or indistinct print, colored or poor quality illustrations and photographs, print bleedthrough, substandard margins, and improper alignment can adversely affect reproduction.**

**In the unlikely event that the author did not send UMI a complete manuscript and there are missing pages, these will be noted. Also, if unauthorized copyright material had to be removed, a note will indicate the deletion.**

**Oversize materials (e.g., maps, drawings, charts) are reproduced by sectioning the original, beginning at the upper left-hand corner and continuing from left to right in equal sections with small overlaps.**

**ProQuest Information and Learning  
300 North Zeeb Road, Ann Arbor, MI 48106-1346 USA  
800-521-0600**

**UMI<sup>®</sup>**



**DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES MÉCANIQUES DES REMBLAIS  
MINIERS FAITS DE RÉSIDUS CIMENTÉS**

Par

**Stéphane Servant**

Département de Génie des Mines, Métaux et Matériaux  
Université McGill.  
Montréal, (Québec), Canada  
Septembre 2001

Thèse soumise à la Faculté des Études Supérieures et de la Recherche  
comme condition partielle à l'obtention du diplôme de maîtrise

© *Stéphane SERVANT, 2001*



**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.**

0-612-75283-6

**Canada**

## **Sommaire**

Une campagne de terrain a été réalisée avec comme objectif la démonstration de l'applicabilité de l'essai pressiométrique auto-foreur dans les remblais miniers faits de résidus cimentés. Cette technique d'auscultation des remblais répond au besoin de tester le matériau dans les conditions en place. En effet, l'expérience montre que les essais en laboratoire ne permettent pas de reproduire les conditions thermodynamiques et mécaniques que subit le remblai in situ. De plus, les techniques d'auscultation existantes, le carottage notamment, sont trop souvent d'une efficacité mitigée.

Ce mémoire vise à compiler les réflexions ayant entouré la sélection de l'instrument et des considérations pris en compte à la mise en oeuvre de l'essai pressiométrique hors du contexte usuel du génie civil. Un traitement préliminaire des courbes expérimentales permet d'ores et déjà de confirmer le choix de l'instrument et les moyens engagés pour réaliser le plein potentiel de la technique, à savoir la caractérisation du remblai et des conditions in situ. Des recommandations sont suggérées dans l'éventualité d'un déploiement similaire futur, afin d'améliorer l'obtention des résultats, améliorer les analyses, augmenter l'efficacité de la technique.

## **Abstract**

A field trial was conducted to demonstrate the applicability of a self-boring pressuremeter probe for in situ testing of cemented paste backfill. This technology proved to be efficient in evaluating behaviour of in situ conditions of mine backfill underground. Effectively, laboratory experience shows that it is not possible to insure that all physical and mechanical conditions prevailing underground are respected when samples are prepared and tested in the lab. Moreover, sampling by coring backfill underground proved to be sometimes not very efficient and the question of sample disturbance is a major concern.

This thesis aims at presenting the considerations leading to the probe selection and the technical aspects related to conducting pressuremeter tests in an underground mine. A preliminary analysis of the experimental pressuremeter curves is presented with the derived in situ properties obtained from a paste backfill in a Canadian mine. It is shown that the selected instrument fulfilled the main objective of the project, which was the in situ characterization of a paste backfill. Recommendations are given for future applications of this testing technique for mine backfill and improve the efficiency of the work underground. Also, recommendations are given to improve test analysis and consequently the quality of the results obtained with the self-boring pressuremeter technique.

## **Remerciements**

Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de recherche, M. Jacques Ouellet, sans qui ce travail n'aurait pu être complété.

Mes remerciements vont aussi à mon co-directeur, M. Hani Mitri, pour m'avoir donné l'opportunité de m'engager sur la voie de cette maîtrise.

Une pensée toute spéciale pour M. F. Hassani, pour sa gentillesse et son soutien.

A mes collègues pour leur patience.

Enfin, je tiens à souligner le support financier du CSRNG et de l'Institut de Recherche en Santé et Sécurité au Travail.

# Tables des matières

<b>Sommaire</b>	i
<b>Abstract</b>	ii
<b>Remerciements</b>	iii
<b>Liste des figures</b>	vi
<b>Liste des tableaux</b>	viii
<b>Chapitre 1 : Introduction</b>	1
1.1. Contexte du présent mémoire	1
1.2. Objectifs du mémoire	4
1.3. Organisation du mémoire	5
<b>Chapitre 2 : Revue de la littérature sur l'essai pressiométrique</b>	7
2.1. Introduction	7
2.2. Généralités	7
2.3. Incidence de l'insertion sur la courbe pressiométrique	9
2.4. Autres facteurs d'influence sur la réponse pressiométrique	13
2.5. Interprétation	14
2.6. Conclusion	16
<b>Chapitre 3 : Incidence des propriétés mécaniques du remblai cimenté sur la réalisation de l'essai pressiométrique</b>	20
3.1. Préambule	20
3.2. Propriétés mécaniques d'un remblai cimenté type	21
3.3. Échantillonnage in situ: effet du remaniement	24
3.4. Un essai in situ, l'essai pressiométrique	27

<b>Chapitre 4 : Mise en oeuvre de l'essai pressiométrique dans deux chantiers remblayés</b>	<b>33</b>
4.1. Préambule	33
4.2. Sélection des équipements	34
4.2.1. La sonde	34
4.2.2. Les équipements connexes	35
4.3. Les sites d'essais	36
4.4. Le programme d'essais	37
4.5. Analyse des résultats	38
<b>Chapitre 5 : Conclusion</b>	<b>46</b>
5.1. Sommaire	46
5.2. Recommandations	47
<b>Références.</b>	<b>49</b>

## Liste des figures

- Figure 2.1: Mise en place dans un trou pré-foré d'une sonde mono-cellulaire ou tricellulaire (tiré de Clarke, 1995). 17
- Figure 2.2: Séquence d'avancement de plusieurs essais pressiométriques avec des tubes à parois minces : a) les tubes suivent l'avancement d'un échantillonneur; b) la cavité initiale est créée; c) la sonde est descendue; d) l'expansion est réalisée; e) reprise de la séquence a) à d). (tiré de Clarke, 1995). 18
- Figure 2.3: Courbes pressiométriques typiques pour des essais au PIP, PBP et SBP. 19
- Figure 3.1: Courbe (triaxiale) de contrainte-déformation type d'un remblai en pâte à 6,5% ciment et 3 jours de curage (Ouellet et al., 1998b). 30
- Figure 3.2 : Un critère de rupture proposé pour le remblai en pâte (Ouellet, 1995). 31
- Figure 3.3. Courbes expérimentales au cône-pressiomètre, Mine Lac Matagami (Scoble et al., 1986). 32

<b>Figure 4.1: Schéma du Camkometer (tiré de Windle &amp; Wroth, 1977).</b>	<b>40</b>
<b>Figure 4.2: Disposition des équipements et fixation du cadre de chargement contre le mur de la galerie.</b>	<b>41</b>
<b>Figure 4.3: Courbe pressiométrique typique obtenue (Ouellet et Servant, 2000).</b>	<b>42</b>
<b>Figure 4.4: Pression intersticielle mesurée durant des essais pressiométriques à trois profondeurs différentes. (Ouellet et Servant, 2000).</b>	<b>42</b>
<b>Figure 4.5: Résistance non-drainé (G &amp; A) du remblai en pâte selon la profondeur (Ouellet et Servant, 2000).</b>	<b>43</b>
<b>Figure 4.6: Contrainte horizontale (Marsland &amp; Randolph) selon la profondeur (Ouellet et Servant, 2000).</b>	<b>43</b>
<b>Figure 4.7: Module de cisaillement moyen G selon la profondeur (deux cycles de déchargement-rechargement) (Ouellet et Servant, 2000).</b>	<b>44</b>

## Liste des tableaux

Tableau 4.1. Description des conditions d'essai.	45
--	----

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1. Contexte du présent mémoire

Le remblayage minier est largement répandu dans les opérations minières souterraines de par le monde. Le remblai consiste la plus part du temps en un matériau de nature granulaire (par opposition au remblai d'eau glacée) d'origine naturelle (gangue du minerai traité, sable, ou roche) ou artificielle (scories des hauts-fourneaux par exemple). À ceux-ci s'ajoutent très souvent des agents liants qui contribuent à améliorer avant tout les propriétés mécaniques selon les fins recherchées.

Le liant utilisé pour favoriser la tenue du remblai pourra s'avérer être du ciment portland, de la cendre volante, des scories (réduites en poudre par broyage) aux propriétés pouzzolanes, des pouzzolanes d'origine naturelle, ou d'autres liants comme la chaux ou la calcite qui réagissent chimiquement avec le matériau à consolider.

Ainsi le remblayage des ouvertures minées contribuera à la stabilité des terrains adjacents par le maintien des épontes, servira de plancher de travail et de surface de roulage pour diverses machineries, ou de toit. Il favorisera la stabilité globale à l'échelle de l'opération en regard du problème qu'engendre les pressions de terrains, tels la convergence des ouvertures et les coups de toit.

Les remblais sont classés selon leur mode de mise en place, de leurs caractéristiques physiques et de leurs propriétés mécaniques. On distinguera ainsi les remblais en pâte, hydraulique, à haute densité, à granulats, ou rocheux. Les quatre premiers sont mis en place par l'entremise de conduites hydrauliques et sont acheminés par

pompage ou par gravité. Le remblai en pâte peut aussi être disposé par convoyeur ou par des véhicules tels des navettes chargeuses ou des camions, des modes de manutention typiques au remblai rocheux dont la granulométrie trop grossière impose ces contraintes spécifiques à l'acheminement. La classification proposée par Hassani et Archibald (1998) est ici adoptée. Les remblais qui sont mis en place par conduites hydrauliques et dont le mode d'écoulement se fait en régime turbulent sont regroupés sous le vocable de remblais de pulpe ("slurry backfill"). Le remblai en pâte dont le régime d'écoulement est analogue à un fluide de Bingham, constitue une classe en soi. Le remblai en pâte peut accommoder des granulats assez grossiers. La dernière classe est représentée par le remblai rocheux.

De façon générale, le premier rôle du remblayage minier est de permettre un meilleur contrôle des problèmes de terrain. Il consiste aussi à une opération combinée de disposition des résidus miniers ou des stériles (souvent jugés indésirables d'un point de vue environnemental par leur stockage et/ou leur potentiel polluant en surface). Malgré cela, il n'en demeure pas moins que l'opération de remblayage dépasse largement la simple question de gestion environnementale.

Les usages des remblais sont variés, ils ont été succinctement énumérés en tout premier lieu. Les questions concernant la tenue d'une face libre d'un remblai, c'est-à-dire sa capacité à s'autoporter, ne sont pas sans manquer d'intérêt. La rupture même partielle d'une portion de la masse de remblai résulte couramment en une dilution puisqu'il se mélange avec le minerai abattu, une situation qui n'est pas souhaitable. Un remblai ayant une faible capacité à supporter les épontes contribuera également à produire de la dilution, cette fois par du stérile rocheux mal supporté. D'autres considérations peuvent également être mentionnées: la poussée exercée sur une barricade par le remblai confiné dans un chantier par cet élément de retenue (Ouellet, 2001); le cycle de minage affecté par le choix d'une technique de remblayage; les coûts de pompage associés aux eaux d'essorage le cas échéant. Les remblais mis en place hydrauliquement (pulpe et en pâte) posent aussi le problème du potentiel de liquéfaction et de la formation de renard (Bloss et Chen,

1998). Cela est imputable à la présence importante d'eau nécessaire à l'acheminement de remblai par les conduites vers les chantiers, et dépend de la capacité des remblais en place à se drainer. Ces conditions imposent une attention supplémentaire à la mise en service de barricades par des moyens efficaces de drainage des eaux d'essorage (Ouellet et Servant, 1998; Ouellet, 2001).

Pourquoi étudier les remblais, pourquoi les caractériser? Indéniablement, le remblayage n'est pas une opération à qualifier de simple ou de triviale de par les conséquences et restrictions qu'il implique. Comme en font foi plus d'un ouvrage de synthèse (Thomas et al., 1979; Hassani et Archibald, 1998), conférences orientées sur l'utilisation des remblais miniers depuis les 30 dernières (dont la 7th Conf. on Mining with Backfill, prévue en 2001 à Seattle, États-Unis d'Amérique), et autres publications scientifiques, l'intérêt du sujet en reflète encore toute sa complexité. Il est apparu très tôt nécessaire de les caractériser et de développer des méthodes appropriées pour y arriver. En contrôle de terrain, on s'intéressera tantôt au comportement du massif au pourtour de l'excavation remblayée (convergence, contraintes naturelles et induites, séismicité), tantôt aux charges supportées par ce même remblai et sa réponse vis-à-vis celles-ci. Une connaissance dissociée ou incomplète du comportement de l'un par rapport à l'autre ne permettrait qu'une interprétation partielle de l'interaction remblai - massif rocheux.

Avec des outils de modélisation numérique de plus en plus accessibles, une meilleure caractérisation du comportement respectif du remblai et du massif rocheux permettrait de confirmer et renforcer, qualitativement bien sûr, mais surtout quantitativement les appréciations trop souvent empiriques du support effectif des remblais ainsi que leur comportement en service.

La caractérisation des remblais miniers est une problématique qui fait l'objet d'un consensus certain. D'une part, la préparation de cylindres de contrôle (à partir de l'usine de remblai) à tester en laboratoire permet difficilement de reproduire les conditions thermodynamiques (curage, altération) en place. Ouellet et al. (1998a)

fournissent à cet effet un exemple de disparité existant entre les résistances mécaniques sur des cylindres de contrôle et sur des échantillons in situ testés en laboratoire. D'autre part, le remaniement durant l'échantillonnage in situ comme technique d'auscultation pour les remblais cimentés, ainsi que la simulation en laboratoire des conditions de terrains (pressions des terres, succion matricielle) comportent des difficultés. Ces difficultés ne sont cependant pas spécifiques aux remblais puisque fréquemment soulevées pour d'autres géomatériaux. Dans ce contexte, il est aisé de comprendre pourquoi une technique efficace d'auscultation in situ a été si ardemment défendue (Thomas, 1979; Scoble et al., 1986; Archibald et al., 1993).

On s'intéressera dans ce mémoire à l'utilisation de l'essai pressiométrique comme outil de caractérisation d'un remblai. Compte tenu de la nature même de l'instrument dont la fonction première est l'investigation des sols dans le contexte plus usuel du génie civil, on s'intéressera plus particulièrement à son usage dans les remblais de résidus cimentés ou en pâte sans granulats grossiers. La granulométrie relativement fine des résidus miniers, comparable à des silts naturels ou à des sables fins, en fait un matériau propice à la réalisation de l'essai pressiométrique. Un remblai contenant des granulats grossiers amoindrirait incidemment les succès escomptés de l'essai. Cet aspect fera l'objet d'une certaine attention dans ce mémoire.

## **1.2. Objectifs du mémoire**

L'objectif de ce mémoire est de présenter la démarche qui a mené à la sélection des équipements requis à une mise en œuvre réussie de l'essai pressiométrique dans le cadre d'une campagne de terrain dans une mine canadienne. Par extension, l'applicabilité de l'essai pressiométrique comme technique d'investigation in situ des remblais miniers faits de résidus cimentés est démontré. Ainsi, l'applicabilité de la technique a été rendu possible grâce à un regard neuf sur la nature du matériau à

tester, à une analyse des tentatives similaires passées, et aux efforts consentis à la mise en œuvre.

Une phase d'expérimentation sur le terrain préalable à une expérimentation au laboratoire repose ici sur deux considérations. Les matériaux déposés en chantier remblayé présentent une variabilité spatiale importante vis-à-vis leurs propriétés mécaniques et physiques. Cette variabilité permet d'expliquer en partie les succès mitigés des techniques d'auscultation in situ passées. Aussi, la production en laboratoire d'un matériau correspondant aux conditions réelles en chantier est difficile. Dans ce contexte, une phase d'expérimentation au laboratoire du pressiomètre auto-foreur n'aurait pas été garante d'un succès éventuel sur le terrain.

À titre indicatif, les paramètres mécaniques tirés des courbes expérimentales seront déduits à partir d'un ensemble d'analyse. Cet exercice viendra supporter tout le potentiel lié à l'auscultation des remblais de résidus miniers cimentés par l'essai pressiométrique auto-foreur. En outre, la mesure des pressions de terrains rencontrées en chantier sera précisée. La mesure des pressions de terrains pour un remblai sollicité apparaît comme une donnée primordiale dans le contexte d'une opération souterraine.

Puisque l'issue de cette campagne devait être la démonstration de l'applicabilité de l'essai pressiométrique dans un tel matériau, il paraissait donc opportun de préciser les conditions à réunir pour qu'une telle campagne d'essais puisse permettre l'obtention d'un maximum de renseignements sur le matériau testé. C'est le fils conducteur du présent mémoire. L'environnement souterrain hostile à la réalisation efficace et ordonnée de l'essai pressiométrique conçu dans le contexte du génie civil justifierait ici cette compilation. Plusieurs balises seront énoncées tout au long du mémoire. Celles-ci seront laissées pour le bénéfice de ceux et celles qui voudront répéter l'expérience.

### **1.3. Organisation du mémoire**

Une attention sera faite dans le mémoire pour présenter le bien fondé d'une campagne au pressiomètre auto-foreur dans le contexte minier. Tout au long de celui-ci, le lecteur sera mené graduellement à assimiler la réflexion qui a entouré la sélection de cet instrument comme outil d'investigation.

Le chapitre deux sera consacré aux principes de la réalisation de l'essai, aux facteurs qui affectent l'allure de la courbe expérimentale, des éléments à considérer pour la mise en place optimale de la sonde, du traitement de la courbe pressiométrique pour en dégager les paramètres de design utiles en géotechnique.

Pour le type de matériau ausculté, le chapitre trois sera l'occasion d'une brève justification des essais in situ vis-à-vis ceux du laboratoire. Ce chapitre traitera de la réponse contrainte-déformation attendue du matériau à tester et de l'incidence de cette réponse vis-à-vis la réalisation de l'essai pressiométrique. Des essais in situ similaires ou d'autres techniques utilisées dans des matériaux comparables seront mis à contribution pour appuyer la sélection de l'instrument.

Le chapitre quatre fera donc l'objet d'une description de la sélection des équipements, des moyens logistiques impliqués pour assurer une insertion appropriée de la sonde dans le milieu, des paramètres de mise en oeuvre, et d'une interprétation sommaire des résultats. Ce dernier point permettra de confirmer tout le potentiel de la technique.

Le chapitre cinq finalise le présent mémoire. Il consistera en une discussion et en une liste de recommandations. Elles seront utiles pour la poursuite de travaux futurs.

## Chapitre 2

### Revue de la littérature sur l'essai pressiométrique

#### 2.1. Introduction

Ce chapitre se veut une base de travail pour les chapitres à venir. Tout en étant un bref survol de la littérature sur l'essai pressiométrique, le sujet est traité de manière à exposer les considérations qui entrent en jeu dans la réalisation de l'essai. Une certaine emphase est donnée sur la mise en place de la sonde. Cet aspect particulier permettra de cadrer le choix subséquent des équipements.

#### 2.2. Généralités

L'essai pressiométrique est un essai de cisaillement *in situ* appliqué à la paroi d'un trou de forage à partir de l'expansion radiale d'une sonde cylindrique.

Plusieurs instruments ont vu le jour au fil des ans. Bien que techniquement très différentes par leur conception, leur méthode d'insertion, leur système de mesure des déplacements et leur mode de chargement, toutes les sondes opèrent sur le même principe, soit l'expansion d'une cavité cylindrique (les pressiomètres à haute capacité pour les sols raides ou les roches tendres sont parfois appelés *dilatomètres*, le principe d'opération et les conditions aux frontières demeurent les mêmes, seul le contexte d'utilisation change).

La sonde consiste en une membrane plus ou moins flexible de caoutchouc, d'adiprène, ou de néoprène montée autour d'un corps rigide formant l'axe central de l'instrument. Par l'injection d'un fluide (eau, huile ou gaz) entre le corps central et la

membrane, le gonflement se produit. L'arrivée du fluide se fait généralement par une tubulure venant de la surface où les contrôles (manuels ou asservis) se trouvent pour la mise en œuvre de l'essai. La courbe de réaction du sol au pourtour de la sonde en expansion est établie par la mesure de la pression et de la variation dimensionnelle de la cavité sous l'effet de la pression du fluide injecté. La courbe d'expansion est obtenue par les points à la fin de plusieurs incréments de charge ou de déformation ou alternativement, la cavité est progressivement augmentée grâce à une unité d'asservissement qui contrôle le taux de chargement ou de déformation.

Un système courant de la mesure de la variation dimensionnelle de l'expansion du trou (type 1) réside en la lecture du volume du fluide injecté  $\Delta V$  à partir d'un récipient situé en surface près du trou de forage. Un système de mesure alternatif (type 2) permet que la grandeur de la cavité soit donnée par le déplacement radial  $\Delta r$  de la membrane par rapport au corps rigide, et ce, à l'aide de bras palpeurs intégrés au sein même de la sonde. Les sondes de type 2 comportent des modules électroniques pour la lecture des palpeurs. Elles sont particulièrement bien adaptées pour être asservies de manière à produire une vitesse d'expansion contrôlée de la cavité, ou au besoin, une vitesse de chargement (pression) contrôlée, ou bien les deux.

Des données brutes obtenues, il convient d'apporter des corrections pour tenir compte : a) de la réaction de certaines composantes du système vis-à-vis les variations de pressions (expansion des tubulures, compression de la membrane) et de la réaction des bras-palpeurs lors de l'expansion; b) la résistance à l'expansion de la membrane elle-même; c) les calibrations absolues sur les instruments de mesure.

La configuration physique des sondes est monocellulaire ou tricellulaire (figure 2.1). Historiquement, c'est le pressiomètre Ménard, du nom de son inventeur, qui fait son apparition commerciale suite aux travaux de Kögler sur un appareil précurseur (Baguelin et al., 1978). La configuration tricellulaire consiste en deux cellules de garde de part et d'autre de la cellule de mesure telle que conçue par

Ménard. Les cellules de garde sont gonflées simultanément en un diamètre identique à la cellule de mesure. Compte tenu de la longueur finie de l'instrument, cet arrangement a été favorisé par Ménard qui avait le souci de vouloir reproduire la déformation plane durant l'expansion (section 2.5) par rapport à l'axe de la sonde. Le système de mesure de la cavité chez le pressiomètre-Ménard relève du type 1.

### **2.3. Incidence de l'insertion sur la courbe pressiométrique**

Qu'ils soient monocellulaires ou tricellulaires, ou qu'ils appartiennent au premier type ou au second de par leur système de mesure, il convient de classer les pressiomètres par leur méthode d'insertion dans le matériau. On distinguera alors les essais d'après la technique d'insertion, c'est-à-dire selon que la sonde est descendue dans un trou pré-foré (Pre-Bored Pressuremeter Test : PBPT), qu'elle trace son propre chemin pour former la cavité par un outil aléueur intégré (Self-Boring Pressuremeter Test : SBPT) ou qu'elle est directement enfoncée dans le sol (Push-In Pressuremeter Test : PIPT).

La mise en place la plus classique consiste à pré-forer à la profondeur désirée une poche qui recevra par la suite un pressiomètre de type Ménard, par exemple. La figure 2.1 schématise le mode de préparation de la cavité de l'essai standard, ou PBPT, tandis que la figure 2.2 présente une variante. Sur cette dernière, un train de tiges à paroi mince enveloppe et suit légèrement en retrait un trépan de forage, et contribue à maintenir en place les parois du trou créé par le trépan. La cavité initiale nécessaire à l'essai est forée, puis le trépan est retiré de l'intérieur des tiges à paroi mince pour être remplacé par le pressiomètre. Ce dernier est descendu dans la pochette préalablement créée. Le diamètre du forage est légèrement supérieur au diamètre de la sonde. Une fois que l'expansion est réalisée, le pressiomètre est retiré et la séquence de mise en place de préparation de la pochette de chargement est reprise pour un essai à plus grande profondeur. Dans bien des cas, la nature du terrain investigué permet de forer la pochette de chargement sans que les parois du

trou ne soient supportées (figure 2.1). La protection des parois exclu bien entendu la pochette de chargement laquelle, dans toutes circonstances, doit faire l'objet d'un chargement le moins différé possible pour éviter la convergence du trou.

La figure 2.3 illustre la réaction du sol autour de la cavité en expansion soit à la suite d'une insertion forcée de la sonde PIP qui a causé un refoulement du sol, ou à l'insertion avec peu ou pas de remaniement du sol par une sonde SBP (voir le chapitre 4 pour une description plus complète de ce type de sonde), ou par la pratique d'un pré-forage pour descendre la sonde (PBP). La réponse du sol durant l'expansion est donc sensible au mode de mise en place de la sonde.

Une fois la sonde PBP descendue au point de mesure souhaité, elle est maintenue solidement en place pour l'essai d'expansion. L'opération de pré-forage aura une incidence sur l'évolution subséquente de l'expansion de la cavité. Quelques situations se présentent : 1) le sol est remanié, au pourtour de la cavité formée, par le passage de l'outil de forage et/ou par l'insertion subséquente de la sonde; 2) les pressions du terrain induisent la convergence de la cavité laissée sans support, rôle joué auparavant par le sol maintenant extrait : le cas échéant, cette convergence se fait au-delà du seuil élastique du sol en place; 3) plus vraisemblablement, une superposition des deux effets précédemment mentionnés. Une forme en "S" typique est donnée pour la courbe d'expansion: il y a d'abord la mise sous pression de la sonde qui permet le décollement de la membrane (O) jusqu'au contact de celle-ci avec le sol (portion A); suivie d'une prise progressive de la charge par le matériau jusqu'à ce que soient ré-établies les pressions in situ initiales (portion B); la courbe progresse subséquemment selon une portion linéaire (BC) avant qu'elle ne commence à fléchir suite au cisaillement du sol adjacent à la membrane (portion C), pour se stabiliser ensuite vers une pression limite  $P_l$  définie par une asymptote (portion D). Dans certains cas, un surdimensionnement du trou aura comme conséquence que la sonde atteindra sa capacité maximale avant d'atteindre la pression limite. Lorsque les conditions de terrains sont défavorables au point où il est difficile de maintenir intact le trou de forage (foisonnement aux parois), ou que

ce dernier est sous-dimensionné pour accueillir la sonde, la courbe d'expansion peut se comparer à celle du PIPT.

Pour contrer les problèmes liés à l'insertion, la sonde auto-foreuse a été développée. Le principe consiste à remplacer par la sonde pressiométrique le matériau évacué, et ce, au fur et à mesure de l'avancement du forage. Ce mode d'installation permet de limiter la convergence des parois du trou, liée au surdimensionnement de la cavité avec le pré-forage. Dans ces conditions la courbe SBP, qui correspond en principe à un essai dans une cavité initiale aux parois non-remaniées, montre une évolution progressive sans point d'inflexion typique de l'essai PBPT. L'expansion de la cavité ne commence alors qu'aux conditions de terrain initiales  $\sigma_h$  qui sont préservées (origine du segment B).

Ces caractéristiques correspondent à une courbe pressiométrique idéalisée. En principe, l'analyse de la courbe expérimentale devrait donc en être grandement simplifiée. En pratique cependant, la qualité de l'insertion vis-à-vis la nature du sol foré induit pour l'essai à l'auto-foreur une réponse qui peut dans les pires des cas avoir la caractéristique en "S" de l'essai PBPT, ou celle de l'essai PIPT. Les paramètres de forage (taux d'avancement, positionnement de l'aléreur, pression du fluide d'évacuation, etc.) vont contribuer à faire dévier les courbes expérimentales au SBP de la courbe d'expansion idéalisée d'un milieu non-perturbé. Conséquemment à la perturbation du sol autour de la sonde, souvent impossible à éviter, l'évaluation de la pression initiale du segment B comme valeur de  $\sigma_h$  apparaît comme discutable dans bien des cas (section 4.5).

Finalement pour l'essai PIPT, il apparaît clairement que seules persistent les portions finales C et D de la courbe pressiométrique compte tenu de la perturbation induite par le fonçage de l'instrument. Dans ce contexte, il est évident également que l'origine du segment C ne peut être utilisée même comme approximation de la contrainte in situ  $\sigma_h$ .

Le remaniement lors de l'insertion d'une sonde a donc une incidence sur la réponse pressiométrique au-delà de la portion B. Ainsi le module pressiométrique,  $E_p$ , s'en trouve affecté. Il est défini pour l'essai Ménard (un PBPT) comme la pente initiale du segment BC. Par contre, l'expérience de terrain tend à démontrer que la pression limite est peu affectée par le remaniement pour les sols courants comme les argiles et les sables. À moins qu'il ne soit excessif, un forage qui produit un remaniement dans une marge acceptable conduira à une pression limite de grandeur similaire à ce que donnerait un essai réalisé sans remaniement. Baguelin et al. (1978) ont quantifié cette marge, soit une zone annulaire de sol perturbé limitée par un rayon d'au plus 60% supérieur au rayon initial de la cavité. La zone de sol affecté par le remaniement est aussi liée aux propriétés mécaniques du matériau éventuellement testé. Ainsi, de manière absolue, la frange admissible est de rayon moindre pour les matériaux montrant une forte sensibilité à se décharger abruptement, c'est-à-dire ayant un comportement anti-écrouissant ("strain-softening") marqué. Baguelin et al. (1978) rapporte des résultats sur des silts et loess. Ces sols sont nettement plus sensibles à la préparation du trou. Les valeurs de  $E_p$  et  $P_l$  sont fortement affectées par le remaniement, à la baisse et à la hausse respectivement.

Puisque le module de cisaillement initial  $G_i$  ( $E_p$  dans l'essai Ménard est déduit de ce module) est manifestement sensible à la qualité de l'insertion, on cherchera plutôt à obtenir un module de cisaillement  $G_{ur}$  le long d'une boucle de déchargement-rechargement au-delà du point de rupture (C). Les indices «ur» réfèrent ici à la terminologie anglaise "unloading-reloading". L'hypothèse retenue est que l'expansion se fait de manière non-drainée durant un tel cycle. L'obtention du module de cisaillement sur une boucle de chargement-déchargement permet d'obtenir une valeur exempte de l'influence du remaniement. Les différences observées entre les modules  $G_{ur}$  au cours d'un essai tiennent à l'amplitude de la

boucle elle-même, et traduisent la variation du module de cisaillement selon l'amplitude de la déformation de la cavité. (Whittle et al., 1993).

#### **2.4. Autres facteurs d'influence sur la réponse pressiométrique**

Outre la qualité de l'insertion de l'instrument dans le milieu, un autre facteur va influencer la courbe expérimentale au pressiomètre, le milieu lui-même. En référant à la même nomenclature que la figure 2.3, l'on peut décrire par exemple la pente post rupture (segment CD) d'une argile, comme étant nettement plus faible que celle d'un sable. Le même segment CD de la courbe obtenue pour une roche serait caractérisé par une pente variant entre celles des deux matériaux précédents. Ainsi la contrainte in situ, la résistance et le module de cisaillement du matériau vont influencer la forme qu'aura la courbe pressiométrique.

D'autres facteurs peuvent être mentionnés: les pressions de terrains initiales peuvent être anisotropes dans le plan d'expansion et contribuer à une expansion non-uniforme de la cavité; l'état initial des pressions peut avoir été affecté par l'insertion, et bien sûr, le matériau lui-même; la contrainte principale (habituellement la contrainte verticale) peut ne pas être la contrainte intermédiaire une fois le seuil de résistance dépassé : les plans de cisaillement n'ont pas la même orientation; les propriétés du terrain peuvent ne pas être homogènes; les dimensions de la sonde font en sorte que l'expansion théorique d'un cylindre est plus ou moins respectée; le matériau se consolide (se draine) durant l'expansion; le taux de déformation dans un essai à taux de charge contrôlé diffère d'un essai à taux de déformation contrôlé, mobilisant le matériau de manière différente – des effets de déformation différée, ou de fluage, apparaissent.

Le fait que l'allure de la courbe pressiométrique soit dépendante des caractéristiques rhéologiques des matériaux dans lesquels l'essai est réalisé, de la qualité du forage et du mode opératoire de l'essai, cela a contribué à l'établissement de normes

(AFNOR, ASTM) qui fixent les paramètres de réalisation de l'essai standard. Les procédures spécifient : les corrections à apporter aux lectures considérant les erreurs dues aux pertes de pression et de volume; la préparation de la cavité par le forage et les équipements relatifs; l'exécution de l'expansion; la définition de la pression limite pratique  $P_1^*$  (équivalent à deux fois le volume initial de la cavité) et du module  $E_p$ , ou de  $G_{ur}$ .

Compte tenu de l'ensemble des facteurs mentionnés ci-dessus, il est apparu plus facile d'utiliser les résultats pressiométriques Ménard sur une base empirique que d'appliquer une interprétation théorique de l'essai. Cette approche est basée sur un ensemble de paramètres déduits de la courbe pressiométrique qui sont corrélés au comportement de nombreux ouvrages en service.

## **2.5. Interprétation**

Au fil de l'utilisation de la technique de l'essai pressiométrique, diverses méthodes se sont enrichies du développement des théories d'interprétation et de la pratique pour l'obtention de paramètres de design tels la résistance au cisaillement et l'angle de friction interne. Le plus souvent cependant, des règles empiriques viennent se juxtaposer à l'interprétation théorique.

L'approche empirique a été partiellement discutée à la section précédente. L'une des difficultés de cette approche développée pour l'essai standard, c'est qu'elle oblige de la rigueur vis-à-vis les recommandations précisées dans les normes par plusieurs années de pratique. Ceci pour que les résultats pressiométriques demeurent reproductibles et utilisables directement avec les corrélations développées pour l'obtention de paramètres de design des ouvrages.

La seconde méthode est basée sur l'intégration d'une loi de comportement décrivant la relation contrainte-déformation d'un matériau pour en déduire une courbe

pressiométrique théorique à ajuster sur la courbe d'expansion expérimentale. De nombreux modèles ont été proposés à cette fin, pour des matériaux cohésifs ou pulvérulents, tels: élasto-plastiques avec ou sans variation de volume (i.e Gibson et Anderson, 1961; Windle et Wroth, 1977; Jefferies, 1988; Houlsby et Withers, 1988; Ferreira et Robertson, 1992; Ladanyi, 1963; Hughes et al, 1977); hyperbolique ou parabolique (i.e Denby et Clough, 1980; Prévost et Hoeg, 1975).

La troisième tient à un lissage des points de la courbe expérimentale, puis d'une dérivation de cette courbe pour l'obtention d'une relation contrainte-déformation (i.e. Palmer, 1972).

L'interprétation de l'essai via l'entremise de lois rhéologiques est basée sur quelques hypothèses : le sol est homogène et isotrope dans le plan de l'expansion de la cavité; les contraintes dans le plan d'expansion sont initialement égales et principales; la déformation du sol en condition de symétrie axiale et déformation plane durant l'expansion;

À la base des méthodes d'analyse proposées, l'on retrouve en premier lieu l'équation d'équilibre d'un élément du matériau considéré dans l'espace plan (Timoshenko et Goodier, 1934).

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0$$

Le terme  $r$  définit le rayon de la cavité,  $\sigma_r$  la contrainte normale principale dans la direction radiale, et  $\sigma_\theta$ , la contrainte normale principale dans la direction perpendiculaire au rayon. À partir de cette équation d'équilibre et en respectant la compatibilité entre les différents éléments de sol au pourtour de la cavité en expansion, il est donc possible avec les propriétés rhéologiques établies de procéder avec la deuxième méthode ou la troisième à l'obtention des paramètres de design.

## **2.6. Conclusion**

Les propriétés mécaniques déduites de l'essai pressiométrique dépendent du type de pressiomètre utilisé, du type de sol sollicité durant l'expansion et de la méthode d'insertion de la sonde, de la procédure d'essai et de la méthode d'analyse de l'essai.

Les raisons invoquées pour apprécier l'allure que prendra la courbe expérimentale explique pourquoi l'approche empirique est largement répandue. Cependant, les méthodes analytiques tendent à prendre leur juste place surtout pour l'analyse de portions de courbe qui sont peu ou pas affectées par les effets de l'insertion. Ainsi, l'interprétation de l'essai est basée de plus en plus sur une analyse théorique du comportement anticipé du sol, mais modifiée et supportée par l'expérience pratique.

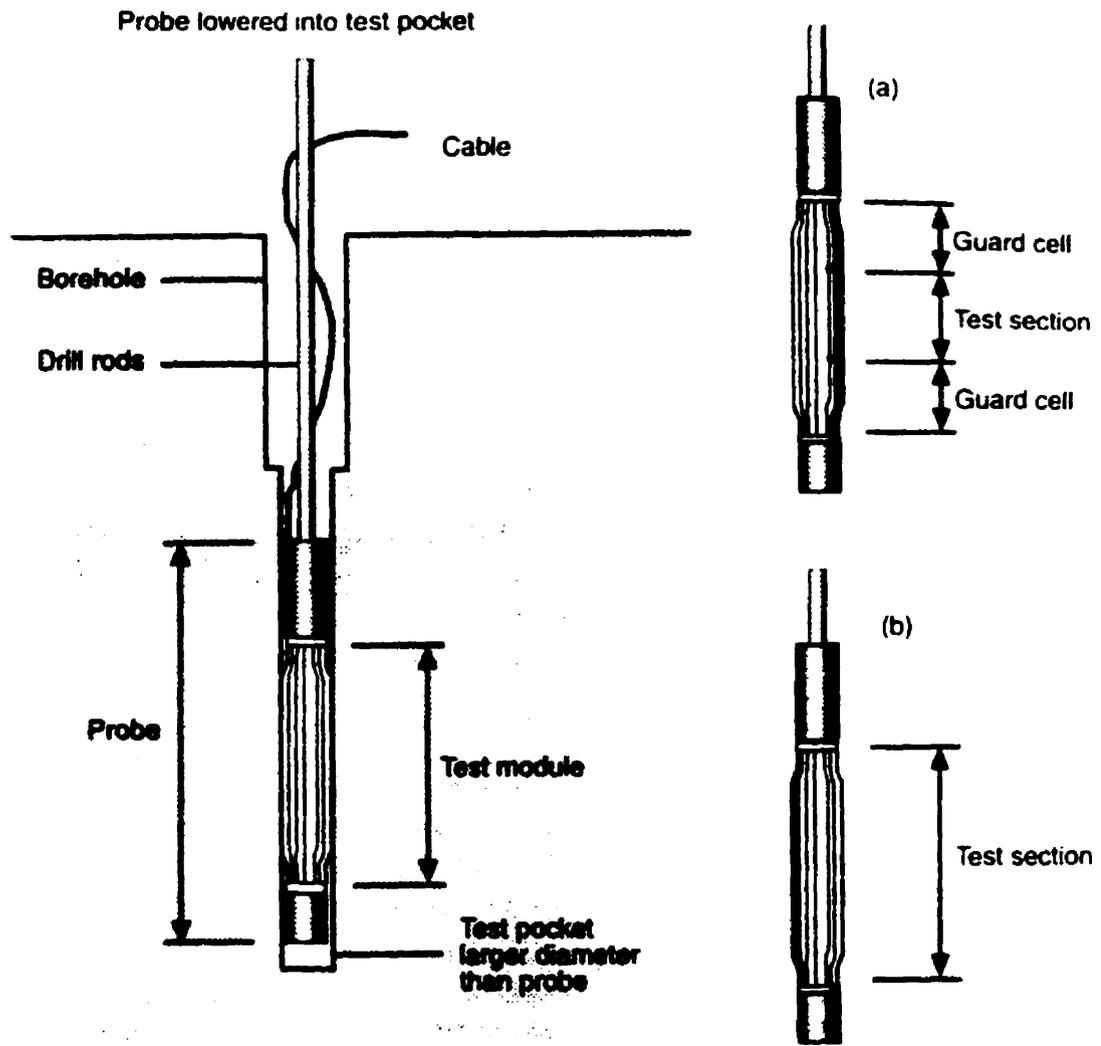


Figure 2.1: Mise en place dans un trou pré-foré d'une sonde monocellulaire ou tri-cellulaire (tiré de Clarke, 1995).

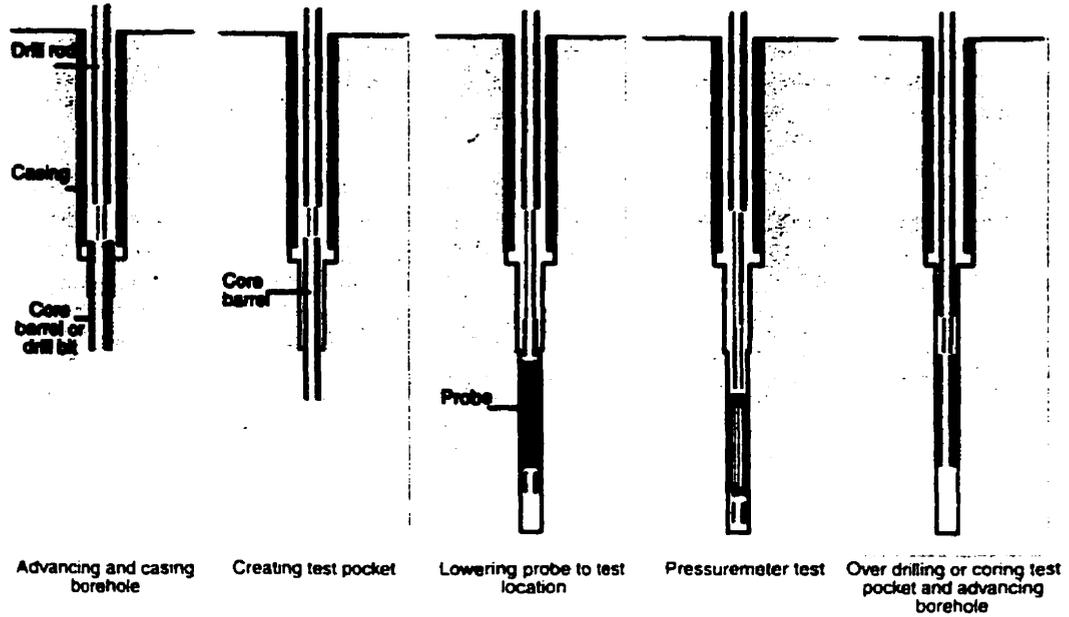


Figure 2.2: Séquence d'avancement de plusieurs essais pressiométriques avec des tubes à parois minces : a) les tubes suivent l'avancement d'un échantillonneur; b) la cavité initiale est créée; c) la sonde est descendue; d) l'expansion est réalisée; e) reprise de la séquence a) à d). (tiré de Clarke, 1995).

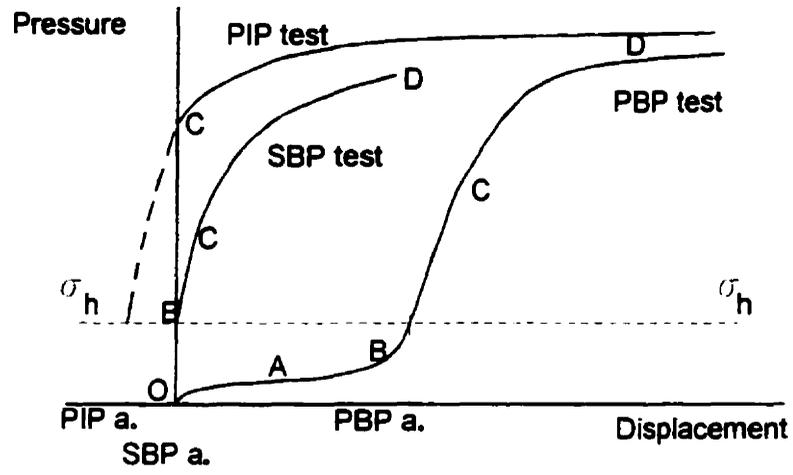


Figure 2.3: Courbes pressiométriques typiques pour des essais au PIP, PBP et SBP.

## Chapitre 3

### **Incidence des propriétés mécaniques du remblai cimenté sur la réalisation de l'essai pressiométrique**

#### **3.1. Préambule**

Les opérateurs miniers préparent le remblai selon des spécifications basées sur une série d'essais en laboratoire dont les propriétés du mélange ont été obtenues en tentant de maximiser la résistance à la rupture. À cela s'ajoutent les conditions rhéologiques qu'impose l'acheminement de la pulpe de remblai, cette dernière devant avoir des caractéristiques de cisaillement facilitant l'écoulement dans les conduites du circuit de distribution. Une fois le mélange défini pour les fins de remblayage, il fait l'objet d'un contrôle de qualité dans le temps par échantillonnage de la pulpe dans des moules cylindriques. Cette technique est usuelle pour le contrôle de qualité sur le remblai ainsi destiné aux chantiers souterrains. Les cylindres de contrôle sont soumis à un curage dans une chambre à humidité contrôlée sur une période appropriée. Par la suite, des compressions simple ou triaxiale permettent de statuer sur la variabilité de la résistance pour divers lots, pour une période de curage donnée.

Bien que l'utilisation des cylindres de contrôle soit utile pour s'assurer de la qualité de la préparation, il est difficile de reproduire les conditions thermodynamiques en place. Des écarts importants dans la préparation du remblai peuvent survenir (i.e voir Bissonnette, 1995) pour se répercuter sur les propriétés spatiales en place. Plusieurs facteurs sont à considérer (Ouellet, 2001), dont les propriétés chimiques et physiques du stérile, l'eau de gâchage, les teneurs en liant et leur nature, les patrons de drainage en chantier, la ségrégation des particules et la séquence de remblayage le cas échéant. D'autre part, les réactions d'hydratation sont affectées par une certaine altération chimique entre les diverses composantes du remblai. Cette altérabilité des

remblais miniers cimentés contribue également à une variabilité temporelle de la résistance mécanique (Ouellet et al, 1998a). L'on comprend mieux les efforts nombreux consentis à la caractérisation in situ des remblais, comme en font foi les travaux de Barrett (1973), Mitchell et al. (1975), Cowling et Gonano (1976), Gonano (1977), Gonano et Kirby (1977), Herget et de Korompay (1978), Barrett et Cowling (1980), Scoble et al. (1987), Thibodeau (1989), Yu (1989), Ouellet (1994), et Ouellet et al. (1998b), parmi plusieurs.

Deux motivations principales justifient les objectifs de la démarche scientifique de ce projet. La première est de se prévaloir d'un essai permettant de déterminer l'état du produit fini, le remblai sous terre, et en conséquence de s'assurer de l'obtention des caractéristiques mécaniques et physiques prévues lors du design et la fabrication du produit de remblayage. La seconde est de disposer d'un instrument d'investigation in situ pour déterminer les conditions en chantier telles que les charges anticipées par la convergence des épontes, l'effet du confinement ou l'autoportance de la colonne de remblai, par exemples. Le choix d'une méthode ou d'un instrument approprié pour ces objectifs doit considérer autant les conditions physiques du milieu souterrain (minier) que les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau lui-même. En première considération, l'expérience et les connaissances du milieu minier sont nécessaires. Pour la seconde, il faut d'abord examiner les caractéristiques du matériau lui-même, soit le remblai minier cimenté. À cette fin, une discussion sur les caractéristiques de remblais types s'impose.

### **3.2. Propriétés mécaniques d'un remblai cimenté type**

En premier lieu, un programme expérimental en laboratoire sur un remblai en pâte représentatif du comportement des résidus miniers cimentés est décrit succinctement (figure 3.1). La réponse contrainte-déformation attendue des remblais cimentés permettra ensuite de dégager les éléments pertinents à une caractérisation utile et

efficace en chantier, soit par la technique du carottage ou par un essai in situ tel que l'essai pressiométrique.

Les courbes de contrainte-déformations pour quelques essais permettent de suivre l'évolution de l'historique des déformations (distorsion et variations de volume) du matériau en cours de cisaillement. Elles sont présentées avec la contrainte axiale ( $S1$ ) normalisée par la contrainte de confinement ( $S3$ ).

Pour ce programme, l'essai de compression triaxiale à symétrie cylindrique a été utilisé pour tester les éprouvettes à leur teneur en eau naturelle en condition non-drainée. La réalisation des essais s'est fait conformément aux dispositions classiques, telles que présentées par Bishop et Henkel (1962), par exemple. Par la mesure des variations de volume de la chambre de confinement de la cellule triaxiale (Head, 1986), la mesure des déformations volumétriques de l'échantillon durant la consolidation et le cisaillement a été faite.

Plusieurs éléments peuvent ici être mis en évidence (figure 3.1a). La rigidité initiale et le comportement linéaire se manifestent sur les cylindres testés à plus faible pression de confinement. Avant le seuil de résistance maximale, un point de transition dans l'évolution de la courbe contrainte-déformation axiale est observé. Au-delà d'un certain niveau de confinement, cette transition entre un comportement linéaire et non-linéaire s'estompe. De plus, à grandes pressions de confinement, les courbes sont à toute fin pratique congruentes. En cours de cisaillement, le matériau montre un comportement anti-écrouissant lorsque le confinement est faible, tandis qu'il présente un accroissement de la résistance lorsque soumis à plus forte pression radiale. Cependant, toutes les courbes tendent à converger vers un rapport de contraintes ( $S1/S3$ ) similaire à grandes déformations. Ces observations suggèrent une courbe enveloppe unique pour la résistance ultime du remblai (Ouellet, 1995). Ainsi, l'effet de la cimentation s'estompe ou devient peu perceptible au-delà d'un certain niveau de contrainte. Entre autres observations, les variations de volume (figure 3.1b) démontrent le caractère contractant de ce remblai. Dans leur ensemble,

ces caractéristiques sont analogues à celles observées sur certains matériaux structurés tels les sols latériques ou les sables cimentés (Mitchell et Wong, 1982; Huang et Airey, 1993; Coop et Atkinson, 1993), pour lesquels l'effet de la cimentation s'amenuise, conséquemment au chargement, pour tendre vers le comportement d'un matériau non structuré. L'examen d'essais similaires sur les remblais hydrauliques permet de révéler un comportement analogue au remblai en pâte pour une même quantité de liant, mais avec de plus faibles résistances (Ouellet, 1995).

Plusieurs facteurs vont influencer le comportement des remblais (Chang et Woods, 1992; Ouellet, 1995; Ouellet et al, 1998a) :

- l'étalement de la granulométrie révélatrice de nombreux points de contacts entre les particules correspondant aux lieux de cimentation;
- le temps requis pour la stabilisation (curage) ou pour l'altération chimique des liens cimentés;
- la structure du composite gangue-matrice cimentaire;
- les caractéristiques de l'agent de cimentation.

Sur la base de ces facteurs d'influence, la résistance des remblais à contraintes moyenne faible et élevée peut être rationalisée et synthétisée au moyen d'un diagramme «q-p», où la définition de la contrainte «q» et «p» apparaissent à la figure 3.2. À faible contrainte moyenne «p», l'ordonnée à l'origine «c» et la pente, qui relie les résistances au pic pour un lot étudié, sont une fonction de la teneur en ciment et du temps de curage. Ces droites de pente variable convergent vers une droite commune à partir d'un certain niveau de contrainte (environ 900 kPa), pour rejoindre la droite intrinsèque du matériau non-cimenté. Ainsi, au-delà de cette pression, elles sont confondues en une seule : le matériau a perdu sa structure.

À l'instar des points qui définissent les résistances au pic, sont aussi ajoutés sur ce diagramme les points de transition tirés des courbes contrainte-déformation.

Regroupés, ils définissent des courbes enveloppes concentriques de forme elliptique qui délimitent la portion linéaire de la portion non-linéaire du chargement. Cette représentation permet là encore de faire ressortir l'effet des liens de cimentation et de l'historique de chargement. Selon Coop et Atkinson (1993) et Ouellet (1995), ces courbes enveloppes délimitent le début de la perte de structure causée par la rupture des liens de cimentation.

### **3.3. Échantillonnage in situ: effet du remaniement**

Les sondages par carottage sont d'une pratique courante comme outil pour la caractérisation des sols et autres géomatériaux. Les remblais miniers cimentés n'échappent pas à cette approche, bien que les techniques utilisées en géotechnique ne puissent être transposées directement. Les premiers échantillonnages dans les remblais miniers consistaient surtout à déterminer les teneurs en eau ou à définir des profils de ségrégation (Gonano, 1975, 1977; Thomas, 1979). Les techniques à ce jour utilisées dans ces matériaux ne permettant pas de meilleur rendement compte tenu du remaniement des échantillons. Conséquemment, les premières solutions sont proposées. Thomas et al. (1979) suggèrent, pour limiter l'ampleur du remaniement et pour tirer le maximum du potentiel du carottage, l'usage possible d'un double, ou même d'un triple tube carottier.

De nombreux efforts ont donc été consentis pour adapter les meilleures techniques au contexte minier avec comme objectif la récupération d'échantillons le moins remaniés que possible. À cet effet, on peut citer les travaux du CANMET (Annor, 1990) qui relatent pour l'échantillonnage des remblais cimentés, les avancées et les difficultés rencontrées dans le développement d'une technique appropriée.

En substance, avec les mesures adoptées et énumérées ci-dessous, la récupération "intacte" d'échantillon est passée d'une moyenne de 15% (ou moins) jusqu'à des niveaux aussi élevés que 95%, grâce:

- à l'utilisation de tube "double carottier" pour une meilleure récupération, avec entre autre celui interne fendu pour faciliter l'extraction du tube;
- à l'utilisation d'un polymère dissout comme boue de forage comme alternative à l'eau pour l'évacuation des débris;
- au contrôle précis de la vitesse de rotation et de la poussée du forage.

Dans les faits cependant, l'état des échantillons récupérés se situerait entre les deux conditions diamétralement opposées, à savoir un état intact ou un état avec une perte complète de structure. Le taux de récupération relaté concerne les sections de remblai présent dans le tube, et ne considère pas le remaniement induit au matériau durant l'échantillonnage. Ainsi, en terme d'échantillons utilisables pour des essais mécaniques subséquent, la "récupération" chute drastiquement. Cela mène à poser encore une fois toute la problématique du conditionnement des échantillons de remblai durant l'extraction du chantier et des manipulations subséquentes. Ce constat apparaît implicitement au sein du même rapport du CANMET cité précédemment. Ainsi, y sont énumérés un ensemble de problèmes relatifs au carottage dans les remblais cimentés, et ce, malgré les améliorations apportées à la technique:

- à moins d'utiliser un système à plusieurs tubes carottier, le processus de rotation durant le forage et l'extraction des échantillons les brisent énormément;
- l'extraction de l'échantillon des tiges de forage ou des tubes est difficile compte tenu que le matériau se coince durant le processus de forage et d'insertion dans le tube;
- l'impossibilité de récupérer à 100% les échantillons demeure;
- l'usage de boue de forage altère les conditions de saturation de l'échantillon;
- de manière générale, les échantillons recueillis sont remaniés et non représentatifs du matériau échantillonné.

La technique d'échantillonnage la plus efficace à ce jour porte sur l'utilisation du forage aux diamants avec un triple tube carottier. L'équipement est opéré avec une boue de forage comportant un polymère pour augmenter la viscosité du fluide. Cette technique conjuguée apparaît en Abitibi au cours de la deuxième portion des années 1990. L'usage d'un polymère dans la boue de forage permet de contourner les problèmes de friction du foret sur le matériau et l'imbibition par l'eau de forage (Thomas, 1979; Thibodeau, 1991).

Le remaniement est cependant une problématique plus difficile à contourner. L'expérience montre des résultats variables, selon que le carottage est progressif et doux, ou bien selon la nature même du matériau. La première dépend largement de l'opérateur de la foreuse, tandis que la seconde peut être liée à la résistance du matériau.

Ouellet (2001) relate l'aspect qu'ont des carottes prélevées dans des remblais cimentés en pâte en Abitibi, au Québec, et acheminées au laboratoire pour y être testées. Elles provenaient de sites différents. Selon le cas, plusieurs carottes étaient étonnamment bien intactes et le profil de forage ne présentait aucune discontinuité, avec la possibilité de prélever des échantillons en tout endroit pour fin d'essai mécanique. Cependant, toutes présentaient une frange externe remaniée humide, ou bien desséchée. Ce conditionnement est imputé aux boues de forage et/ou au séchage subséquent. Cette bordure ne semblait en aucun cas refléter la teneur en eau interne à l'échantillon. En effet, un échantillon fraîchement cassé, à sa teneur en eau naturelle, montre sur ses nouvelles surfaces une humidité apparente. Pour d'autres lots, l'humidité apparente en surface semblait correspondre à celle au centre des échantillons, bien que dans ce cas particulier, les morceaux disponibles présentant des indices de remaniement évident sur des segments important du forage. Il était donc impossible de prélever des échantillons pour réaliser des essais mécaniques. D'autres ont été confrontés avec les mêmes difficultés en ce qui concerne le remaniement excessif par carottage (Bawden et al., 2001).

Ces dernières observations, de même que celles du Canmet au sujet du remaniement rejoignent ainsi l'opinion émise par Clough et Bachus (1981) sur des sables faiblement à moyennement cimentés. Les techniques utilisées par ces auteurs comprennent la cuillère fendue, le tube Shelby et un échantillonneur (de type "Pitcher sampler") dont la méthode de récupération est analogue à la technique du double tube carottier. Ils ont statué qu'indépendamment de l'une de ces techniques, il est à toute fin pratique impossible d'échantillonner de tels matériaux sans induire une certaine perturbation.

Le comportement contrainte-déformation des résidus miniers cimentés permet ici d'expliquer en quoi ils sont sensibles à l'échantillonnage même avec les meilleures techniques de carottage. La portion initiale pseudo-linéaire de la relation contrainte-déformation, lorsque présente, est limitée à une faible déformation admissible (moins de 2%). Parce que le matériau est sensible à la contrainte moyenne, toute perturbation du milieu est susceptible de l'affecter drastiquement. Cette compréhension du comportement permet de réconcilier les résultats variables rapportés jusqu'ici pour le carottage, à savoir l'effet bénéfique d'une technique de carottage adoucie, et dans une certaine mesure, une résistance suffisamment élevée du remblai à prélever. Une technique de carottage adoucie maintiendrait l'échantillon dans un état à peu près intact, c'est-à-dire dans un état où les liens de cimentation sont préservés.

#### **3.4. Un essai in situ, l'essai pressiométrique**

Il est intéressant de pouvoir dresser un parallèle entre les succès plus ou moins mitigés de l'échantillonnage et les expériences passées avec l'utilisation des pressiomètres dans le contexte des résidus miniers cimentés.

L'essai pressiométrique le plus ancien à avoir été réalisé dans les remblais miniers cimentés, selon ce qui est connu et publié, est celui rapporté par Börgesson (1981).

L'auteur se limite à des mentions succinctes concernant les paramètres  $E_p$ , le module pressiométrique dérivé d'un essai au pressiomètre auto-foreur, et le coefficient de Poisson  $\nu$ . Il n'y a pas de courbe expérimentale présentée, ce qui rend impossible une appréciation de la qualité de l'essai sur la base d'une courbe idéalisée au SBP.

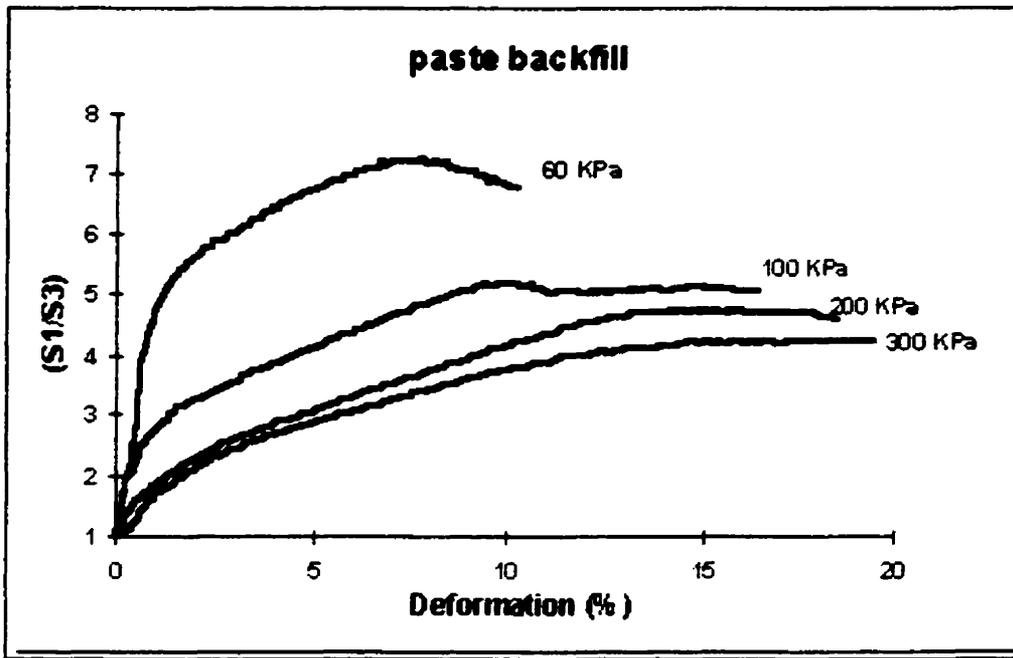
Par contre, les résultats présentés par Scoble et al. (1986, 1987) sont riches de renseignements. Les essais ont été réalisés, pour la plupart, dans des remblais cimentés hydrauliques classifiés c'est-à-dire exempts de particules fines. Les courbes d'expansion complètes présentées seraient les premières véritablement publiées pour les remblais miniers. Les essais ont été réalisés par un pressiomètre à cône, un PIP. La technique, on se le rappellera (chapitre 2) consiste à forcer le cône-pressiomètre dans le sol. Il s'agit d'une insertion par déplacement total (ou Full Displacement Pressuremeter Test). Lorsque la poussée requise était insuffisante, un pré-forage a été utilisé soit pour avancer ou réduire la friction durant l'enfoncement, ou tout simplement pour créer la pochette nécessaire à la réalisation de l'essai. Ainsi, deux réponses sont obtenues (figure 3.3) : l'une typique à l'insertion par déplacement total (PIP), et l'autre typique à l'essai Ménard (PBPT). Du fait de la forte propension du matériau à passer d'un état cimenté à un état avec perte de structure, les nombreuses adaptations nécessaires à l'insertion du cône-pressiomètre expliquent pourquoi les courbes d'expansion varient beaucoup entre elles. Ces variations compliquent cependant l'interprétation de ces courbes d'expansion. Elles nécessitent de poser un certain nombre d'hypothèses à l'égard de l'ampleur du remaniement. L'obtention des paramètres à dériver de ces courbes sur la base du matériau lui-même comporte donc des difficultés supplémentaires. Compte tenu de l'effet de la structure sur la sensibilité au chargement ("strain-softening") du remblai cimenté, les quantités  $E_p$  et  $P_1$  apparaissent largement affectées.

Pour pallier les inconvénients du cône-pressiomètre, d'autres essais ont été tentés dans les remblais cimentés, mais à l'aide d'un pressiomètre auto-foreur pour minimiser l'effet du remaniement (Annor, 1990). Malheureusement, les résultats ont été décevants pour les deux types de remblais en pâte et hydraulique testés. Deux

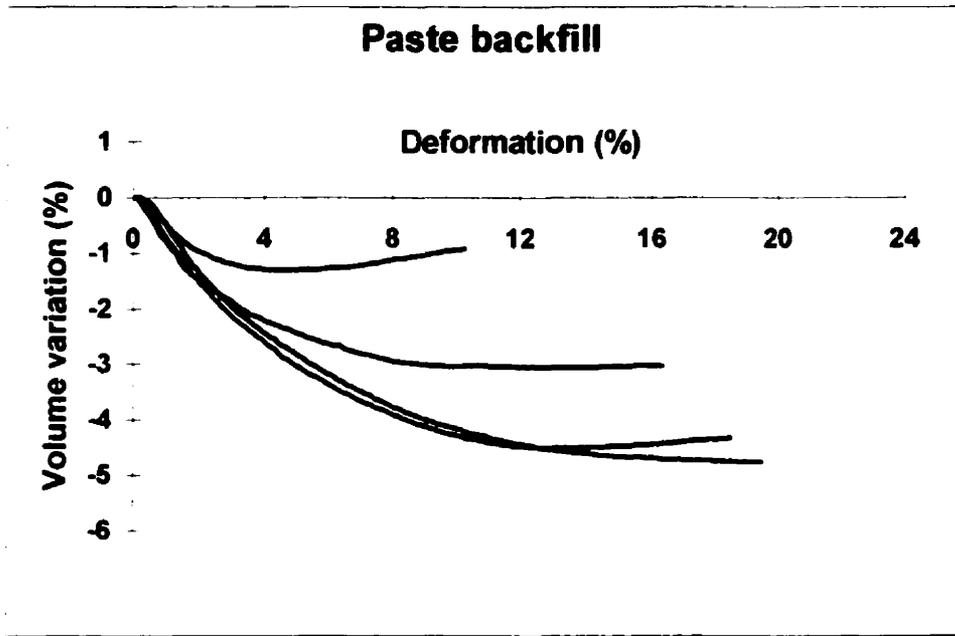
facteurs ont contribué de manière importante à ces succès: (i) la présence de granulats dans le remblai suffisamment grossier pour affecter la qualité de l'insertion de l'auto-foreur (ii) la capacité de forage de l'unité pressiométrique déficiente pour accomplir la tâche compte tenu de la raideur du matériau.

Les résultats précédents sont malgré tout riches en renseignements. Pour autant que le matériau soit exempt de granulats, ils n'infirmement pas l'applicabilité de l'essai pressiométrique dans les remblais de résidus miniers cimentés. Au contraire, les courbes complètes de Scoble et al. (1986, 1987), même avec un remaniement tangible, et à la lumière des poussées récentes sur la compréhension du comportement contrainte-déformation des remblais de résidus miniers cimentés, tendent à supporter l'applicabilité du pressiomètre auto-foreur dans ce type de matériau.

L'utilisation pressiomètre auto-foreur peut donc être envisagé. Le cas échéant, si l'avancement ou la qualité de l'insertion de la sonde était compromis par la présence de cailloux, l'utilisation de tube de forage pour traverser les obstacles mineurs est envisageable, tel que présenté au chapitre 2.



a) Rapport des contraintes principales en fonction de la déformation axiale (%).



b) Variation de volume (%) en fonction de la déformation axiale (%).

Figure 3.1: Courbes (triaxiales) de contrainte-déformation type d'un remblai en pâte à 6,5% ciment et 3 jours de curage (Ouellet et al., 1998).

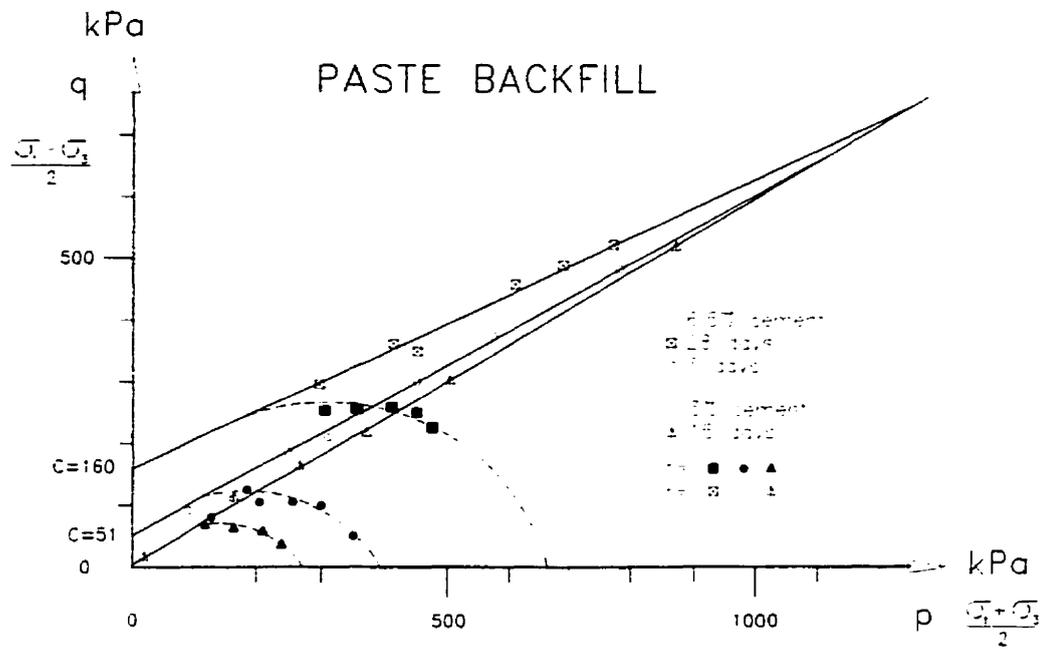


Figure 3.2 : Un critère de rupture proposé pour le remblai en pâte (Ouellet, 1995).

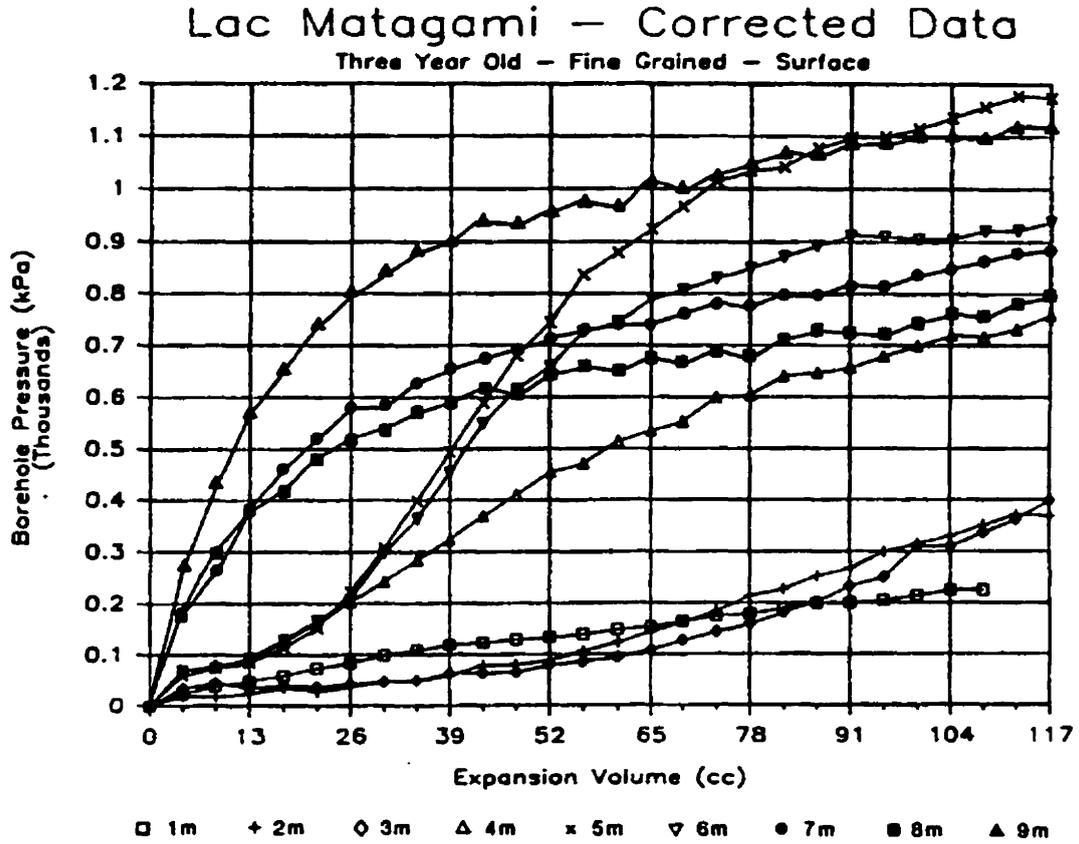


Figure 3.3. Courbes expérimentales au cône-pressiomètre, Mine Lac Matagami (Scoble et al., 1986).

## Chapitre 4

### Mise en oeuvre de l'essai pressiométrique dans deux chantiers remblayés

#### 4.1 Préambule

Au chapitre précédent, la démonstration a été faite qu'un remaniement limité rend possible dans certaines circonstances l'échantillonnage dans un remblai fait de résidus miniers cimentés avec la technique du carottage. Le carottage adouci a son équivalent en pressiométrie, soit l'existence d'une sonde pressiométrique auto-foreuse. La sélection de l'équipement fait donc ici référence à ce type d'instrument. Mais auparavant, nous rappelons ici le principe général d'opération tel que décrit dans Mair et Wood (1987) ou autres références traitant du sujet pour une description de ce type d'équipement.

Le schéma de la figure 4.1 permet d'illustrer le mode de fonctionnement du système auto-forage. Deux trains de tiges concentriques servent à avancer le forage. Le plus petit de calibre RW sert à la rotation d'un foret à la tête du train de tige. Évidé en son centre, il amène le fluide de forage nécessaire à l'évacuation des débris de sol raclé par le foret. Celui de plus gros diamètre sert à l'évacuation du fluide de forage et des débris dans l'espace annulaire disponible entre les tiges. Pendant que la sonde est enfoncée dans le sol à partir d'un vérin qui pousse sur les tiges externes, le foret en rotation à l'intérieur du sabot permet l'évacuation du sol au fur et à mesure qu'il s'y insère. Le sabot consiste en un cylindre dont la face intérieure est biseautée. Cette coupe vers l'intérieur rabote le sol vers le foret. De cette manière, le sol cisailé par le sabot laisse un trou profilé avec un minimum de perturbation. Le foret est mu, via les tiges RW, par un moteur hydraulique situé en surface du forage. La sonde consiste en une membrane montée autour du corps rigide, soit une conduite d'évacuation des débris de forage. Elle est gonflée dans le sol, l'expansion de la

cavité créée est mesurée à l'aide de trois bras palpeurs en fonction de la pression appliquée durant l'essai.

## **4.2. Sélection des équipements**

Plus spécifiquement, il s'agit d'une sonde couramment désignée sous l'appellation Cambridge Self-Boring Pressuremeter, commercialisée par la société anglaise Cambridge InSitu. Le choix s'est arrêté sur ce type d'équipement, d'une part parce que commercialement disponible, et d'autre part parce que l'ensemble du système nécessaire à la réalisation des essais dans le contexte minier pouvait facilement être adapté. Le système semblait offrir toute la versatilité et la puissance requises pour une campagne de terrain réussie. Les expériences passées, dont l'une au pressiomètre auto-foreur (Annor, 1990), montre que la raideur des remblais cimentés peut devenir une contrainte importante sur la capacité des unités de poussée et de forage. La présence de stérile rocheux dans le remblai, provenant du toit d'un chantier par exemple, peut aussi être la source de refus à l'avancement de la sonde. Or, plusieurs configurations sont disponibles et les outils aléseurs variés donnent à l'instrument une plage d'application variée dans différents types de sols. La nature des terrains testés par le passé avec cet instrument varie des plus mous, au plus durs, notamment les roches tendres et les sols structurés.

### **4.2.1. La sonde**

La sonde utilisée est le modèle Cambridge Mark VIII d Digital Self Boring Pressuremeter. Les caractéristiques de la sonde sont similaires à celles montrée à la figure 4.1. De manière plus exhaustive, l'instrument qui vient avec un cordon de 50 mètres de câble, a une capacité d'une pression maximale de 4 MPa, possède trois bras palpeurs montés sur des rouleaux de type Fahey-Jewell, deux cellules scellées de pression interstitielle, un amplificateur de signaux en fond de trou, un

multiplexeur et une interface RS 232. Des modules électroniques de filtration et de conversion de signaux analogique/numérique à même la sonde. La position et l'orientation de la sonde relatives à un datum au collet du trou sont donnés grâce à un magnétomètre à double flux. L'unité de contrôle de la mise en charge, et l'acquisition des données sont contrôlés par une interface fournie avec un ordinateur et une unité d'alimentation. La sonde est gonflée par un gaz comprimé qui passe dans le cordon de 50 mètres. Ce cordon est porteur de quatre câbles armés qui transmettent les données.

Dans le contexte d'une utilisation souterraine, une bouteille d'air comprimé remplace avantageusement l'usuelle bouteille d'azote utilisée pour le gonflement de la membrane dans les opérations de surface.

#### **4.2.2. Les équipements connexes**

La figure 4.2 présente la disposition des équipements connexes nécessaires à la réalisation de l'essai, mais dans une galerie de mine où l'espace est restreint. Les équipements utilisés se comparent à ceux d'une campagne de terrain en surface. La vitesse de rotation du moteur hydraulique et la poussée des vérins à partir d'un cadre de chargement sont assistées par un boîtier de régulation de débit entre les diverses unités hydrauliques. Une pompe puise l'eau de forage à même un bassin d'alimentation (dans le cas présent, un baril de pétrole de 45 gallons). Cette eau peut être recyclée. Un moteur diesel sert à pomper l'huile comme source d'énergie hydraulique. Il est équipé d'un diffuseur pour dissiper les gaz d'échappement, une contrainte importante dans une mine. Ces différentes unités sont placées dans des cadres rigides modulaires. Elles peuvent être disposées de diverses manières dans l'espace disponible, et être déplacées à bras d'hommes sur de courtes distances. Il s'agit d'une considération importante si l'on souhaite être le plus autonome possible vis-à-vis l'utilisation de la machinerie lourde de la mine. La configuration de ces

unités rend le système autonome, et ne nécessite pas en soi l'utilisation d'une foreuse avec ses opérateurs en attente.

### **4.3. Les sites d'essais**

Trois chantiers ont été auscultés à l'auto-foreur. Seul les deux premiers font l'objet d'un traitement.

#### Premier site d'essais :

Les premiers essais ont été réalisés en surface d'un chantier remblayé, avec le cadre de chargement fixé à une dalle de béton (3 m x 1 m x 0.2 m ) préparée à cet effet. Pour s'assurer d'une réaction suffisante à la poussée des tiges de forages, cette dalle a été chargée de roches. Les chantiers ont des dimensions nominales de 60 m de hauteur par 20 m de large et 20 à 40 m de profondeur.

#### Second site d'essais :

Le deuxième site d'essais a été aménagé dans une galerie adjacente au chantier ausculté. Ce chantier est localisé directement sous celui ayant fait l'objet des premiers essais. Dans cette galerie, une foreuse ITH a été mise à contribution pour forer un trou permettant d'accéder le chantier remblayé. Une épaisseur de roc de 30 mètres environ est ainsi percée d'un trou d'environ 15 centimètres de diamètre. Des tiges à parois minces de calibre PW sont descendues dans le trou. Ils servent de gaine pour protéger la sonde et ses tiges de forage à l'interface roc-remblai et tout au long de la descente jusqu'au remblai.

L'installation du cadre de chargement a fait l'objet d'une modification judicieuse sur le deuxième site. Puisque le trou dans le roc a son collet à l'intersection du mur et du

plancher de la galerie, le cadre de chargement y est solidement ancré à l'aide de chaînes, de boulons d'ancrage et de treuil compact de 2 tonnes chacun de capacité (figure 4.2). Le positionnement du cadre est assuré par une section de PW soudée à une plaque métallique laquelle réagit contre les parois de la galerie.

#### **4.4. Le programme d'essais**

Le programme d'essais sur ces deux chantiers comporte 26 essais. Avant d'initier les essais, les calibrations nécessaires ont été pratiqués sur l'instrument et la membrane. De ce nombre, 24 ont fait l'objet de deux boucles de déchargement-rechargement. Les paramètres de la réalisation des essais sont compilés au tableau 4.1. Ce tableau précise la nature du fluide de forage, l'outil de coupe, et la configuration de la membrane utilisés. Quatorze essais sont réalisés dans le premier chantier (S1-T1 à S1-T14) et une douzaine dans le second (S2-T1 à S2-T12).

Deux configurations sont ici utilisées. La configuration standard, avec une membrane de caoutchouc dédiée aux essais en terrains durs ou difficiles (i.e. sol avec inclusion rigide), configuration dites "roche". La seconde est la configuration "sol", avec une membrane mince en néoprène plus sensible pour les terrains mous et qui permet l'ajout de deux capteurs de pression interstitielle diamétralement opposés l'un à l'autre.

Pour favoriser une insertion de qualité avec un outil de coupe efficace, il a été décidé de débiter le premier segment de forage avec un tricône plutôt qu'avec la lame rotative, en conjonction avec une boue de polymère. L'expérience acquise sur le carottage tend à favoriser l'utilisation d'une telle boue (chapitre 3).

À l'inspection de la première courbe expérimentale, il ressort sur la base de son apparence qu'elle correspond à une courbe pressiométrique idéalisée (chapitre 2) avec une portion marginale présentant des signes de remaniement. Plus tard dans la

campagne, la lame rotative et de l'eau claire ont été utilisées sans amélioration significative de la qualité de l'insertion. Les deux outils ont été positionnés à une distance de 10 mm derrière le bord de l'outil de coupe (le sabot). Elle démontre indirectement que le sabot assurait un bon scellement autour de l'outil aléueur en maintenant le fluide de forage en circuit fermé, minimisant d'autant le remaniement par sur-lavage. Une réponse typique est présentée à la figure 4.3.

La configuration "roche" a été abandonnée pour les 23 derniers essais sur ces sites, permettant d'apprécier la réponse du remblai vis-à-vis le développement possible d'une pression interstitielle durant le cisaillement. La figure 4.4 illustre l'évolution de la réponse des capteurs selon la profondeur d'exécution de l'essai. Tel que mentionné au chapitre précédent, la contractance du matériau en cours de cisaillement est anticipé. Dans pareil cas, l'on peut prédire une montée de la pression interstitielle en cours de cisaillement pour un remblai de plus en plus saturé. Un profil de saturation de dessine ici avec la profondeur, ce qui est confirmé par les observations de terrain : le remblai du premier chantier présentait une surface disséquée tandis que le haut du deuxième chantier, 60 m plus bas, montrait des signes de saturation.

#### **4.5. Analyse des résultats**

Si l'on pose comme hypothèse que le matériau ne se draine que très peu, alors le traitement de la courbe pressiométrique avec la méthode de Gibson et Anderson (1961) se justifierait pour les portions saturées de remblai testé pour l'obtention du paramètre de la résistance,  $S_u$ . En contre partie, les portions non-saturées présenteraient un cisaillement en cours d'essai accompagné de variations de volume du matériau. Dans ces circonstances, l'approche de Gibson et Anderson (un modèle élasto-plastique) serait d'une validité douteuse. En dépit de cette remarque, un profil des résistances selon la profondeur est présenté pour le premier chantier (figure 4.5). Bien qu'un modèle d'interprétation élasto-plastique ne soit pas approprié, il est

utilisé. Il semble jusqu'à présent n'y avoir aucun modèle d'interprétation approprié pour traiter les remblais cimentés. Ce constat s'appliquerait également pour des matériaux similaires (Schnaid, et al., 2000). Néanmoins, la résistance  $S_u$  varie ici entre 275 et 515 kPa. Ces valeurs se comparent avantageusement à celles obtenues d'essais de compression triaxiale sur des échantillons in situ prélevés, en nombre restreint, dans des chantiers voisins (Ouellet, 2001).

L'analyse des pressions latérales initiales dans les matériaux rigides posent de nombreuses difficultés, puisque l'insertion ne peut se faire sans remaniement. Les courbes pressiométriques obtenues supportent d'ailleurs cette observation faite par plusieurs sur des matériaux naturels. Il semble cependant que la méthode de Marsland & Randolph (Hawkins et al., 1990) pour l'obtention de cette valeur donne des résultats cohérents avec des analyses numériques plus poussées (Zhu, Z., 2001). Le profil des pressions présenté à la figure 4.6 a pu être avantageusement reproduit par des analyses numériques.

Enfin, le module de cisaillement, une donnée utile dans la modélisation numérique pour l'analyse du comportement des structures en service, est dérivé des essais réalisés. Un profil est tracé à la figure 4.7.

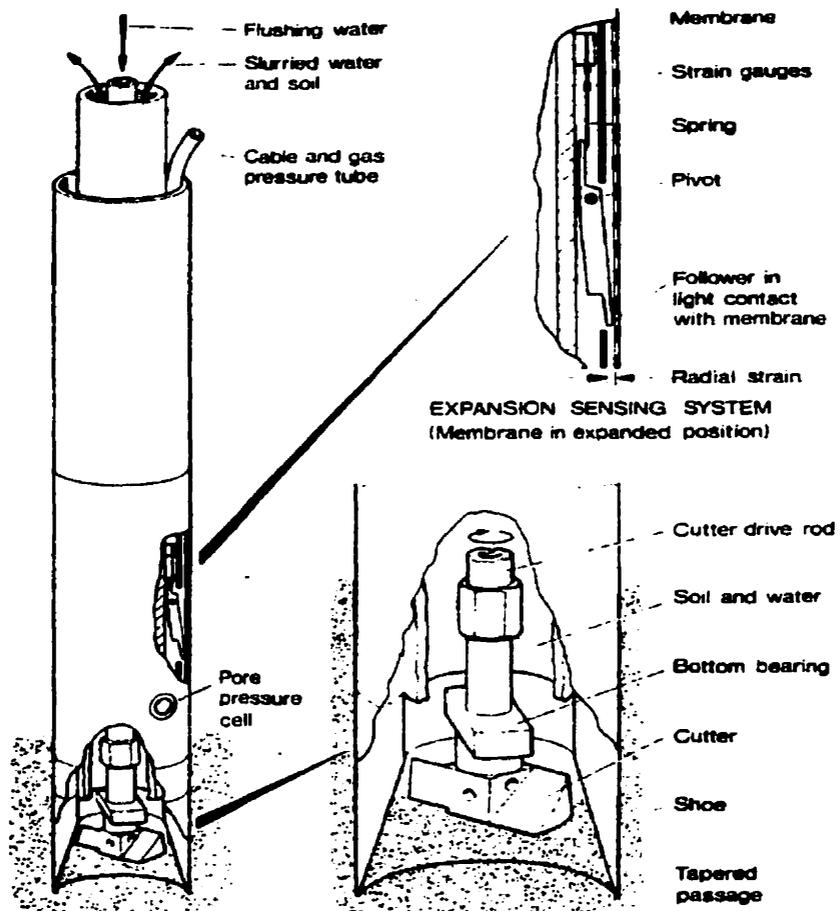


Figure 4.1: Schéma du Camkometer (tiré de Windle & Wroth, 1977).



Figure 4.2: Disposition des équipements et fixation du cadre de chargement contre le mur de la galerie.

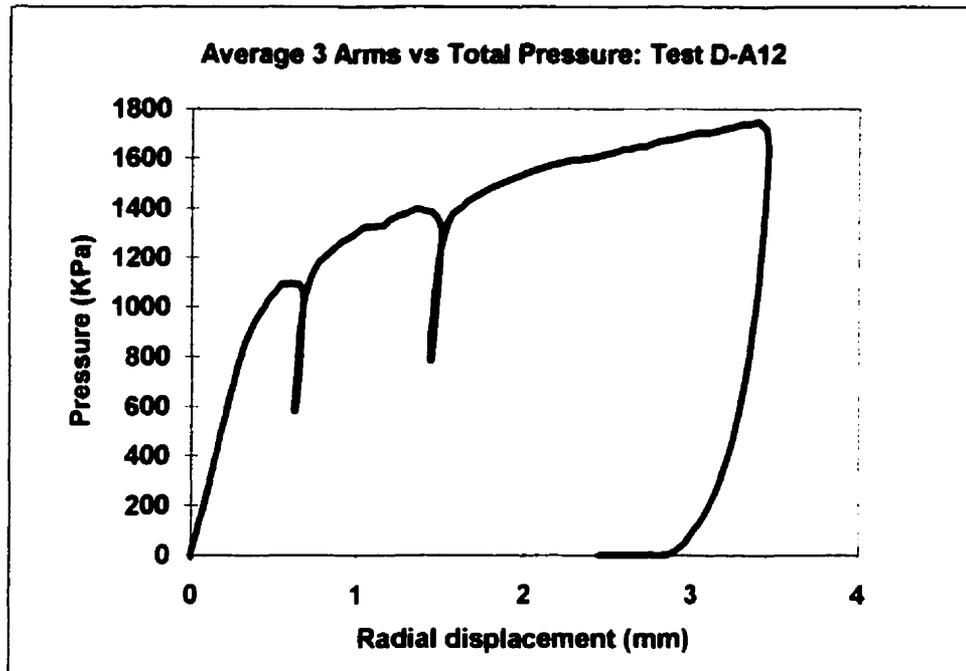


Figure 4.3: Courbe pressiométrique typique obtenue (Ouellet et Servant, 2000).

Average pore pressure evolution with depth

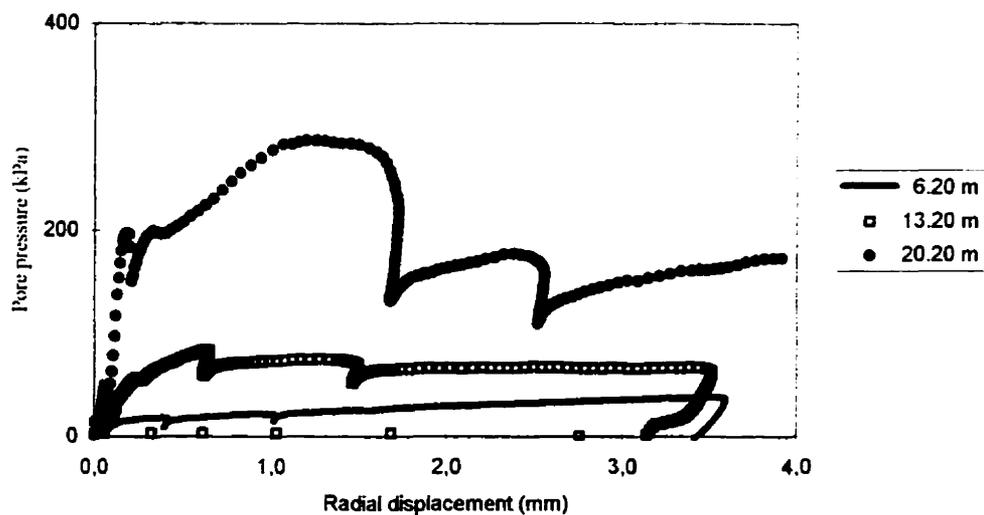


Figure 4.4: Pression interstitielle mesurée durant des essais pressiométriques à trois profondeurs différentes. (Ouellet et Servant, 2000).

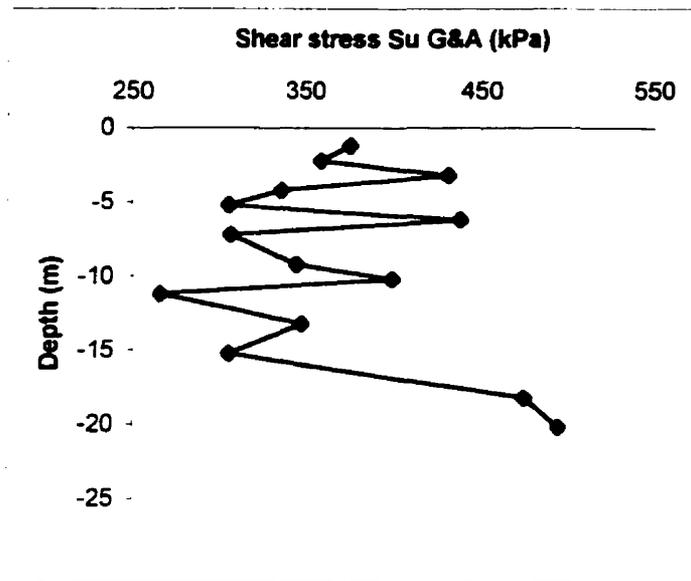


Figure 4.5: Résistance non-drainé (G & A) du remblai en pâte selon la profondeur (Ouellet et Servant, 2000).

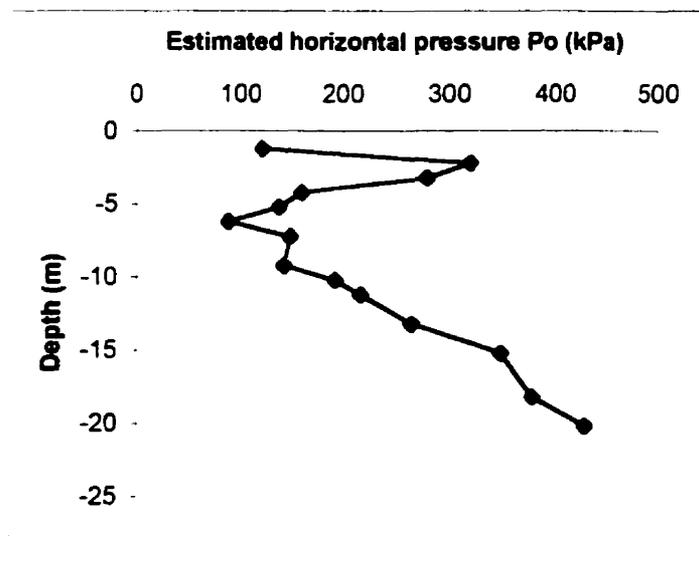


Figure 4.6: Contrainte horizontale (Marsland & Randolph) selon la profondeur (Ouellet et Servant, 2000).

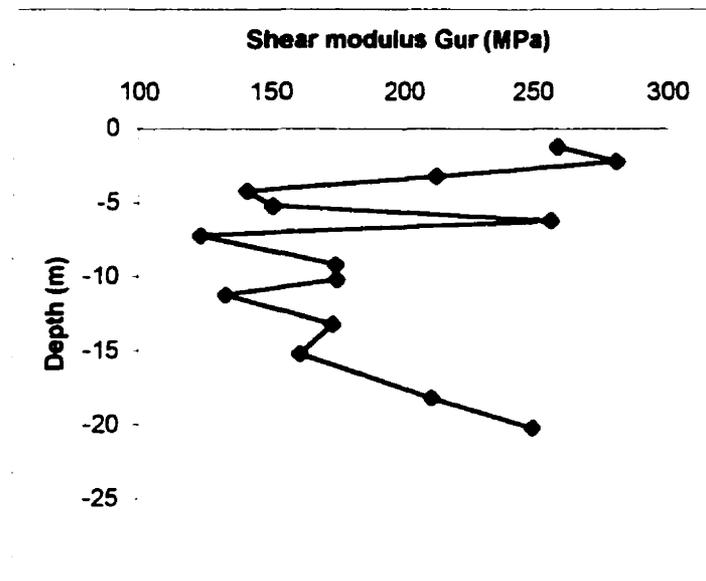


Figure 4.7: Module de cisaillement moyen  $G$  selon la profondeur (deux cycles de déchargement-rechargement) (Ouellet et Servant, 2000).

Tableau 4.1. Description des conditions d'essai.

No essai	Fluide	Outil de coupe	Configuration de la sonde
S1- T1 & S1-T2	boue polymère	tricône	Roche std / lanterne chin.
S1- T3 & S1-T4	eau	tricône	Roche std / lanterne chin.
S1-T5	boue polymère	tricône	Roche std / lanterne chin.
S1-T6	eau	lame	Sol/ lanterne chin.
S1-T7	boue polymère	lame	Sol/ lanterne chin.
S1-T8 à S1-T14	eau	lame	Sol/ lanterne chin.
S2-T1 à S2-T12	eau	tricône	Sol/ lanterne chin.

## **Chapitre 5**

### **Conclusion**

#### **5.1 Sommaire**

Les difficultés que comporte l'auscultation des remblais miniers faits de résidus cimentés ont été rappelées. Des échantillons de contrôle testés au laboratoire ne permettent pas d'assurer une représentativité réelle des conditions pouvant prévaloir en chantier. Les moyens de prélèvement en chantier sont d'une efficacité restreinte et les échantillons recueillis sujet à un conditionnement important. C'est d'ailleurs dans les zones les plus critiques que plus souvent qu'autrement, l'information est le moins disponible (Ouellet et al., 2001).

Dans ce contexte, la promotion d'une technique efficace d'investigation in situ se justifie largement. L'une d'elle a été proposée dans le présent mémoire. Sur la simple observation de l'allure de la courbe expérimentale, il ressort que l'essai pressiométrique dans ce type de remblai répond amplement au besoin exprimé. Basé sur son allure, la courbe expérimentale typique obtenue dans le remblai peut être qualifiée d'excellente dans la mesure où l'expérience montre pour ce type d'essai, dans des contextes différents de celui étudié, des courbes similaires associées à un résultat expérimental de qualité supérieure (Baguelin et al., 1978).

L'applicabilité de la technique a été démontrée, la réflexion et les moyens nécessaires à cet aboutissement ont été étalés. La technique permet de dériver un ensemble de paramètres mécaniques utiles, bien que préliminaires, issus de la caractérisation en chantier. Cette contribution est majeure pour l'étude du comportement des remblais miniers faits de résidus cimentés en service. Le présent mémoire est un recueil des moyens mis en œuvre dans le cadre de la campagne de terrain planifiée. Ce mémoire constitue une humble contribution, parmi plusieurs

diffusions, relatives à cette technique, déjà présentées (Ouellet et al, 1998b; Ouellet et Servant, 2000; Ouellet et al, 2001a; Ouellet et al, 2001b )

## **5.2 Recommandations**

Les configurations "sol" ou "roc" du pressiomètre, montrent toute la flexibilité de l'équipement sélectionné. Selon que les conditions de terrain soient favorables ou moins, les remblais peuvent être auscultés selon l'une d'elles. Il y a cependant un besoin pour définir quelles sont les plages de conditions qui favorisent une configuration plutôt que l'autre, ou aucune d'elles. Ainsi, la présence de stérile rocheux affecte grandement l'efficacité réelle de la configuration "sol" et rend même inutile la configuration "roc" si les granulats ne peuvent être évacués par les tiges de forage. Outre la distribution granulométrique, la raideur du remblai est susceptible de diminuer l'efficacité de l'outil aléteur. Aucune différence significative n'a été observée entre la lame et le tricône quant à la qualité subséquente de la courbe pressiométrique. Il est cependant plausible, sinon certain, que les remblais plus riches en liant, et donc plus rigide, affectent l'efficacité de l'outil aléteur et l'insertion. La distribution granulométrique des remblais et la teneur en liant devraient donc faire l'objet d'une étude plus approfondie pour mieux cerner les plages d'application de l'équipement.

Une donnée importante dérivée des essais pressiométriques réalisés est la contrainte latérale in situ. Elle est particulièrement sensible à la qualité de l'insertion. La qualité de l'insertion affecte l'allure de la courbe pressiométrique. À cet effet, le positionnement de l'outil aléteur par rapport au sabot peut être mis à contribution. Un outil trop en retrait de la position optimale favorise un sous-forage qui peut être comparé à l'insertion forcée au PIPT. Un outil aléteur trop prêt de la trousse coupante favorise au contraire un sur-forage typique au PBPT. La difficulté consiste à définir cette position optimale en fonction de l'efficacité de l'outil aléteur utilisé, pour un remblai donné. Un banc d'essai au pressiomètre en laboratoire peut être utile

à cette fin, là encore pour définir une plage de rendement basée sur l'obtention de courbes expérimentales de qualité.

Comme il peut être difficile de reproduire d'un emplacement à l'autre les mêmes conditions in situ (ségrégation, curage, altération, sollicitation), des essais au laboratoire sur un matériau contrôlé paraissent souhaitables. Un matériau contrôlé en laboratoire offrirait l'opportunité de comparer les courbes expérimentales au pressiomètre avec des celles d'essais triaxiaux, par exemple. Cela faciliterait grandement l'interprétation de l'essai pressiométrique dans les résidus miniers cimentés, interprétation qui est partielle pour l'instant. Il faut cependant garder à l'esprit qu'il s'agit de deux sollicitations mécaniques différentes et que la résistance obtenue selon l'une ou l'autre technique mène nécessairement à un certain degré de divergence (Clarke, 1995).

Plus spécifiquement à la mise en œuvre de l'essai sur le terrain, Ouellet et al. (2001b) proposent l'utilisation de six bras palpeurs diamétralement répartis sur une même section de la sonde, de manière à mesurer l'évolution de la cavité sur la base des diamètres plutôt que sur la base des changements de rayons. En effet, l'axe de la sonde est sujet à se déplacer en cours de l'essai (remaniement à l'insertion, anisotropie des contraintes, poids des tiges, etc.), affectant ainsi la réponse de chacun des palpeurs. En procédant à une analyse sur les diamètres, l'effet du déplacement de l'axe peut être corrigé, l'interprétation de l'essai facilitée.

## Références

- AFNOR (1991). Sols : Reconnaissances et essais : Essai pressiométrique Ménard. Association Française de Normalisation, Paris.
- Annor, A. (1990). Backfill alternatives in Ontario mines: CANMET Report MRL 90-147 (COMDA), 249p.
- ASTM (D 4719-87). Standard test method for pressuremeter testing in soils. pp. 831-838.
- Archibald, J.F. ; Lausch, P. ; He, Z.X. (1993) Quality control problems associated with backfill use in mines. Canadian Institute of Mining Bulletin, July-August, pp. 53-57.
- Baguelin, F. ; Jézéquel, J.F. ; Shields, D.H., (1978). The Pressuremeter and Foundation Engineering, Trans Tech Publications. 617p.
- Bawden, W.F. (2001). Discussion sur le remblai en pâte. Réunion tenue à l'Université McGill, Montréal, 5 juin 2001.
- Bishop, A.W. et Henkel, D.J. (1962). The measurement of soil properties in the triaxial test. Edward Arnold Publisher, 227p.
- Bloss, M.L. et Chen, J. (1998). Drainage research at Mount Isa Mines Limited 1992 - 1997. MineFill'98, Proc. 6th Int. Symp. on Mining with Backfill, Australasian Institute of Mining and Metallurgy , Brisbane, Australia, 14-16 April, pp 111-116.
- Börgesson (1981). Mechanical properties of hydraulic backfill. Proceedings of the Conference of Applied Rock Mechanics to Cut and Fill Mining, Lulea, Institute of Mining and Metallurgy, pp. 193-195.
- Barrett, J.R. (1973). Structural aspects of cemented fill behaviour. Proc. of the Jubilee Symposium on Mine Filling. Mount Isa, North West Queensland Branch, Australia, Aus. I. M. M., August, pp. 97-104.
- Barrett, J.R. et Cowling, R. (1980). Investigations of cemented fill stability in 1100 ore body, Mount Isa Mines Ltd., Queensland, Australia. International Mining and Metallurgical Transactions, section A, Vol. 89, pp. 118-128.
- Bissonnette, B. (1995). Paste fill plant operation at the Louvicourt Mine. Colloque sur le Remblai en Pâte. Val-d'Or, Canada. Sous l'ospice du Comité de recherche Technique minière et Traitement CANMET/Assoc. Minière du Québec. MRL95-140. Communication no. 6.

- Chang, T.S. et Woods, R.D. (1992). Effect of particle contact bond on shear modulus. *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 118, no. 8, pp. 1216-1233.
- Clarke, B.G. (1995). *Pressuremeter in Geotechnical Design*. Blackie Editor.
- Clough, G.W. et Bachus, R.C. (1981). An investigation of sampling disturbance in weakly cemented sand. Proc., Updating Subsurface Sampling and In-Situ Testing, Engrg. Foundation Conf, pp. 39-56.
- Coop, M.R. et Atkinson, J. H. (1993). The mechanics of cemented carbonate sands. *Géotechnique*, Vol. 43, No. 1, pp. 53-67.
- Cowling, R. et Gonano, L.P. (1976). Cemented rockfill practice and research at Mount Isa Mines. Symp. on Influence of excavation design and ground support on underground mining efficiency and costs. University of Wollongong, Australia. Australian Mineral Industries Research Association Limited, 15th May, pp. 11-43.
- Denby, G.M. et Clough, G.W. (1980). Self-Boring Pressuremeter Tests in Clay. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 106, GT12, pp. 1369-1387.
- Ferreira, R.S. et Robertson, P.K. (1992). Interpretation of undrained self-boring pressuremeter test results incorporating unloading. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.29, p. 918-928.
- Gibson, R.E. et Anderson, W.F. (1961) In-situ measurements of soil properties with the pressuremeter. *Civil Engineering and Public Works Review*, vol. 56, pp. 615-618.
- Gonano, L.P. (1975). In situ testing and size effect behaviour of cemented mine fill. Conf. Australian Geomechanics Society, Melbourne, Australia, 16 p.
- Gonano, L.P. (1977). Mechanical Properties of cemented hydraulic fill pillars. Tech. Report no. 36. Division of Applied Geomechanics, CSIRO. Melbourne, Australia, 18p.
- Gonano, L.P. et Kirby, R. W. (1977). In situ investigation of cemented rockfill in the 1100 orebody, Mount Isa Mine, Qld. Tech. Report no. 47. Division of Applied Geomechanics, CSIRO. Australia, 52p.
- Hawkins, P.G., Mair, R.J., Mathieson, W.G.; Muir Wood, D. (1990). Pressuremeter measurement of total horizontal stress in stiff clay. *Proceedings of Third International Symposium on Pressuremeters*. Thomas Telford. London. pp. 321-329.

- Hassani, F. et Archibald, J. (1998). Mine backfill. Book on CD-ROM. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum. 263p.
- Head, K.H. (1986). Manual of Soil Laboratory Testing, Vol. 1, 2 et 3. Pentech Press London. 1234p.
- Herget, G. et de Korompay, V. (1978). In-situ drainage properties of hydraulic backfills. Mining with Backfill, CIM Special Vol. 19, 12th Canadian Rock Mechanics Symposium. Mai 1978, Sudbury, Canada, pp. 117-123.
- Houlsby, G.T. et Withers, N.J. (1988). Analysis of the cone pressuremeter test in clay. Géotechnique, Vol. 38, no. 4, pp. 575-587.
- Huang, J.T. et Airey, D. (1993). Effects of cement and density on an artificially cemented sand. Geotechnical Engineering of Hard Soils-Soft Rocks. Proceedings of the International Symposium ISSMFE, IEAG and the ISRM. Athens, Greece, septembre 1993, Vol. 1, pp. 553-560.
- Hughes, J.M.O.; Wroth, C.P.; Windle, D. (1977). Pressuremeter tests in sands. Géotechnique, Vol. 27, no. 4, pp. 455-477.
- Jefferies, M.G. (1988). Determination of horizontal geostatic stress in clay with self-bored pressuremeter. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 25, no. 3, pp. 559-573.
- Ladanyi, B. (1963). Evaluation of pressuremeter tests in granular soils. Proc. 2nd Pan-Am. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brazil, Vol. 1, pp. 3-20.
- Mair, R.J. et Wood, D. M. (1987). Pressuremeter testing. Methods and Interpretation. Construction Industry Research and Information Association. Project 335. Publ. Butterworths, London.
- Marsland, A. et Randolph, M.F. (1977). Comparaisons of the results from pressuremeter tests and large in situ plate tests in London Clay. Géotechnique, vol. 27, pp. 217-243.
- Mitchell, R.J.; Smith, J.D.; Libby, D.J. (1975). Bulkhead pressures due to cemented hydraulic mine backfills. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 12, No.3, pp. 362-371.
- Mitchell, R.J. et Wong, B.C. (1982). Behavior of cemented tailings sands. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 19, pp. 289-295.
- Ouellet, J. (1994). Étude des propriétés mécaniques du remblai hydraulique à Mine Kiena. Rapport technique URSTM, P9394-R-1, 302p.

- Ouellet, J. (1995). Comportement contrainte-déformation du remblai hydraulique cimenté pour le remblayage minier. 48e Conférence Canadienne de Géotechnique. Tendances en Géotechnique, Vol. 1, Septembre 1995, pp. 25-32.
- Ouellet, J. et Servant, S. (1998). Numerical simulation of the drainage in a mining stope filled with hydraulic backfill. MineFill'98, Proc. 6th Int. Symp. on Mining with Backfill, Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Brisbane, Australia, 14-16 April, pp 105-110.
- Ouellet, J.; Benzaazoua, M.; Servant, S. (1998a). Mechanical, mineralogical and chemical characterization of a paste backfill. Proc. of the 5th Int. Conf. on Tailings and Mine Waste'98, Fort Collins, Colorado, USA, 26-28 janvier, pp. 139-146.
- Ouellet, J.; Bidwell, T.J.; Servant, S. (1998b). Physical and Mechanical Characterisation of Paste Backfill by Laboratory and In-situ Testing. MineFill'98, Brisbane, April 1998, pp. 249-254.
- Ouellet, J. et Servant, S. (2000). In situ mechanical characterization of a paste backfill with a self-boring pressuremeter. Canadian Institute of Mining Bulletin, Vol. 93, No. 1042, p. 110-115.
- Ouellet, J. (2001). Guide de design des barricades à remblais. Projet IRSST 95-032. (à paraître).
- Ouellet, J.; Hassani, F.; Servant, S. (2001a). Comparative study on cost of self-boring pressuremeter test vs coring in a mine backfill for fill mass characterization. CIM 2001, Annual Conf., Quebec City, 12 p. (à paraître).
- Ouellet, J.; Hassani, F.; Servant, S. (2001b). Practical aspects of in situ pressuremeter testing in a cemented mine backfill: logistic and implementation. MineFill 2001, Seattle, 13 p. (à paraître).
- Palmer, A.C. (1972). Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test. Géotechnique, Vol. 22, no. 3, pp. 451-457.
- Prévost, J. H. et Höeg, K. (1975). Analysis of Pressuremeter in Strain-Softening Soil. Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 101, GT8, pp. 717-732.
- Schnaid, F.; Ortiago, J.A.R. ; Mántaras, F.M. ; Cunha, R.P.; MacGregor, I. (2000). Analysis of self-boring pressuremeter (SBPM) and Marchetti dilatometer (DMT) tests in granite saprolites. Can. Geotech. J., Vol. 37, pp. 796-810.

- Scoble, M. J.; Piciacchia, L. and Capelle, J-F. (1986) Development of an In Situ Testing Technique for Backfill in Underground Mines. Proceedings 39th Canadian Geotechnical Conference. pp. 387-397, Ottawa.
- Scoble, M.J.; Piciacchia, L. and Robert, J.-M. (1987) In situ testing in underground backfilled stopes. CIM Bulletin , vol. 80, no. 903, pp. 33-38.
- Thibodeau, D. (1989). In situ determination of high density alluvial sand fill. Innovations in Mining Backfill Technology. 4th International Symposium on Mining with Backfill. Montréal, Canada, pp. 267-273.
- Thibodeau, D. (1991). In-situ determination of dewatered tailings fill properties in Ontario mines. Rapport final (avec appendices). CANMET Contract Report, no.91-04709, 316p. (sur 4 microfiches).
- Thomas, E.G.; Nantel, J.H.; Notley, K.R. (1979). Backfill technology in underground metalliferous mines. International Academic Services, Kingston, Ontario Canada, 293p.
- Timoshenko, S.P. et Goodier, J.N. (1934). Theory of elasticity, McGraw-Hill, New-York.
- Windle, D. et Wroth, C.P. (1977). In-situ measurement of the properties of stiff clays. Proc. 9th Int. Conf. Soils Mech. and Foundation Engineering. pp 347-352.
- Whittle, A.J.; Dalton, J.C.P.; Hawkins, P.G. (1993). Shear modulus and strain excursion in the pressuremeter test. Proceedings of the Wroth Memorial Symposium. G.T.Houlsby and A.N.Schofield Eds, Thomas Telford, 1992, London, pp.768-782.
- Yu, T.R. (1989). Some factors relating to the stability of consolidated rockfill at Kidd Creek. Innovations in Mining Backfill Technology. 4th International Symposium on Mining with Backfill. Montréal, Canada, pp. 279-286.
- Zhu, Z. (2001). Communication personnelle concernant ses travaux portant sur l'analyse de stabilité des remblais.