

**Titre:** Analyse d'essais pressiométriques en déchargement dans l'argile  
Title:

**Auteur:** Sophie Pelletier  
Author:

**Date:** 2004

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Pelletier, S. (2004). Analyse d'essais pressiométriques en déchargement dans l'argile [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7293/>

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/7293/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Vincenzo Silvestri  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

# **NOTE TO USERS**

This reproduction is the best copy available.





UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE D'ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES  
EN DÉCHARGEMENT DANS L'ARGILE

SOPHIE PELLETIER

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

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES  
(GÉNIE CIVIL)  
JANVIER 2004



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*

ISBN: 0-612-90852-6

*Our file* *Notre référence*

ISBN: 0-612-90852-6

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.

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.

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 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.

---

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

# Canadä

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE D'ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES  
EN DÉCHARGEMENT DANS L'ARGILE

présenté par: PELLETIER Sophie

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées  
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. KAHAWITA René, Ph.D., président

M. SILVESTRI Vincenzo, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. SOULIÉ Michel, D.Sc.A., membre

À mes parents et à ma sœur Catherine,  
pour leur soutien et leur encouragement.

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord, je tiens à remercier sincèrement mon directeur de recherche, Monsieur Vincenzo Silvestri, pour m'avoir permis de réaliser ce projet de recherche. Son encadrement et son enseignement, de même que l'aide financière qu'il m'a attribuée furent grandement appréciés.

Je tiens également à remercier Monsieur André Ducharme, technicien du laboratoire de géotechnique, pour sa disponibilité et ses précieux conseils. De plus, je souhaite témoigner ma reconnaissance à Monsieur Badr Benabdellah et Monsieur Hugo Longtin pour leur aide lors des longues journées de travail sur le site expérimental de Mascouche. Je remercie également Monsieur Hugo Longtin pour avoir effectué les nombreux essais de laboratoire et avoir mis à ma disposition tous les résultats obtenus.

## RÉSUMÉ

L'interprétation des essais pressiométriques se fait habituellement avec la phase chargement de l'essai. Cependant, certains auteurs ont introduit des méthodes d'interprétation des essais pressiométriques qui incluent la phase déchargement de l'essai. Puisque cette partie de l'essai est moins affectée par le remaniement du sol créé lors du préforage de la cavité, les paramètres déduits du déchargement représenteraient mieux le sol étudié.

Une vingtaine d'essais au pressiomètre Texam ont été réalisés dans l'argile raide de Mascouche. Les courbes pressiométriques issues de ces essais ont été corrigées puis ajustées pour éliminer les irrégularités présentes. Les courbes nettes ont été analysées en chargement et en déchargement selon un modèle élastique parfaitement plastique du sol. L'analyse des phases d'expansion et de contraction des courbes pressiométriques a mené à l'obtention de la résistance au cisaillement non drainé de l'argile par le calcul de la pente des courbes dans un graphique semi-logarithmique.

La comparaison des valeurs de résistance au cisaillement non drainé déduites des essais au pressiomètre avec les valeurs déterminées au scissomètre de chantier a permis de vérifier les résultats. Les valeurs de  $S_{u\text{-pressiomètre}}$  obtenues avec la phase de chargement sont en moyenne supérieures de 2.0 à 2.7 par rapport aux valeurs de  $S_{u\text{-scisso}}$ . Cette surestimation de la résistance par le pressiomètre est connue et a déjà été discutée dans la littérature.

La comparaison des valeurs de résistance au cisaillement provenant de la phase de chargement du pressiomètre avec les valeurs obtenues à partir des courbes des essais au cône effilé instrumenté (ISCT) a aussi permis de valider les résultats obtenus. Les

valeurs de  $S_u$ -pressiomètre sont supérieures de 18% aux valeurs de  $S_u$ -ISCT. Cette sous-estimation des valeurs de  $S_u$ -ISCT survient lorsque l'interprétation de ces essais se fait en calculant la pente suivie par les points de mesure dans un graphique logarithmique. Elle est due à la dispersion des points de mesure qui rend difficile la distinction des phases élastiques et plastiques des déformations. Par contre, si on compare les valeurs de  $S_u$ -pressiomètre avec les  $S_u$ -ISCT déduits par la méthode d'interprétation de Ladanyi, les valeurs sont plus ou moins du même ordre de grandeur.

Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé provenant du chargement sont également supérieures à celles obtenues à partir du déchargement. La modélisation des courbes théoriques à partir des données pressiométriques expérimentales a permis de constater que l'hypothèse assumée par la méthode d'interprétation selon laquelle la résistance au cisaillement lors du déchargement est le double de celle lors du chargement ne s'applique pas à l'argile de Mascouche.

Cette étude conclut finalement que l'analyse en déchargement des essais pressiométriques pourrait être une méthode simple et efficace de déterminer  $S_u$  dans la mesure où le rapport des résistances lors du déchargement et chargement est connu.

## ABSTRACT

Interpretation of pressuremeter data in clay including the unloading section of the pressuremeter curve is thought to be a good method to gain information about soil properties. These properties may be more representative of the clay since soil disturbance may be less important during the unloading part of the pressuremeter test.

Twenty prebored pressuremeter tests were carried out in the stiff clay of Mascouche. The undrained shear strengths have been deduced from the analysis of the loading section as well as the unloading section of the pressuremeter curves by using an elastic-perfectly plastic soil model.

The undrained shear strengths deduced from the loading part of the pressuremeter tests are overestimated by a factor of 2.0 to 2.7 compared to the field vane undrained shear strength. This overestimation of  $S_u$  from the pressuremeter is known and has already been discussed in many papers.

The comparison of the undrained shear strength deduced from the loading part of the pressuremeters tests with the undrained shear strength deduced from the Instrumented Sharp Cone Test (ISCT) curves shows values 18% higher with the pressuremeter tests. The method of interpretation of the ISCT curves is responsible for this underestimation of the  $S_u$  values derived from the ISCT tests.

The undrained shear strength values deduced from the loading part of the pressuremeter curves are also higher than those deduced from the unloading part of the curves. Modelling of the theoretical pressuremeter curves from the experimental data shows that the ratio of the unloading strength of the clay to the loading strength should not be

assumed to be 2 as it is in the method of interpretation used to deduce  $S_u$  from the unloading part the pressuremeter tests.

It is finally concluded from this study that the analysis of the unloading part of a pressuremeter tests may be a simple and effective method to deduce  $S_u$  as long as the unloading/loading strength ratio of the clay is known.

**TABLE DES MATIÈRES**

<b>DÉDICACE .....</b>	iv
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	v
<b>RÉSUMÉ .....</b>	vi
<b>ABSTRACT .....</b>	viii
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	x
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	xiii
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	xiv
<b>LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....</b>	xvi
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	xix
<b>CHAPITRE 1 INTRODUCTION .....</b>	1
<b>CHAPITRE 2 THÉORIE.....</b>	5
2.1 Expansion d'une cavité cylindrique : concept de base .....	5
2.2 Résistance au cisaillement non drainé d'une argile à partir du chargement .....	9
2.2.1 Théorie de Gibson et Anderson .....	10
2.2.2 Méthode de Baguelin et al. ....	15
2.2.3 Méthode de Ladanyi .....	19
2.2.4 Méthode de Palmer .....	26

2.3 Résistance au cisaillement non drainé d'une argile à partir du déchargement .....	29
2.3.1 Contraction d'une cavité cylindrique.....	30
2.3.2 Détermination de $S_u$ par construction graphique .....	34
<b>CHAPITRE 3 EXPÉRIMENTATION .....</b>	<b>37</b>
3.1 Description du site .....	37
3.1.1 Localisation du site .....	38
3.1.2 Propriétés géotechniques .....	41
3.2 Pressiomètre Texam.....	46
3.2.1 Description du pressiomètre Texam .....	47
3.2.2 Remplissage et saturation .....	49
3.2.3 Calibration .....	51
3.3 Procédure des essais pressiométriques .....	52
3.3.1 Préparation du trou.....	53
3.3.2 Installation de la sonde .....	54
3.3.3 Exécution de l'essai .....	55
3.3.4 Modifications du pressiomètre.....	58
3.4 Traitement des données .....	59
3.4.1 Correction des valeurs de pression .....	60
3.4.2 Courbes pressiométriques .....	64
3.4.2.1 Chargement.....	66
3.4.2.2 Déchargement .....	68
3.4.3 Modélisation des courbes pressiométriques .....	72
3.5 Cône effilé instrumenté (ISCT) .....	74
3.5.1 Description du cône effilé instrumenté.....	75
3.5.2 Traitement des données .....	77

<b>CHAPITRE 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>79</b>
4.1 Présentation des résultats.....	79
4.1.1 Codification des essais.....	80
4.1.2 Description des essais .....	80
4.1.3 Courbes pressiométriques nettes.....	88
4.1.4 Valeurs de résistance au cisaillement non drainé .....	91
4.2 Comparaison des résultats et discussion.....	92
4.2.1 Pressiomètre vs scissomètre.....	92
4.2.2 Pressiomètre vs cône effilé instrumenté .....	97
4.2.3 Modélisation des courbes pressiométriques .....	99
<b>CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>110</b>
5.1 Conclusions.....	111
5.2 Recommandations.....	112
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>114</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>117</b>

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 3-1 Exemple d'un tableau de données pressiométriques .....	63
Tableau 3-2 Déformation calculée au niveau de chaque capteur du cône effilé instrumenté.....	77
Tableau 4-1 Profondeurs des essais pressiométriques .....	81
Tableau 4-2 Valeurs de la résistance au cisaillement non drainé déterminées avec les essais au pressiomètre sur le site de Mascouche.....	91
Tableau 4-3 Comparaison des valeurs de $S_u$ au pressiomètre avec le scissomètre.....	94
Tableau 4-4 Comparaison des valeurs de $S_u$ provenant des essais au.....	98
Tableau 4-5 Paramètres utilisés pour la modélisation à partir des $S_u$ trouvés avec le déchargement.....	102
Tableau 4-6 Paramètres utilisés pour la modélisation à partir de $S_u$ du chargement et de $2S_u$ du déchargement.....	104
Tableau 4-7 Valeurs de $\tau_{ult}$ et $\tau^*_{ult}$ d'après le chargement et le déchargement.....	107

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	État initial d'une cavité cylindrique dans un milieu infini .....	6
Figure 2.2	État initial et déformé des éléments $dr$ et $rd\theta$ .....	7
Figure 2.3	État initial et déformé d'un élément de volume proche d'une cavité cylindrique .....	8
Figure 2.4	État des contraintes sur un élément déformé.....	9
Figure 2.5	Coordonnées de l'élément de volume .....	16
Figure 2.6	Courbe de cisaillement du sol .....	17
Figure 2.7	Courbe pressiométrique et courbe élémentaire de cisaillement en petites déformations .....	19
Figure 2.8	Courbe contrainte-déformation assumée et réelle pour l'expansion d'une cavité cylindrique considérée comme un assemblage de cylindres.....	20
Figure 2.9	Variation réelle et assumée de la résistance mobilisée $q$ avec le rayon $r$ et variation résultante de la contrainte radial totale $\sigma_r$ .....	21
Figure 2.10	Courbe de pression-expansion.....	22
Figure 2.11	Résultat d'un essai pressiométrique dans l'argile de Leda.....	24
Figure 2.12	Courbe pressiométrique idéale avec une échelle semi-logarithmique .....	25
Figure 2.13	Courbe contrainte-déformation non drainé déduite de la courbe pressiométrique.....	26
Figure 2.14	Schéma de la cavité à l'état de référence et à l'état déformé .....	28
Figure 2.15	Étapes d'un essai pressiométrique.....	31
Figure 2.16	Construction graphique permettant de déterminer $S_u$ .....	35
Figure 2.17	Détermination logarithmique de $S_u$ .....	36
Figure 3.1	Carte de la ville de Mascouche et des environs.....	39
Figure 3.2	Plan de localisation du site de Mascouche .....	40
Figure 3.3	Plan de localisation des essais .....	41

Figure 3.4 Propriétés géotechniques du site de Mascouche .....	45
Figure 3.5 Cheminements en contraintes effectives lors d'essais CIU réalisés sur des échantillons prélevés à 4m.....	46
Figure 3.6 Schéma descriptif de la boîte de lecture du pressiomètre .....	48
Figure 3.7 Schéma de la sonde pressiométrique.....	49
Figure 3.8 Schéma du circuit hydraulique du pressiomètre.....	50
Figure 3.9 Sonde pressiométrique .....	55
Figure 3.10 Pressiomètre Texam .....	56
Figure 3.11 Relation entre le volume injecté et la déformation radiale.....	57
Figure 3.12 Courbe de calibration du pressiomètre .....	60
Figure 3.13 Courbe pressiométrique typique montrant le chargement et le déchargement .....	65
Figure 3.14 Exemple de la détermination de $S_u$ à partir de la portion chargement d'une courbe pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique .....	68
Figure 3.15 Courbe de déchargement typique .....	70
Figure 3.16 Courbe de déchargement modifiée pour devenir croissante .....	71
Figure 3.17 Exemple de la détermination de $S_u$ à partir de la portion déchargement d'une courbe pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique .....	72
Figure 3.18 Cône effilé instrumenté .....	75
Figure 3.19 Profil de la contrainte latérale d'un essai au cône effilé instrumenté.....	76
Figure 3.20 Exemple de la détermination de $S_u$ à partir des données du cône effilé instrumenté.....	78
Figure 4.1 Courbe pressiométrique corrigée.....	88
Figure 4.2 Courbe pressiométrique nette.....	89
Figure 4.3 Courbe pressiométrique corrigée montrant une chute de pression.....	90
Figure 4.4 Courbe pressiométrique nette .....	90
Figure 4.5 Modélisation de la courbe pressiométrique à partir de $S_{u-déch}$ .....	101
Figure 4.6 Modélisation d'une courbe pressiométrique à partir de $S_{u-ch}$ et de $2S_{u-déch}$ .....	103
Figure 4.7 Modèle proposé par Ferreira et Robertson .....	106

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

a	rayon de la cavité pendant l'expansion (Gibson et Anderson, 1961)
$a_0$	rayon initial de la cavité (Gibson et Anderson, 1961 et Ladanyi, 1972)
$c'$	cohésion effective
D	diamètre de la sonde
$D_0$	diamètre initial de la sonde
dr	élément linéaire orienté radialement
E	module de Young
G	module de cisaillement
$G_{ch}$	module de cisaillement de la phase de chargement
$G_{déch}$	module de cisaillement de la phase de déchargement
$h_w$	profondeur de la nappe phréatique
$I_p$	indice de plasticité
ISCT	Instrumented Sharp Cone Test
NT	sous-tangente de la courbe pressiométrique
OZ	axe de la cavité
$P_{corr}$	pression corrigée
$P_{corr\ e}$	pression corrigée à déformation maximale
$P_{déch}$	pression transformée pour l'interprétation du déchargement
$P_{lue}$	pression mesurée par le pressiomètre
$P_{membrane}$	résistance de la membrane
PMT	pressiomètre
p	pression appliquée
$p_0$	pression initiale sur la paroi de la cavité
$p_L$	pression limite
prof.	profondeur
q	déviateur

R	rayon à l'interface des phases élastiques et plastiques
$R_0$	rayon initial de la sonde
$R_e$	rayon maximal de la sonde
$R_i$	rayon de la sonde (Houlsby et Withers, 1988)
r	distance radiale d'un élément avant expansion de la cavité
$r_0$	rayon initial de la cavité
$r_i$	distance radiale à l'incrément $i$
$rd\theta$	élément linéaire perpendiculaire au rayon de la cavité
$S_u$	résistance au cisaillement non drainé
$S_{u-ch}$	résistance au cisaillement non drainé déduite du chargement des essais pressiométrique
$S_{u-déch}$	résistance au cisaillement non drainé déduite du déchargement des essais pressiométrique
$S_{u-moyen}$	résistance au cisaillement non drainé moyenne
$S_{u-pressiomètre}$	résistance au cisaillement non drainé déduite des essais pressiométrique
$S_{u-scisso}$	résistance au cisaillement non drainé déduite des essais au scissomètre
u	déplacement radial d'un élément
$u_{r0}$	déplacement radial à la paroi de la cavité
V	volume de la sonde
$V_0$	volume initial de la sonde
$V_m$	volume mesuré (Ladanyi, 1972)
$V_{mo}$	volume de la sonde à $p=p_0$ (Ladanyi, 1972)
y	déplacement radial (Palmer, 1972)
$w_N$	teneur en eau naturelle
$\beta$	rapport de la résistance au déchargement sur la résistance au chargement
$\gamma$	déformation moyenne (Ladanyi, 1972)
$\Delta p$	augmentation de pression dans la cavité
$\Delta R$	augmentation radiale de la sonde
$\Delta V$	augmentation de volume de la sonde

$\varepsilon$	extension circonférentielle (Palmer, 1972)
$\varepsilon_0$	déformation à la paroi de la cavité
$\varepsilon_{\text{déch}}$	déformation transformée pour l'interprétation du déchargement
$\varepsilon_e$	déformation maximale
$\varepsilon_f$	déformation au maximum de la courbe de cisaillement
$\varepsilon_r$	déformation radiale
$\varepsilon_\theta$	déformation circonférentielle
$\nu$	coefficient de Poisson
$\rho$	distance radiale d'un élément après expansion de la cavité (Baguelin et al., 1972)
$\sigma_{h0}$	pression horizontale des terres au repos
$\sigma'_p$	pression de préconsolidation
$\sigma_r$	contrainte radiale
$\sigma_\theta$	contrainte circonférentielle
$\tau$	contrainte de cisaillement
$\tau_{\text{ult}}$	résistance ultime atteinte lors du chargement
$\tau^*_{\text{ult}}$	résistance ultime atteinte lors du déchargement
$\Phi$	différence des contraintes (Palmer, 1972)
$\phi'$	angle de frottement interne effectif
$\Psi$	pression appliquée (Palmer, 1972)
$\psi$	pression à la surface du pressiomètre
$\psi_e$	pression appliquée au maximum d'expansion

**LISTE DES ANNEXES**

<b>ANNEXE A .....</b>	117
<b>ANNEXE B .....</b>	124
<b>ANNEXE C .....</b>	128
<b>ANNEXE D .....</b>	145
<b>ANNEXE E .....</b>	148
<b>ANNEXE F .....</b>	157

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

Les essais au laboratoire et in-situ constituent les deux méthodes employées par les géotechniciens pour la caractérisation des sols. Bien que les essais au laboratoire permettent de déterminer une quantité de paramètres plus importante qu'avec les essais in-situ, ces derniers ont l'avantage d'être beaucoup plus représentatifs du sol étudié. En effet, l'échantillonnage nécessaire pour l'exécution des essais au laboratoire ne peut se faire sans un certain remaniement du sol pouvant influencer les résultats obtenus. Plusieurs types d'essais in-situ ont ainsi été développés au cours des dernières décennies afin de déterminer les propriétés mécaniques des sols.

L'ancêtre du pressiomètre a été inventé dans les années 1930 par l'ingénieur allemand Koegler (Baguelin et al., 1978). Celui-ci fut le premier à concevoir un appareil afin de réaliser un essai de chargement latéral dans un forage. Le dispositif imaginé par Koegler était composé de deux demi-coques cylindriques pouvant s'écartier pour appliquer une contrainte sur la paroi du forage. Le déplacement des demi-coques permettait de connaître la déformation correspondante du sol, et une courbe contrainte-déformation pouvait être tracée. L'appareil conçu par Koegler ne connut pas le succès espéré et fut malheureusement vite oublié.

C'est à Louis Ménard, ingénieur français de l'École des Ponts et Chaussées, que l'on doit le premier pressiomètre en 1957. Les premiers essais pressiométriques furent

réalisés aux Etats-Unis pendant les études de maîtrise de Louis Ménard à l'Université de l'Illinois. À son retour en France, il commercialisa le pressiomètre d'abord en France puis à l'échelle internationale.

Les théories d'interprétation des essais pressiométriques ont beaucoup évolué depuis celle présentée par Ménard à la fin des années 1950. Gibson et Anderson proposèrent en 1961 une méthode d'interprétation basée sur un comportement élastique-parfaitement plastique du sol. En 1972, Baguelin et al., Ladanyi et Palmer développèrent simultanément une méthode d'interprétation basée sur celle de Gibson et Anderson, mais qui n'impose aucun comportement au sol.

La première version du pressiomètre Ménard, composé de trois cellules, a également subi plusieurs transformations avec les années. Le pressiomètre autoforeur, introduit dans les années 1970, permet de minimiser le remaniement dû au pré-forage nécessaire à la réalisation de l'essai. Bien que plusieurs améliorations aient été apportées au pressiomètre, le remaniement des parois de la cavité reste un des problèmes majeurs reliés à cet essai. Cet inconvénient a amené certains auteurs à considérer principalement la partie déchargement de l'essai pressiométrique, correspondant au dégonflement de la sonde suite à son expansion, pour la détermination des paramètres du sol.

En 1988, Housby et Withers, de même que Jefferies, ont proposé une méthode d'interprétation du déchargement d'un essai pressiométrique, moins sensible au remaniement que le chargement, basée sur les théories déjà utilisées. Ces deux méthodes considèrent le sol argileux comme ayant un comportement élastique-parfaitement plastique. En 1992, Ferreira et Robertson ont développé une méthode d'interprétation des essais pressiométriques en déchargement selon un modèle de comportement hyperbolique du sol. Finalement, en 1995, Pye a présenté une comparaison des théories élastique-parfaitement plastique et hyperbolique pour interpréter les essais pressiométriques en chargement et en déchargement.

Bien que peu fréquente, l'utilisation de la phase de déchargement pour interpréter les essais au pressiomètre semble un moyen efficace de contourner le remaniement des parois de la cavité qui peut fausser les paramètres du sol, dont la résistance au cisaillement non drainé qui est le principal paramètre déterminé avec les méthodes citées ci-dessus. Afin de vérifier la validité des valeurs de résistance au cisaillement non drainé déterminées avec la phase de déchargement d'un essai pressiométrique et de mieux comprendre le comportement de l'argile lors du déchargement, l'analyse en chargement et en déchargement de plusieurs courbes pressiométriques constitue l'essentiel de ce travail.

Pour y parvenir, plusieurs essais au pressiomètre Texam ont été effectués dans un sol argileux près de la région de Montréal. Des essais au scissomètre de chantier, au cône effilé instrumenté, de même que des essais de caractérisation en laboratoire ont également été réalisés. L'analyse de ces différents essais a permis la détermination de la résistance au cisaillement non drainé de l'argile. Une comparaison des valeurs de  $S_u$  obtenues avec ces nombreux essais a pu être faite et a ainsi aidé à la validation des valeurs de la résistance au cisaillement non drainé déterminées avec les essais au pressiomètre. La modélisation du comportement de l'argile à partir des essais pressiométriques a également été effectuée et a permis de mieux comprendre les résultats obtenus.

Ce travail présente d'abord la théorie de base et les principales méthodes d'interprétation des essais pressiométriques développées depuis les débuts du pressiomètre Ménard, que ce soit pour la phase de chargement ou pour celle de déchargement. Par la suite, un chapitre est consacré à l'expérimentation, comprenant la description du site à l'étude, la description du pressiomètre utilisé et la procédure des essais, et finalement le traitement des données et les méthodes d'interprétation utilisées. Le chapitre suivant présente les résultats obtenus et les comparaisons qui en ont été faites pour permettre la validation des valeurs de résistance au cisaillement non drainé, de même que les modélisations

faites à partir des essais et montrant le comportement de l'argile. Finalement, le mémoire présente la conclusion de cette étude et les recommandations à considérer pour répondre à certains points soulevés dans ce travail.

## CHAPITRE 2

### THÉORIE

L'essai pressiométrique consiste en l'expansion d'une sonde cylindrique dans un sol. Les données obtenues avec cet essai sont généralement présentées sous forme d'une courbe représentant la pression appliquée par le pressiomètre en fonction de la déformation volumétrique ou radiale de la sonde cylindrique. La première portion de cette courbe correspond à l'expansion de la sonde ou au chargement, et la deuxième portion de la courbe représente la contraction de la sonde ou le déchargement. La théorie de base qui permet l'interprétation d'un tel essai s'appuie sur la théorie d'expansion d'une cavité cylindrique de longueur infinie dans un milieu isotrope infini. Avec les années, des théories plus complexes ont été développées mais le concept de base de l'expansion d'une cavité cylindrique sera d'abord présenté.

#### 2.1 Expansion d'une cavité cylindrique : concept de base

Considérons une cavité cylindrique de rayon initial  $r_0$  et de longueur infinie dans un sol infini, isotrope et homogène. L'axe de la cavité est vertical et représente la direction  $OZ$ . La pression initiale  $p_0$  existant sur la paroi de la cavité correspond à la pression horizontale des terres au repos,  $\sigma_{ho}$ , présente également dans toute la masse de sol (figure 2.1).

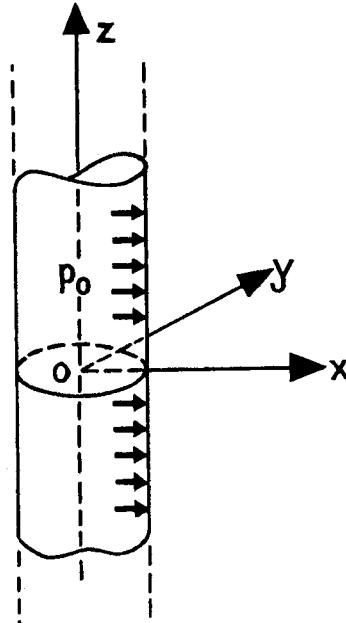


Figure 2.1 État initial d'une cavité cylindrique dans un milieu infini  
(tirée de Baguelin et al., 1978)

Lorsque la pression initiale augmente de  $\Delta p$  dans la cavité, la paroi se déplace vers l'extérieur et les déformations se font uniquement dans le plan horizontal. Il s'agit donc d'une déformation plane et seul le plan  $X-Y$  est considéré. L'expansion de la cavité cause le déplacement  $u$  d'un élément initialement situé à une distance radiale  $r$ , et se retrouvant dans l'état déformé à une distance  $\rho = r + u$  (figure 2.2).

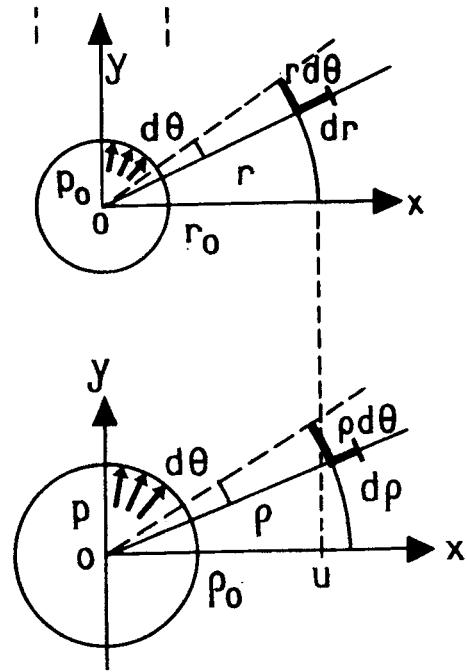


Figure 2.2 État initial et déformé des éléments  $dr$  et  $rd\theta$  (tirée de Baguelin et al., 1978)

Un élément linéaire  $dr$  orienté radialement subira une contraction, alors qu'un élément linéaire  $rd\theta$  augmentera de longueur tout en restant perpendiculaire à  $dr$ . Les directions radiale et circonférentielle représentent donc les directions principales et les déformations correspondantes,  $\varepsilon_r$  et  $\varepsilon_\theta$ , sont données par:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{(r+u)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r}$$

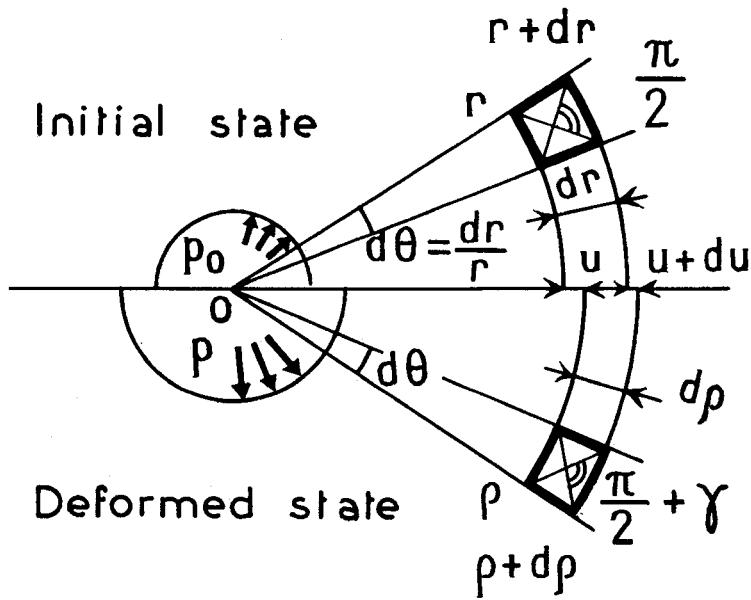


Figure 2.3 État initial et déformé d'un élément de volume proche d'une cavité cylindrique (tirée de Baguelin et al., 1978)

La figure 2.3 montre les déformations subies par un élément de volume suite à l'expansion de la cavité alors que la figure 2.4 montre l'état des contraintes agissant sur l'élément de volume. Une seule équation d'équilibre décrivant cet état existe dans le plan horizontal pendant l'augmentation du rayon  $r$  à petites déformations :

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

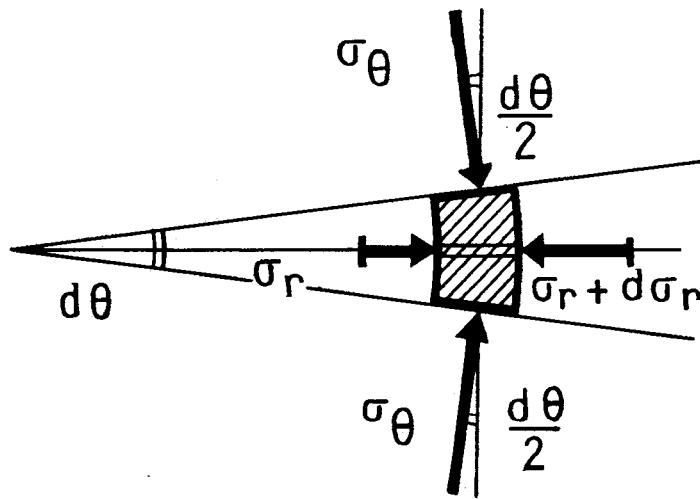


Figure 2.4 État des contraintes sur un élément déformé (tirée de Baguelin et al., 1978)

Cette équation d'équilibre est la base de toutes les méthodes développées afin d'analyser les courbes pressiométriques. Les sections suivantes présentent certaines de ces méthodes, principalement celles qui permettent de déterminer la résistance au cisaillement non drainé de l'argile.

## 2.2 Résistance au cisaillement non drainé d'une argile à partir du chargement

La résistance au cisaillement non drainé d'une argile est un des principaux paramètres qui peut être déduit d'un essai pressiométrique. Plusieurs relations permettent de définir la résistance au cisaillement non drainé pendant l'expansion de la cavité lors de l'essai. Le fait que l'essai soit réalisé rapidement dans un sol peu perméable comme une argile permet de le considérer comme un essai non drainé, d'où l'obtention de  $S_u$ . Parmi les premières méthodes d'interprétation à avoir été développées, on retrouve celles de Ménard(1956) et Gibson et Anderson(1961) qui supposent un comportement élastique-parfaitement plastique du sol. En 1972, Baguelin et al., Ladanyi et Palmer ont proposé chacun une méthode permettant non seulement de définir la résistance au cisaillement

non drainé du sol, mais également toute la courbe contrainte-déformation de ce sol. De plus, ces méthodes n'imposent aucune loi de comportement au sol et sont donc plus réalistes. Bien que le développement des trois méthodes diffère, le résultat est similaire. La théorie de Gibson et Anderson est d'abord présentée, suivie des trois méthodes décrites par Baguelin et al., Ladanyi et Palmer.

### 2.2.1 Théorie de Gibson et Anderson

La théorie développée par Gibson et Anderson s'applique au pressiomètre Ménard standard, dont la sonde doit être descendue dans un trou pré-foré. Le but de l'analyse faite par ces auteurs est de déterminer une relation théorique entre le volume de la sonde pressiométrique et la pression radiale appliquée afin d'obtenir le module de Young  $E$  et les caractéristiques de résistance du sol étudié.

Gibson et Anderson supposent un forage de rayon  $a_0$  dans un sol argileux. La pression radiale initiale  $p_0$  présente dans le sol devient nulle suite au forage, mais les conditions initiales sont retrouvées lorsque la pression dans la sonde devient égale à la valeur  $p_0$ . La relation entre l'augmentation de la pression  $\Delta p$  et le rayon de la cavité peut être calculée en se basant sur une analyse élastique si la contrainte radiale est augmentée de  $\Delta p$  et si un comportement linéaire de l'argile est assumé jusqu'à ce que le déviateur des contraintes atteigne  $2S_u$ .

En partant de la théorie de l'expansion d'une cavité cylindrique décrite précédemment, Gibson et Anderson montrent que, tant que le sol demeure dans la phase élastique, la contrainte radiale totale à une distance  $r$  du centre de la cavité est donnée par :

$$\sigma_r = p_0 + \Delta p \frac{a_0^2}{r^2}$$

et le déplacement radial de la paroi de la cavité par :

$$u(a_0) = \Delta p \left[ \frac{(1+\nu)}{E} \right] a_0$$

où  $\nu$  est le coefficient de Poisson. Ces équations sont valides uniquement si le déviateur est inférieur à  $2S_u$ . Donc :

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| < 2S_u \quad \text{pour } r \geq a_0$$

et aussi :

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = 2\Delta p \left( \frac{a_0^2}{r^2} \right)$$

Ensuite, la phase plastique est initiée d'abord au niveau de la paroi de la cavité lorsque la pression appliquée devient :

$$p = p_0 + S_u$$

et le rayon de la cavité est alors :

$$a_0 + u(a_0) = a_0 + \left[ \frac{(1+\nu)}{E} \right] a_0 S_u$$

Lorsque la pression est augmentée au-delà de  $p_0 + S_u$ , un anneau plastique d'argile s'étend de la paroi de la cavité,  $r = a$ , jusqu'à un rayon  $r = R$ , où les rayons  $a$  et  $R$  sont tous deux fonction de  $p$ . L'équation d'équilibre décrite à la section précédente doit exister à l'intérieur de l'anneau plastique, et en tout temps la rupture est atteinte lorsque :

$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = 2S_u, \quad a \leq r \leq R$$

En sachant que  $\sigma_r = p$  pour  $r = a$ , et à partir de l'équation d'équilibre et de l'équation précédente, la contrainte radiale peut être déterminée de la manière suivante :

$$\sigma_r = p - 2S_u \ln\left(\frac{r}{a}\right)$$

et à l'interface entre les régions plastique et élastique, soit à  $r = R$  :

$$\sigma_{r=R} = p - 2S_u \ln\left(\frac{R}{a}\right)$$

De plus, le déplacement radial au rayon  $R$  depuis le début où  $p = p_0$  est donné par :

$$u(R) = \left[ \frac{(1+\nu)}{E} \right] R \left[ p - 2S_u \ln\left(\frac{R}{a}\right) - p_0 \right]$$

Juste à l'intérieur de la région élastique, au point où  $r = R$ , l'argile est sur le point de devenir plastique et la pression à ce niveau est décrite par :

$$p = p_0 - 2S_u \ln\left(\frac{R}{a}\right) = S_u$$

et

$$u(R) = \left[ \frac{(1+\nu)}{E} \right] R S_u$$

Puisque l'essai est fait rapidement dans l'argile, il est considéré comme un essai non drainé. Ceci implique que le volume du sol reste constant durant l'essai. Donc, le volume de l'anneau d'argile compris entre  $a$  et  $R$ , soit  $\pi(R^2 - a^2)$  demeure constant. Au moment où la pression appliquée correspond à la pression initiale  $p_0$ , cet anneau est compris dans l'intervalle suivant :

$$a_0 + p_0 \left[ \frac{(1+\nu)}{E} \right] a_0 \leq r \leq R - u(R)$$

et son volume correspond à :

$$\pi \left[ [R - u(R)]^2 - \left\{ a_0 + p_0 \left[ \frac{(1+\nu)}{E} \right] a_0 \right\}^2 \right]$$

Ces deux volumes sont égaux étant donné l'état non drainé. Donc, en négligeant certains termes très petits, l'égalité des volumes donne :

$$\left( \frac{R}{a} \right)^2 + \frac{(a_0/a)^2 p_0}{S_u} = \left[ \frac{E}{2(1+\nu)S_u} \right] \left[ 1 - \left( \frac{a_0}{a} \right)^2 \right]$$

Cette équation permet de déterminer la relation entre le rayon  $a$  de la cavité et la pression  $p$  appliquée, ce qui donne :

$$p = p_0 + S_u + S_u \ln \left\{ \left[ \frac{E}{2(1+\nu)S_u} \right] \left[ 1 - \left( \frac{a_0}{a} \right)^2 \right] - \frac{(a_0/a)^2 p_0}{S_u} \right\}$$

Gibson et Anderson résument les différentes étapes d'un test pressiométrique de la manière suivante :

Étape 1 : Lorsque la pression augmente de zéro à  $p_0$ , soit la pression horizontale initiale, la relation suivante est valable :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{2p(1+\nu)}{E}, \quad 0 \leq p \leq p_0$$

Étape 2 : Dans la phase élastique, lorsque la pression augmente de  $p_0$  à  $p + S_u$ , la relation précédente est également valable, avec  $V_0$  correspondant au volume initial de la sonde.

Étape 3 : Une fois que la phase plastique est initiée, lorsque la pression est supérieure à  $p + S_u$ , la relation suivante s'applique :

$$p = p_0 + S_u + S_u \ln \left\{ \left[ \frac{E}{2(1+\nu)S_u} \right] \frac{\Delta V}{V} - \frac{(1-\Delta V/V)p_0}{S_u} \right\}$$

où  $V$  correspond au volume total  $V_0 + \Delta V$ . Afin de trouver la valeur de  $S_u$ , Gibson et Anderson proposent de réécrire l'équation précédente de la manière suivante :

$$p = p_L + S_u \ln \left[ \frac{\Delta V}{V} - \frac{2(1-\Delta V/V)(1+\nu)p_0}{E} \right]$$

où  $p_L$  correspond à la pression limite. En présentant les résultats obtenus avec l'essai pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique de la pression en fonction de  $\Delta V/V$ , et considérant que  $p_0/E$  est petit par rapport à  $\Delta V/V$ , la phase plastique apparaît comme une droite.  $S_u$  peut être déterminé en considérant deux points sur cette droite, en

égalant  $p_L$  dans l'équation précédente pour les deux points et en négligeant le dernier terme, ce qui permet de trouver :

$$S_u = \frac{p_2 - p_1}{\ln \frac{\Delta V}{V_2} - \ln \frac{\Delta V}{V_1}}$$

Cette méthode permet de déduire  $S_u$  d'une manière simple et efficace. La faiblesse de cette méthode se trouve dans l'hypothèse d'un sol élastique-parfaitement plastique qui peut ne pas être représentatif du sol étudié. C'est pour cette raison que certains auteurs ont développé des méthodes d'interprétation qui n'imposent pas de modèle de comportement au sol. Ces méthodes sont présentées dans les sections suivantes.

### 2.2.2 Méthode de Baguelin et al.

Selon Baguelin et al. (1972) et d'après la théorie d'expansion d'une cavité cylindrique, un élément de volume de coordonnées  $dr, d\theta$  et  $dz$ , situé dans le sol à une distance  $r$  de l'axe  $OZ$  d'une cavité cylindrique, subit une déformation plane et est déplacé de manière telle que le rayon devient  $\rho = r + u$ , lorsque la cavité est gonflée (figure 2.5).

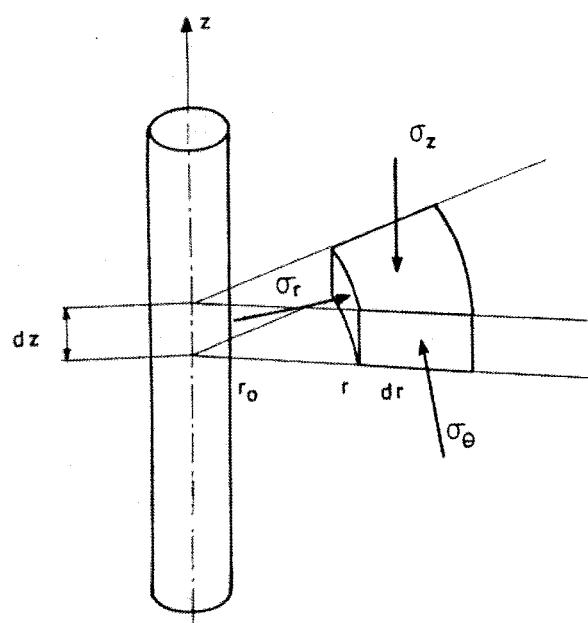


Figure 2.5 Coordonnées de l'élément de volume (tirée de Baguelin et al., 1972)

Puisque les contraintes initiales sont uniformes, on peut écrire :

$$\frac{\Delta(\sigma_r - \sigma_\theta)}{\rho} + \frac{d(\Delta\sigma_r)}{d\rho} = 0$$

Comme il n'y a pas de rotation des contraintes, Baguelin et al. supposent que le comportement du sol peut être défini par une seule relation, soit que le déviateur est fonction de la déformation  $\varepsilon_\theta$  (figure 2.6) :

$$\tau = \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{2} = f(\varepsilon_\theta)$$

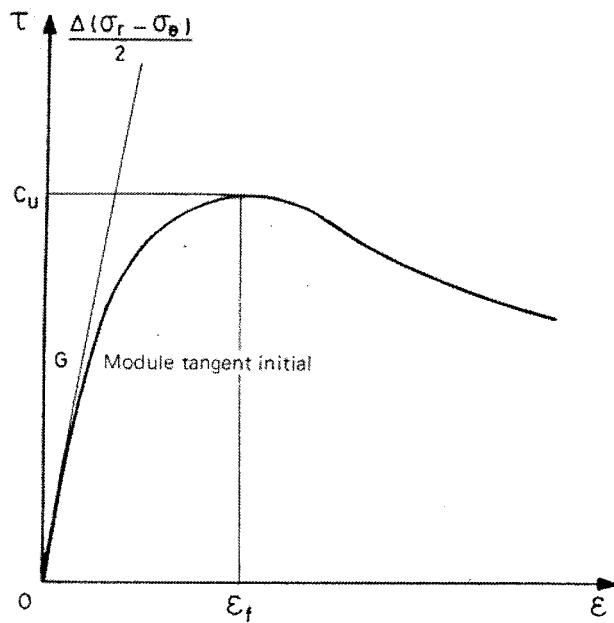


Figure 2.6 Courbe de cisaillement du sol (tirée de Baguelin et al., 1972)

La relation d'équilibre devient :

$$d\sigma_r = -2f(\varepsilon_\theta) \frac{d\rho}{\rho}$$

Et, en petites déformations :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{-d\varepsilon_\theta}{2\varepsilon_\theta}$$

Donc, toujours en petites déformations :

$$d\sigma_r = \frac{f(\varepsilon_\theta) d\varepsilon_\theta}{\varepsilon_\theta}$$

La pression  $\sigma_r = p$  s'applique sur la paroi de la cavité cylindrique et la déformation  $\varepsilon_\theta$  à ce niveau correspond à :

$$\varepsilon_0 = \frac{u_{r0}}{r_0}$$

où  $u_{r0}$  correspond au déplacement de la paroi et  $r_0$  est le rayon initial de la cavité. À l'infini, la contrainte initiale  $\sigma_{h0} = p_0$  est présente partout dans le sol et la déformation est nulle,  $\varepsilon_\theta = 0$ . Ces conditions aux limites fournissent les bornes d'intégration de l'équation précédente qui permet de décrire la courbe pressiométrique suivante :

$$\int_{p_0}^p d\sigma_r = \int_0^{\varepsilon_0} \frac{f(\varepsilon_\theta) d\varepsilon_\theta}{\varepsilon_\theta}$$

et :

$$p = p_0 + \int_0^{\varepsilon_0} \frac{f(\varepsilon_\theta) d\varepsilon_\theta}{\varepsilon_\theta}$$

Pour obtenir la contrainte de cisaillement  $\tau = f(\varepsilon_0)$ , il suffit de dériver la relation précédente par rapport à  $\varepsilon_0$  :

$$\tau = f(\varepsilon_0) = \varepsilon_0 \frac{dp}{d\varepsilon_0}$$

Cette relation permet de déduire la courbe contrainte-déformation à partir de la courbe pressiométrique, mais permet difficilement de déterminer uniquement la résistance au cisaillement non-drainé  $S_u$ , qui correspond au maximum de la courbe, sans avoir à dériver entièrement la courbe pressiométrique. En effet, il est possible de déduire  $S_u$  par construction graphique puisque cette dernière relation montre que la sous-tangente  $NT$

de la courbe pressiométrique est égale à la contrainte de cisaillement  $\tau = f$ , comme le montre la figure 2.7 :

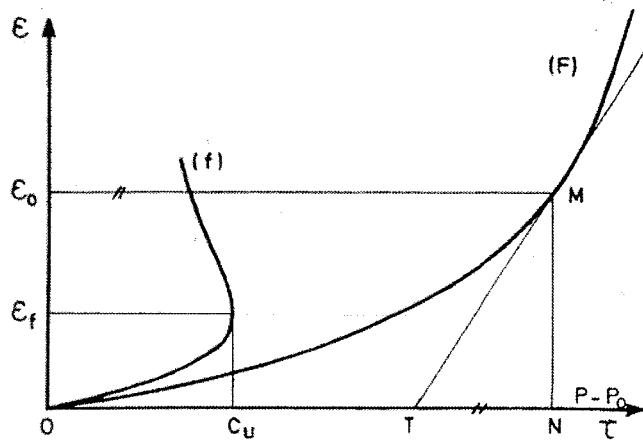


Figure 2.7 Courbe pressiométrique et courbe élémentaire de cisaillement en petites déformations (tirée de Baguelin et al., 1972)

Le désavantage de cette méthode d'interprétation est qu'il faut connaître la valeur de la déformation  $\epsilon_f$  correspondant au maximum de la courbe de cisaillement, ce qui peut difficilement être obtenu de la courbe expérimentale.

### 2.2.3 Méthode de Ladanyi

La méthode utilisée par Ladanyi pour résoudre les problèmes d'expansion d'une cavité dans l'argile se base sur une théorie déjà utilisée dans la plasticité des métaux, soit de considérer un assemblage de minces cylindres concentriques autour de la cavité. Lors de l'expansion, chaque cylindre est déformé et correspond à un point sur une même courbe contrainte-déformation.

En supposant que le matériau dans lequel se trouve la cavité est constitué de plusieurs minces cylindres concentriques, et que pour chaque cylindre de rayon entre  $r_i$  et  $r_{i+1}$ , le déviateur mobilisé en déformation plane s'écrit (voir figures 2.8 et 2.9) :

$$q_{i,i+1} = (\sigma_1 - \sigma_3)_{i,i+1}$$

et correspond à la déformation moyenne dans le cylindre décrite par :

$$\gamma_{i,i+1} = (\epsilon_1 - \epsilon_3)_{i,i+1}$$

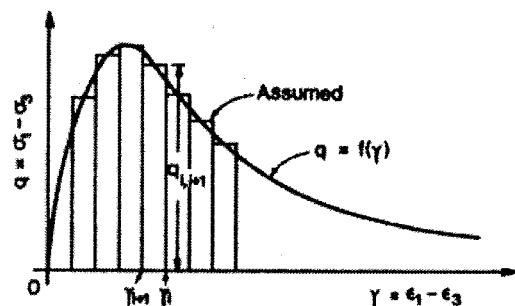


Figure 2.8 Courbe contrainte-déformation assumée et réelle pour l'expansion d'une cavité cylindrique considérée comme un assemblage de cylindres

(tirée de Ladanyi, 1972)

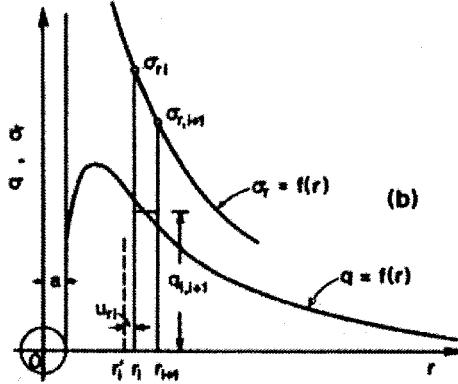


Figure 2.9 Variation réelle et assumée de la résistance mobilisée  $q$  avec le rayon  $r$  et variation résultante de la contrainte radial totale  $\sigma_r$  (tirée de Ladanyi, 1972)

L'équation d'équilibre d'une cavité cylindrique peut être intégrée pour un de ces cylindres :

$$\int_i^{i+1} d\sigma_r = - \int_i^{i+1} (\sigma_r - \sigma_\theta)_{i,i+1} \frac{dr}{r}$$

$$\sigma_{ri} - \sigma_{r,i+1} = q_{i,i+1} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}$$

Ces équations permettent, pour une courbe contrainte-déformation donnée et les conditions limites appropriées, de connaître l'état des contraintes et déformations autour de la cavité étudiée. Pour le pressiomètre, il est utile d'écrire cette équation de la manière suivante :

$$q_{i,i+1} = \frac{\sigma_{ri} - \sigma_{r,i+1}}{\ln r_{i+1} - \ln r_i}$$

D'après la théorie d'expansion d'une cavité cylindrique de rayon initial nul et la symétrie du problème, seules les contraintes radiales s'appliquent sur chaque surface cylindrique concentrique et chacune de ces surfaces peut être considérée comme la paroi d'un cylindre subissant une expansion égale au déplacement radial  $u$  créé par l'augmentation de la contrainte radiale de 0 à  $\sigma_r$ . Les contraintes radiales  $\sigma_r$  et  $\sigma_{r+1}$  peuvent donc être considérées comme les pressions  $p_i$  et  $p_{i+1}$  appliquées dans la cavité à deux étapes successives d'un test pressiométrique (Ladanyi, 1972) (figure 2.10).

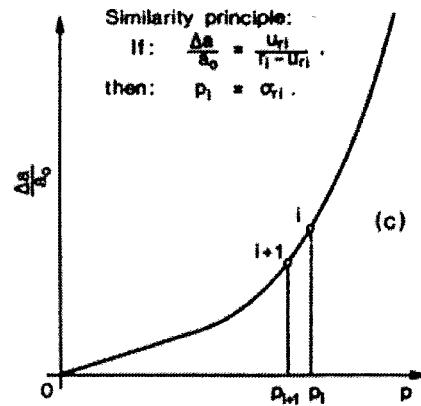


Figure 2.10 Courbe de pression-expansion (tirée de Ladanyi, 1972)

De plus, Ladanyi (1972), a démontré par le même principe que :

$$\ln \frac{r_{i+1}}{r_i} = \frac{1}{2} \left[ \ln \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_i - \ln \left( \frac{\Delta V}{V} \right)_{i+1} \right]$$

où  $\Delta V$  est l'augmentation de volume de la sonde à partir du moment où  $p_0$  est atteint et  $V$  est le volume total  $V_0 + \Delta V$ , avec  $V_0$  le volume de la sonde lorsque  $p = p_0$ . Le déviateur moyen mobilisé peut donc être déterminé à partir de deux points sur la courbe de pression-expansion avec l'équation suivante :

$$q_{i,i+1} = \frac{p_i - p_{i+1}}{\frac{1}{2} \left[ \ln\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_i - \ln\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{i+1} \right]}$$

Et le cisaillement moyen correspondant à cette différence de contraintes entre les deux pressions appliquées  $p_i$  et  $p_{i+1}$  est donné par :

$$\gamma_{i,i+1} = \frac{1}{2} \left[ \ln\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_i + \ln\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{i+1} \right]$$

La figure 2.11 montre une courbe pressiométrique typique généralement obtenue avec un essai. La courbe pressiométrique dans un cas idéal, c'est-à-dire dans le cas où le volume de la sonde correspond exactement à celui de la cavité et où l'essai débute à  $p_0$ , y est aussi présentée. Pour l'obtenir, il suffit de soustraire la pression des terres  $p_0$  à la pression mesurée et corrigée  $p_c$ , et de soustraire le volume  $V_{mo}$  de la sonde à  $p = p_0$  au volume  $V_m$  mesuré avec le pressiomètre. Ces opérations permettent de négliger la partie de la courbe représentant l'expansion dans le vide de la sonde jusqu'à ce que la membrane s'appuie sur la paroi de la cavité et que la pression égale la pression horizontale initiale des terres.

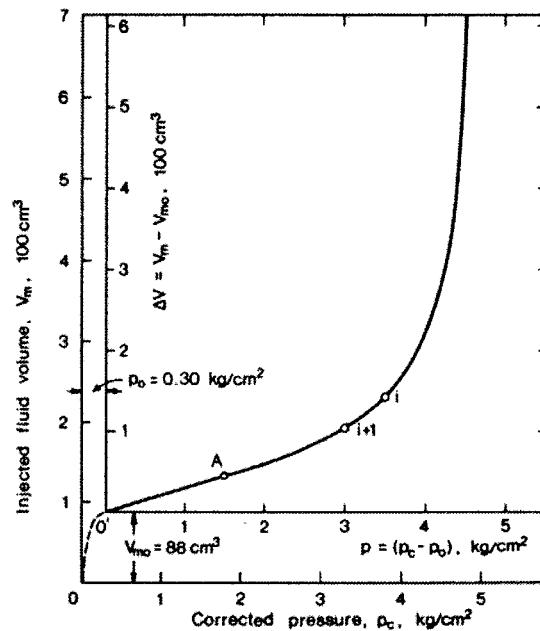


Figure 2.11 Résultat d'un essai pressiométrique dans l'argile de Leda  
(tirée de Ladanyi, 1972)

Pour l'interprétation, Ladanyi propose de mettre cette courbe pressiométrique idéale dans un graphique semi-logarithmique de la pression en fonction de  $\Delta V/V$ , avec  $V$  étant le volume total de la sonde durant l'expansion. La figure 2.12 montre la courbe pressiométrique dans ce genre de graphique.

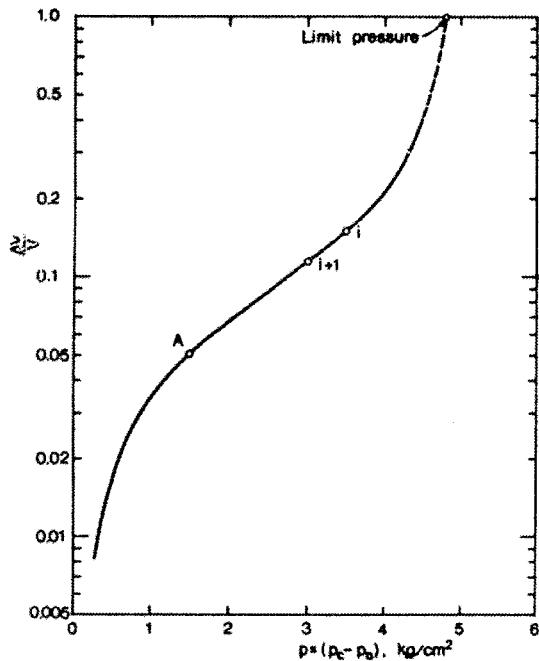


Figure 2.12 Courbe pressiométrique idéale avec une échelle semi-logarithmique  
(tirée de Ladanyi, 1972)

Avec une échelle semi-logarithmique, la courbe se présente en forme de S. La première portion recourbée de la courbe, avant le point A, correspond à la phase élastique des déformations, normalement représentée par la partie linéaire d'une courbe contrainte-déformation, montrée à la figure 2.13.

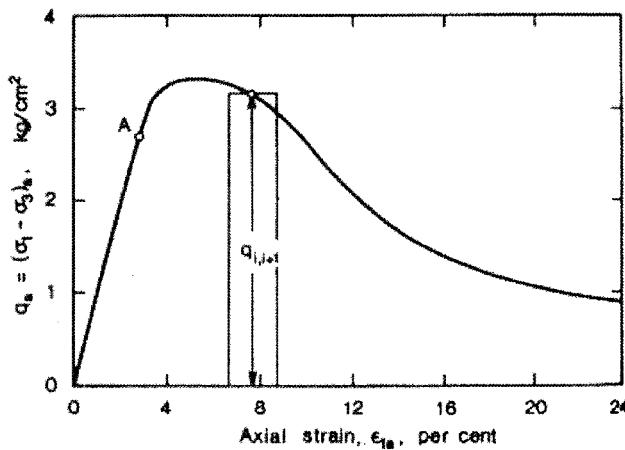


Figure 2.13 Courbe contrainte-déformation non drainé déduite de la courbe pressiométrique (tirée de Ladanyi, 1972)

La deuxième portion recourbée de la courbe pressiométrique concorde avec la baisse de la contrainte vers l'état critique sur la courbe contrainte-déformation. Finalement, la partie linéaire sur la courbe pressiométrique correspond au début des déformations plastiques de la courbe contrainte-déformation. La valeur maximale de la courbe contrainte-déformation correspond à  $2S_u$ . Le principal désavantage de cette méthode repose sur les variations des données expérimentales. Puisque la méthode d'interprétation est très sensible à ces variations, il est préférable de lisser la courbe pressiométrique expérimentale avant de dériver la courbe contrainte-déformation correspondante.

#### 2.2.4 Méthode de Palmer

Tout comme Baguelin et Ladanyi, Palmer propose une relation qui permet de déterminer la courbe contrainte-déformation en entier pour une déformation plane, sans faire d'hypothèse sur le comportement du sol. L'analyse a été faite pour un sol saturé en

déformation plane non drainée, donc pour un essai pressiométrique réalisé rapidement afin que le sol ne puisse se consolider.

Premièrement, lorsque le rayon de la cavité augmente, l'extension circonférentielle est positive et l'extension radiale est négative, ce qui induit une différence des contraintes circonférentielle et radiale qui est fonction de la différence entre les déformations principales. Palmer écrit cette fonction de la manière suivante:

$$\Phi(\varepsilon) = \sigma_r - \sigma_\theta$$

et définit l'extension principale circonférentielle  $\varepsilon$  comme l'augmentation en longueur d'un élément linéaire initialement dans la direction circonférentielle divisé par sa longueur dans l'état de référence, c'est-à-dire à l'état initial lorsque  $p = \sigma_{ho}$ :

$$\varepsilon = -1 + \left[ 1 - \frac{y(2+y)}{r^2} \right]^{-1/2}$$

où  $y$  correspond à l'augmentation du rayon de la cavité, égal à 1 dans l'état de référence, comme montré à la figure 2.14.

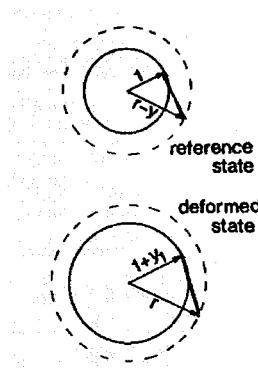


Figure 2.14 Schéma de la cavité à l'état de référence et à l'état déformé  
(tirée de Palmer, 1972)

En substituant ces deux équations dans l'équation d'équilibre déjà introduite dans les sections précédentes, celle-ci devient :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{1}{r} \Phi \left\{ -1 + \left[ 1 - \frac{y(2+y)}{r^2} \right]^{-1/2} \right\}$$

À la limite de la cavité,  $\sigma_r$  correspond à la pression appliquée par le pressiomètre que Palmer définit comme une fonction mesurée  $\Psi$  qui dépend du déplacement radial  $y$  calculé à partir de  $\Delta V$ . En intégrant l'équation précédente entre la limite de la cavité à  $r = 1+y$  et l'infini où  $\sigma_r$  tend vers  $\sigma_{ho}$ , la relation suivante est obtenue :

$$\Psi(y) - \sigma_{ho} = \int_{1+y}^{\infty} \frac{1}{r} \Phi \left\{ -1 + \left[ 1 - \frac{y(2+y)}{r^2} \right]^{-1/2} \right\} dr$$

Après plusieurs manipulations,  $\Phi$  est isolé et devient :

$$\Phi(y) = y(1+y)(2+y)\Psi'(y)$$

Comme  $\Psi$  correspond à la pression appliquée par le pressiomètre en fonction de la déformation, l'équation peut être réécrite avec  $\Delta V/V$ :

$$\Phi(y) = 2 \frac{d\Psi}{d[\ln(\Delta V/V)]}$$

Cette équation correspond à celle trouvée par Ladanyi et décrite plus haut, puisque  $\Phi$  est le déviateur et  $\Psi$  est la pression mesurée avec le pressiomètre. La courbe complète de contrainte-déformation peut donc être déduite de cette relation et la valeur de  $S_u$  correspond au pic de cette courbe. Tout comme la méthode de Ladanyi, celle-ci est très sensible aux variations des données expérimentales

### **2.3 Résistance au cisaillement non drainé d'une argile à partir du déchargement**

Les méthodes de détermination de la résistance au cisaillement non drainé décrites dans la section précédente se basent uniquement sur la partie chargement de l'essai pressiométrique. Cette partie de l'essai est la plus susceptible de subir un certain remaniement, ce qui a amené quelques auteurs à développer une méthode d'interprétation qui se base principalement sur la portion déchargement plutôt que sur le chargement.

En effet, Jefferies (1988) et Housby et Withers (1988) se sont basés sur la théorie de Gibson et Anderson (1961) pour étudier la portion déchargement de la courbe d'un essai pressiométrique. Dans les deux cas, un comportement élastique-parfaitement plastique du sol a été supposé. Les deux auteurs ont déterminé une équation qui caractérise la courbe de contraction d'une cavité cylindrique, représentant le déchargement du pressiomètre. L'équation trouvée par Jefferies est équivalente à celle de Housby et Withers, mais ces derniers ont également développé une méthode graphique afin de déterminer la résistance au cisaillement non drainé du sol à partir de la courbe de

déchargement. Aussi, Ferreira et Robertson (1992) se sont basés sur le travail de Jefferies pour analyser la portion déchargement de la courbe, mais en utilisant un modèle de comportement hyperbolique du sol. Pye (1995) a comparé les deux modèles et a conclu que les résultats étaient valables pour les deux modèles. La méthode de Houslsby et Withers sera utilisée lors de l'analyse des résultats puisqu'elle propose une solution graphique pour calculer  $S_u$ . Cette théorie est donc la seule présentée dans cette section.

### 2.3.1 Contraction d'une cavité cylindrique

La théorie de Houslsby et Withers a été développée pour un pressiomètre à cône combiné à un pénétromètre, mais elle peut s'appliquer au pressiomètre pré-foré utilisé lors des essais puisque seule la théorie se rapportant à la portion déchargement est considérée.

Houslsby et Withers considèrent l'argile comme un matériau incompressible, linéaire élastique-parfairement plastique. Les étapes d'un essai pressiométrique à cône sont représentées à la figure 2.15, qui montre également les rayons aux points A, C et E tout au long de l'essai et qui seront utilisés dans l'analyse théorique présentée dans cette section. Initialement, le point A se trouve sur l'axe de la cavité qui sera créée pour installer le pressiomètre (figure 2.15a). Lorsque le pressiomètre est en place, ce point A se situe à un rayon  $R_i$  correspondant au rayon de la sonde (figure 2.15b). Le volume de la sonde est ensuite augmenté jusqu'à sa déformation maximale de rayon  $R_e$  (figure 2.15c) puis la sonde est dégonflée. La figure 2.15d montre la position des points A, C et E lors du déchargement.

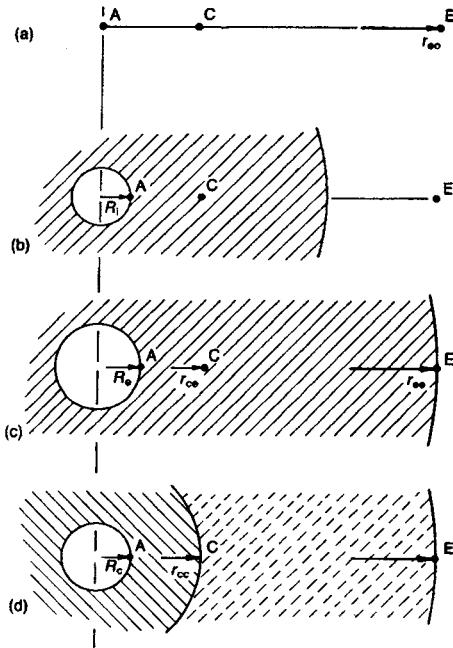


Figure 2.15 Étapes d'un essai pressiométrique : a)conditions initiales; b)après l'installation de la sonde à son volume initial; c)à la déformation maximale; d)lors du déchargement(tirée de Houltsby et Withers, 1988)

Sur la figure 2.15, la région hachurée représente la région des déformations plastiques. Au moment de l'expansion maximale, le point E, initialement situé à un rayon  $r_{e0}$ , se trouve sur la limite élasto-plastique du sol à un rayon  $r_{ee}$  alors que le point C se situe dans la région plastique à un rayon  $r_{ce}$ . Cependant, lorsque le rayon de la cavité devient  $R_c$  pendant la phase de contraction, ce point C se trouve à son tour sur la limite élasto-plastique à un rayon  $r_{cc}$ .

Une fois que l'expansion maximale de la sonde est atteinte, le sol entre A et E a été déformé de manière plastique alors qu'à l'extérieur du point E le sol s'est déformé de manière élastique. L'étape de déchargement est commencée immédiatement. Le sol entre C et E qui a été chargé de manière plastique est maintenant déchargé de manière

élastique alors que le sol entre A et C qui a été chargé plastiquement est déchargé également de manière plastique.

Donc, considérant un comportement élastique – parfaitement plastique, lors de l'expansion, le sol se déforme d'abord de manière élastique puis de manière plastique après que la différence de contraintes ait atteint deux fois la valeur de la résistance au cisaillement  $S_u$ . Lors de la contraction de la cavité cylindrique, le sol ayant subi une déformation plastique se décharge de manière élastique. La pente de cette section élastique de la courbe pressiométrique est égale à  $2G$ . Cette phase dure jusqu'à ce que la condition de plasticité inverse soit atteinte à la surface du pressiomètre, soit lorsque:

$$\sigma_r - \sigma_\theta = -2S_u$$

Lorsque cette condition est atteinte, le sol se décharge de manière plastique et l'équation d'équilibre décrite dans les sections précédentes est toujours valable. En intégrant cette équation d'équilibre entre deux rayons quelconques  $r_1$  et  $r_2$  et en remplaçant la différence de contrainte par  $-2S_u$ , les contraintes radiales sont liées par la relation suivante :

$$\sigma_{r2} = \sigma_{r1} - 2S_u \ln\left[\frac{r_1}{r_2}\right]$$

Supposons un point C, montré à la figure 2.15c, situé lors de l'expansion maximale à un rayon  $r_{ce}$  dans la zone plastique entre la surface du pressiomètre et la limite élasto-plastique, et  $\psi_e$  la pression appliquée par le pressiomètre au moment où l'expansion est maximale. À ce moment, la contrainte radiale agissant au point C est donnée par :

$$\sigma_{rc} = \psi_e - 2S_u \ln\left[\frac{r_{ce}}{R_e}\right]$$

où  $R_e$  correspond au rayon maximal de la paroi de la cavité cylindrique représentant le pressiomètre. Cette contrainte sera réduite de manière élastique lors du déchargement jusqu'à ce que la condition de plasticité survienne au point C, soit lorsque la pression à la surface du pressiomètre diminue de  $2S_u$ , et à ce moment la contrainte radiale au point C est :

$$\sigma_{rc} = \psi_e - 2S_u - 2S_u \ln\left[\frac{r_{ce}}{R_e}\right]$$

Selon l'équation d'équilibre et en y insérant l'équation précédente, la pression à la surface du pressiomètre lors du déchargement plastique est donnée par :

$$\psi = \psi_e - 2S_u - 2S_u \ln\left[\frac{r_{ce}}{R_e}\right] - 2S_u \ln\left[\frac{r_{cc}}{R_c}\right]$$

où  $r_{cc}$  est le rayon au point C lorsque la limite élasto-plastique est située sur ce point, et où  $R_c$  correspond au rayon du pressiomètre en contraction. En tenant compte qu'aucun changement de volume n'a lieu et après quelques transformations, la pression au niveau de la paroi de la cavité lors du déchargement plastique est définie par :

$$\psi = \psi_e - 2S_u \left\{ 1 + \ln(\sinh(\varepsilon_e - \varepsilon)) - \ln\left(\sinh\left[\frac{1}{I_r}\right]\right) \right\}$$

Cette relation représente la courbe de déchargement du pressiomètre une fois que les déformations plastiques sont amorcées, et à partir de celle-ci la résistance au cisaillement non drainé pourra être déterminée.

### 2.3.2 Détermination de $S_u$ par construction graphique

La méthode graphique proposée par Houlsby et Withers (1988) qui permet de déterminer la résistance au cisaillement non drainé est similaire à celle présentée en 1972 par Baguelin et al., cité à la section 2.2.2 pour la courbe de chargement.

Comme pour la courbe de chargement, la première portion de la courbe de déchargement, qui est plus ou moins linéaire, représente la partie élastique du déchargement et est de pente  $2G$ , alors que la seconde portion de la courbe représente la partie plastique. En considérant la tangente SX en un point de cette courbe (figure 2.16), Houlsby et Withers ont montré que le segment XY est égal à  $2fS_u$ , soit :

$$(\varepsilon_e - \varepsilon) \frac{d\psi}{d\varepsilon} = f 2S_u$$

où  $f$  est fonction de  $(\varepsilon_e - \varepsilon)$  :

$$f = \frac{(\varepsilon_e - \varepsilon)}{\tanh(\varepsilon_e - \varepsilon)}$$

$f$  est proche de un, particulièrement pour les petites déformations,  $\varepsilon_e$  est la déformation maximale atteinte lors de l'expansion et  $\psi$  est la pression appliquée au pressiomètre. Considérant  $f \approx 1$ , il est ainsi possible de déterminer  $S_u$  graphiquement. Houlsby et Withers proposent aussi de mettre en graphique la pression  $\psi$  en fonction de  $-\ln(\varepsilon_e - \varepsilon)$ , comme sur la figure 2.17. Dans ce cas, la partie plastique de la courbe de déchargement est représentée par une droite de pente  $2S_u$ , simplifiant ainsi le calcul de  $S_u$ . Sur les figures 2.16 et 2.17, le terme  $m$  est utilisé dans les équations pour permettre l'analyse à la fois d'une cavité sphérique et d'une cavité cylindrique. Dans le premier cas,  $m = 2$ , alors que dans le deuxième cas,  $m = 1$ . Dans cette étude, seule le cas d'une cavité

cylindrique est considéré, donc  $m = 1$ . De manière similaire à la figure 2.17, si la courbe de déchargement est inversée et mise dans un graphique semi-logarithmique, la phase plastique du déchargement correspondra à une droite dont la pente, calculée avec les logarithmes népériens, correspond à deux fois la valeur de  $S_u$ . Cette procédure, présentée en détail dans le chapitre suivant, sera utilisée pour l'analyse des courbes de déchargement pressiométriques.

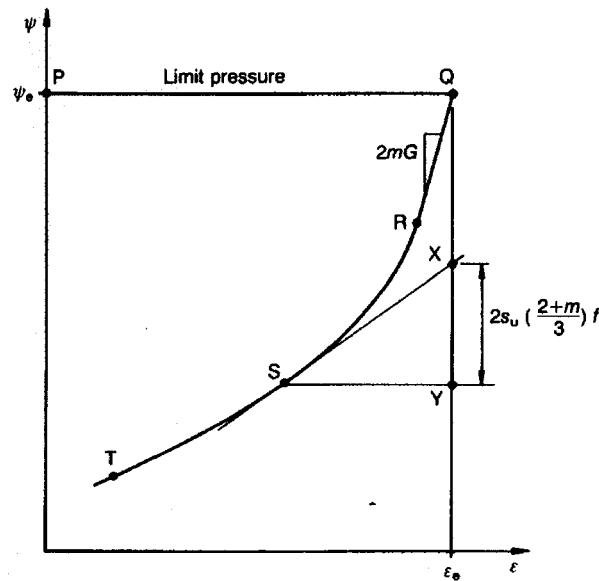


Figure 2.16 Construction graphique permettant de déterminer  $S_u$   
(tirée de Housby et Withers, 1988)

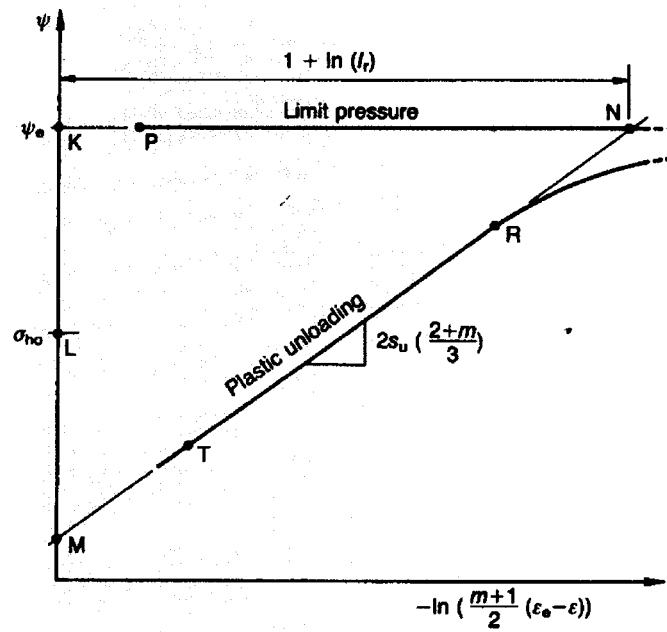


Figure 2.17 Détermination logarithmique de  $S_u$  (tirée de Houlsby et Withers, 1988)

## **CHAPITRE 3**

### **EXPÉRIMENTATION**

L'étude expérimentale s'est déroulée pendant la période estivale de l'année 2002. Au cours de cette période, plusieurs essais in-situ ont été effectués sur un site expérimental situé à Mascouche. En plus des nombreux essais au pressiomètre concernant ce travail, des essais au cône effilé instrumenté et des essais au scissomètre de chantier ont été réalisés sur ce site. Des échantillons ont également été prélevés pour les essais au laboratoire afin de caractériser le sol à l'étude. Ce chapitre présente d'abord une description du site expérimental. Ensuite, les sections qui suivent expliquent en détail tout ce qui se rapporte aux essais pressiométriques et à leur interprétation. Finalement, une brève description des essais au cône effilé instrumenté se trouve à la suite de ces sections.

#### **3.1 Description du site**

Tous les essais réalisés dans le cadre de ce travail ont été effectués durant l'été 2002 sur un même site, près de la ville de Mascouche. Ce site se trouve à la sortie 34 (Boul. St-Henri) de l'autoroute 25 à l'extérieur de la ville de Mascouche. Le choix de ce site s'est imposé puisque des essais au cône effilé instrumenté dans le cadre d'un autre projet de maîtrise à l'École Polytechnique avait déjà été réalisés à cet endroit à l'été 2001 et cette investigation s'est poursuivie durant l'été 2002. Les deux études ont été menées

parallèlement, ce qui a ainsi permis le partage des données recueillies par les deux types d'essai pour fin de comparaison. En 2001, le site de Mascouche avait été choisi pour les essais au cône effilé instrumenté car ceux-ci nécessitaient d'être réalisés dans une argile raide comme celle de Mascouche. De plus, le site se trouve à proximité de l'École Polytechnique et des études géotechniques effectués à Mascouche par le Ministère des transports du Québec et l'Université Laval permettaient la comparaison des résultats. Cependant, il s'avère que ces études ont été réalisées à environ 6 kilomètres au sud du site choisi. Le profil caractéristique de l'argile étudiée a donc été entièrement refait à partir d'essais in-situ et d'essais au laboratoire effectués sur les échantillons recueillis au cours de l'été.

### 3.1.1 Localisation du site

La ville de Mascouche se trouve sur la rive nord de Montréal le long de l'autoroute 25. Les essais ont été réalisés à la sortie de cette ville, dans la bretelle sud-ouest de la sortie 34 de l'autoroute 25. La figure 3.1 permet de situer la localisation du site par rapport à la ville de Mascouche, alors que la figure 3.2 présente un plan plus détaillé du site à l'étude. Tous les essais in-situ ont été réalisés dans une zone restreinte au nord de la bretelle, près du boulevard St-Henri. Cette zone apparaît sur la figure 3.2 et l'emplacement dans cette zone des essais au pressiomètre, au cône effilé instrumenté et au scissomètre se trouve à la figure 3.3.

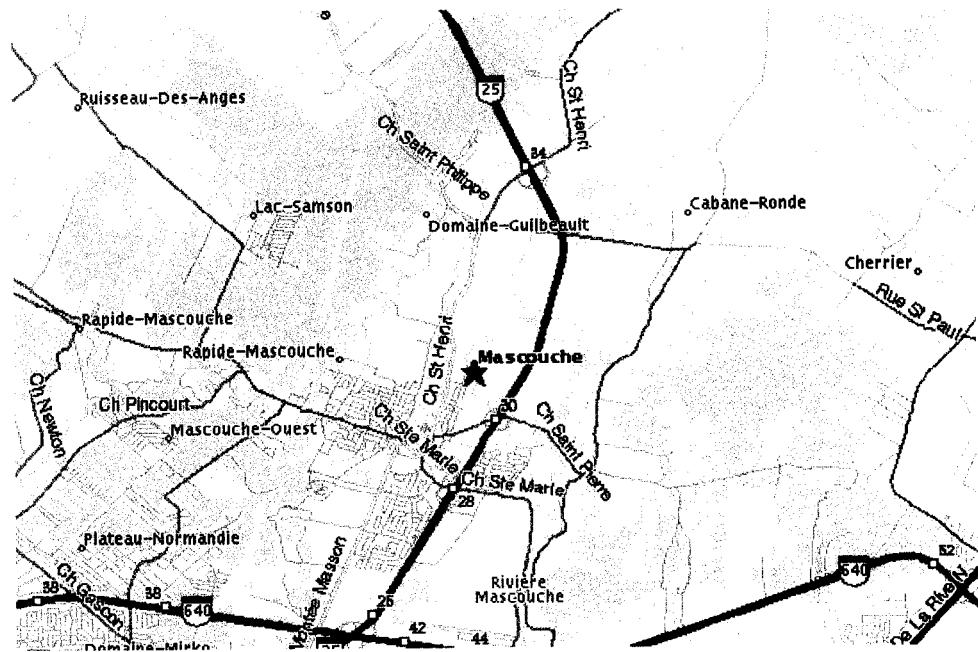


Figure 3.1 Carte de la ville de Mascouche et des environs

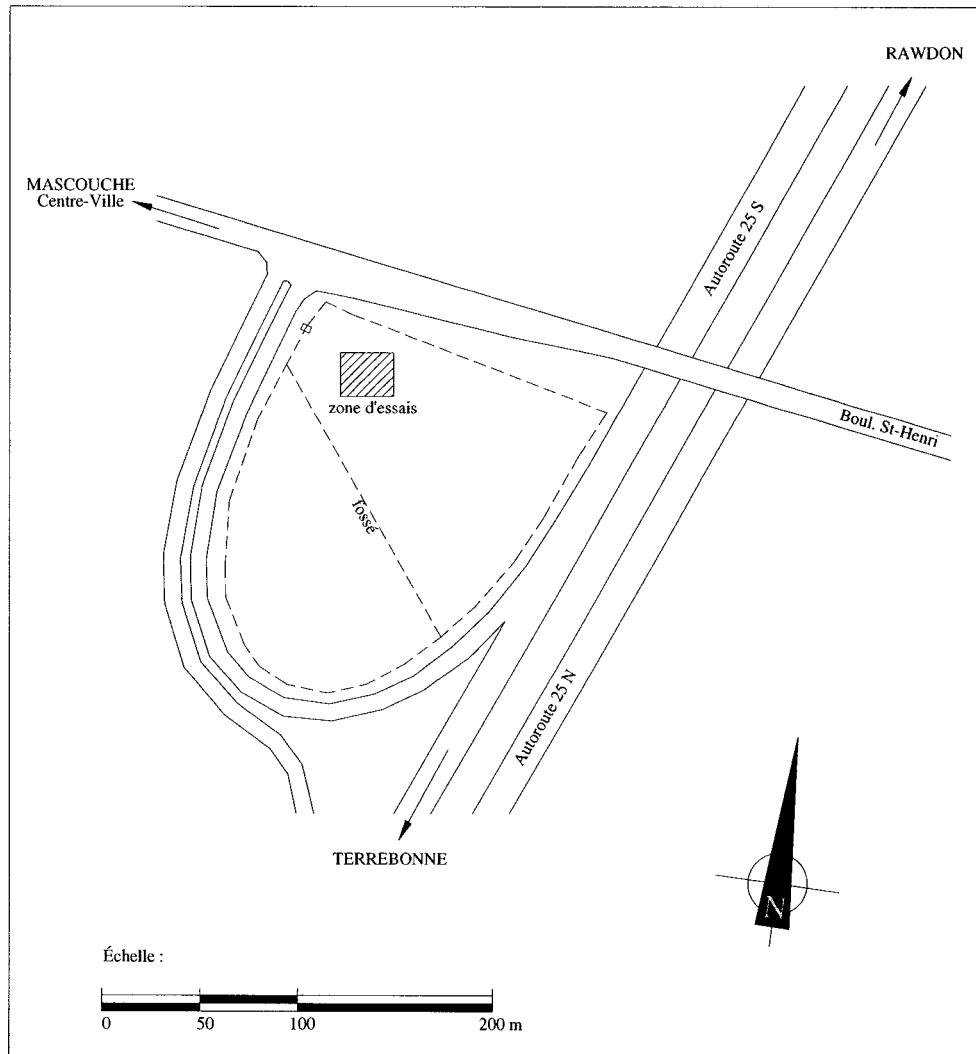


Figure 3.2 Plan de localisation du site de Mascouche (tirée de Longtin, 2003)

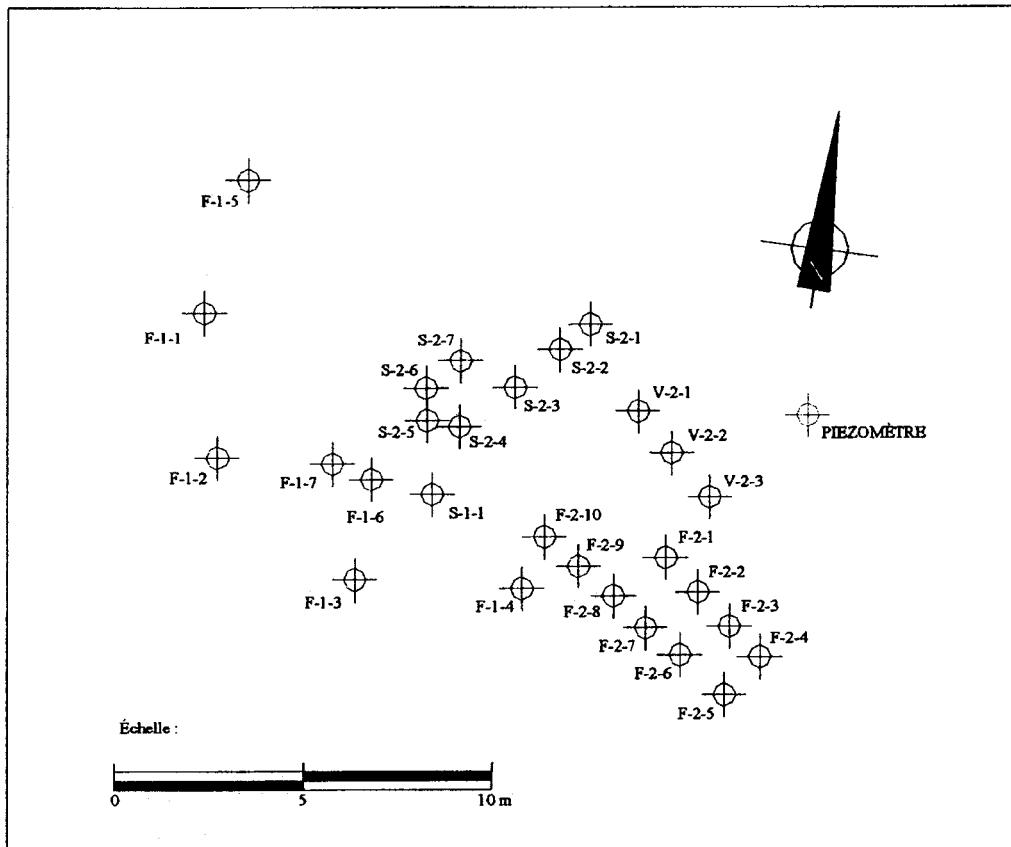


Figure 3.3 Plan de localisation des essais (tirée de Longtin, 2003)

### 3.1.2 Propriétés géotechniques

La caractérisation du sol à cet endroit a été faite sur le site avec un scissomètre Nilcon et au laboratoire à partir d'échantillons recueillis par tubes Shelby de 7.3 centimètres de diamètre intérieur. En tout, trois sondages au scissomètre de chantier ont été réalisés. La valeur de  $S_u$  a été déterminée à tous les 0.5 mètres pour chaque sondage. Deux d'entre eux ont été faits entre 2 et 6.5 mètres, alors que le troisième a été fait entre 0.5 et 9 mètres. Ensuite, des essais ont été effectués au laboratoire sur des échantillons prélevés entre 2.5 et 6 mètres, et ce à tous les 0.5 mètres, soient :

- analyses granulométriques par sédimentométrie
- limites d'Atterberg
- teneurs en eau
- poids volumiques
- résistances au cisaillement intactes et remaniées au cône suédois
- essais de consolidation
- essais triaxiaux non drainés

La figure 3.4 présente les propriétés géotechniques obtenues à l'aide des essais au laboratoire et des trois sondages au scissomètre de chantier. Tous les essais au laboratoire ont été effectués par M. Hugo Longtin dans le cadre de son projet de maîtrise.

Tout d'abord, le sol est constitué d'une croûte de surface composée d'argile raide oxydée, altérée et fissurée de 2.2 mètres d'épaisseur. Sous cette couche se trouve une argile grise, ferme et uniforme. Cette argile est peu sensible et de plasticité élevée, comportant localement des mouchetures noires, des coquillages et des particules plus grossières et de nombreuses bandes rosées de plasticité moyenne qui vont jusqu'à 30 centimètres d'épaisseur. L'épaisseur de cette couche n'a pas été déterminée puisque tous les essais pressiométriques ont été réalisés dans cette argile entre 2.5 mètres et un peu plus de 6 mètres, de même que la prise des échantillons sur lesquels les essais au laboratoire ont été faits.

D'après la granulométrie, le sol est constitué d'environ 60% d'argile et de 40% de silt. La teneur en eau  $w_N$  varie autour de 70%, alors que la limite de liquidité varie entre 60% et 70% selon la profondeur. Ces valeurs sont typiques des argiles de la Mer de Champlain, dont la limite de liquidité se situe généralement entre 50 et 75%. Avec un indice de plasticité  $I_p$  variant de 33 à 45, l'argile de Mascouche se distingue par une plasticité élevée. Cet intervalle dans lequel se trouve l'indice de plasticité correspond

aussi au domaine généralement observé pour les argiles de l'est du Canada (Leroueil et Tavenas, 1983).

Pour ce qui est de la résistance au cisaillement non drainé, les valeurs trouvées à l'aide du cône suédois sont légèrement plus faibles que celles obtenues avec le scissomètre de chantier, mais elles suivent la même tendance. D'après les essais au scissomètre Nilcon, la résistance au cisaillement, qui est de l'ordre de 150 kPa dans la croûte de surface, est plus faible dans le premier mètre et demi de la couche d'argile grise, soit entre 50 et 75 kPa. À partir de 3.5 mètres de profondeur, la résistance au cisaillement augmente et est plus ou moins constante jusqu'à 6 mètres, avec des valeurs comprises entre 75 et 100 kPa. Au-delà de 6 mètres de profondeur, la résistance diminue légèrement pour atteindre 65 kPa.

Les essais de consolidation ont permis de déterminer les valeurs de la pression de préconsolidation à tous les 0.5 mètres, entre 2.5 et 6 mètres. Celle-ci augmente avec la profondeur. Leroueil et Tavenas (1983), ont proposé une relation moyenne pour les argiles de l'est du Canada entre l'indice de plasticité et le rapport de la résistance au cisaillement trouvée au scissomètre avec la pression de préconsolidation, soit :

$$\frac{S_u}{\sigma'_p} = 0.20 + 0.0024I_p$$

Pour un indice de plasticité moyen de 38,  $S_u/\sigma'_p = 0.29$ , et les rapports  $S_u/\sigma'_p$  obtenus avec les données sont généralement proches de cette valeur.

Aussi, les paramètres de résistance en contraintes effectives ont été déterminés à l'aide d'essais triaxiaux non drainés réalisés sur des échantillons prélevés à 4 mètres de profondeur. Les paramètres obtenus correspondent à  $c' = 0$  et  $\phi' = 33^\circ$  (figure 3.5).

Finalement, le niveau de la nappe, qui se trouve à 2.2 mètres de profondeur sur la figure 3.4, a été mesuré à l'aide d'un piézomètre ouvert installé sur le site. Cette profondeur correspond en fait au niveau de la nappe à la fin de l'été 2002. En effet, le niveau de la nappe a beaucoup varié durant la période estivale. Lors du premier essai pressiométrique, la nappe se trouvait à 1 mètre de profondeur alors qu'elle se trouvait à 1.80 mètres lors du dernier essai au pressiomètre.

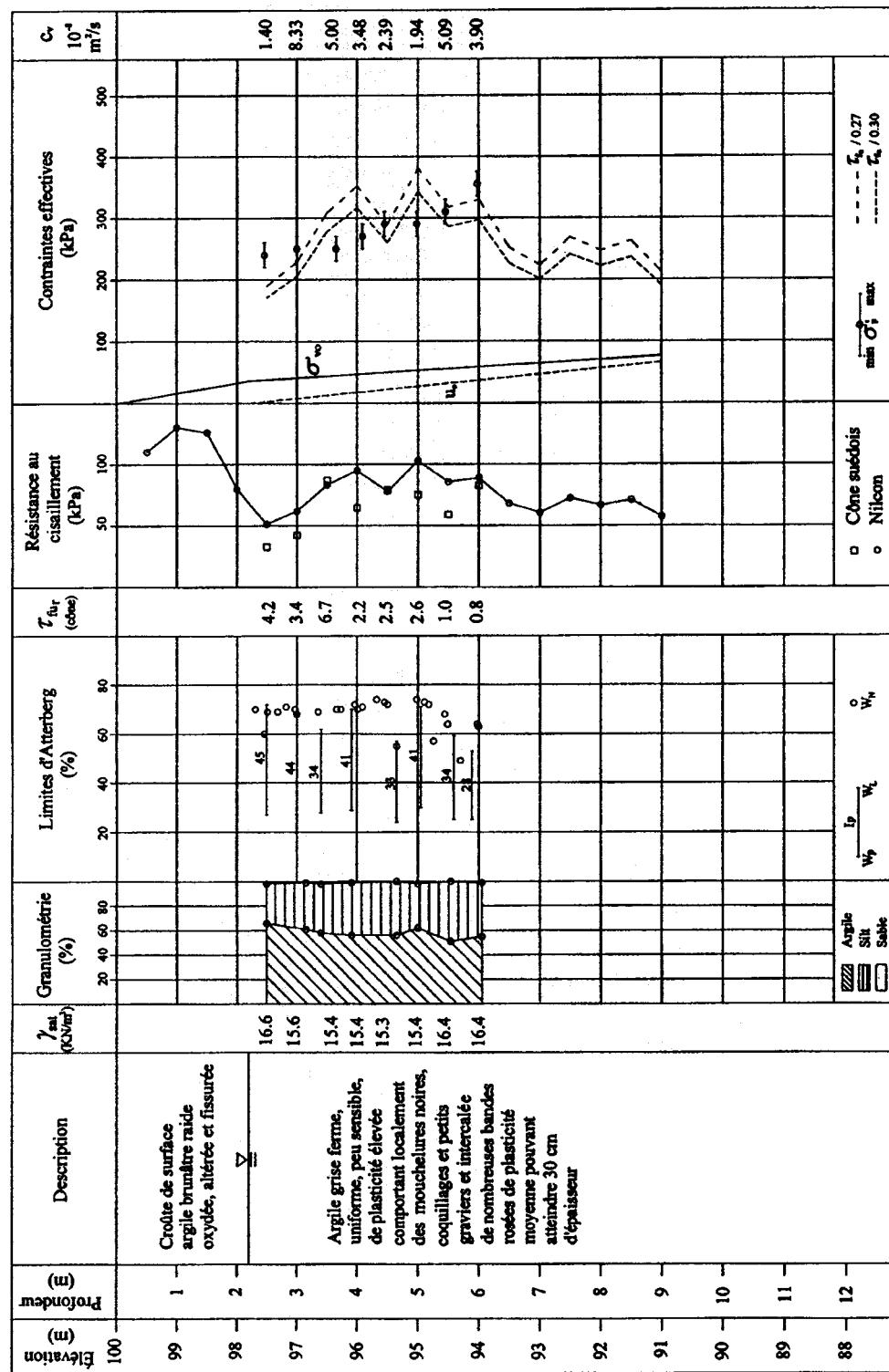


Figure 3.4 Propriétés géotechniques du site de Mascouche (tirée de Longtin, 2003)

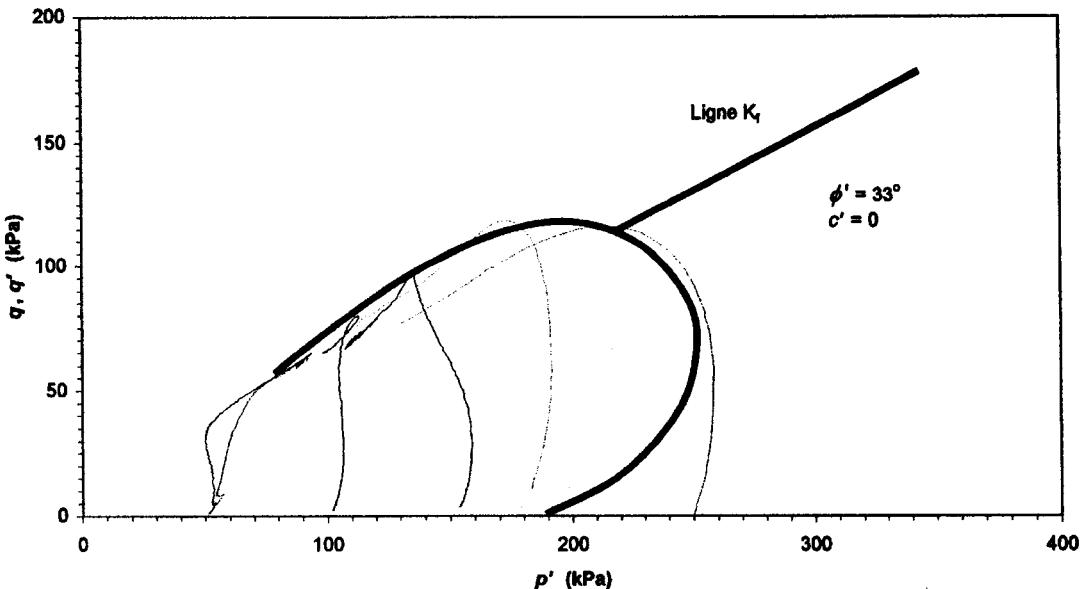


Figure 3.5 Cheminements en contraintes effectives lors d'essais CIU réalisés sur des échantillons prélevés à 4m (tirée de Longtin, 2003)

### 3.2 Pressiomètre Texam

Le pressiomètre utilisé pour les essais effectués dans le cadre de ce travail est un pressiomètre Texam vendu par la compagnie Roctest. C'est un appareil semblable à celui développé par Ménard à la fin des années 50. En effet, il s'agit d'un pressiomètre pré-foré, c'est-à-dire qu'il est inséré au niveau voulu dans un trou préalablement foré dans le sol à l'étude. Une brève explication du fonctionnement et de la préparation du pressiomètre est faite dans cette section.

### 3.2.1 Description du pressiomètre Texam

Le pressiomètre Texam se divise en deux parties, soient la boîte de lecture et la sonde. Tout d'abord, la boîte de lecture permet de contrôler le déroulement de l'essai pressiométrique et de faire la lecture des données pendant l'essai. Lors de l'essai, celle-ci est installée à la surface du sol à proximité du trou. C'est dans cette boîte que se trouvent le circuit hydraulique de l'appareil et le cylindre de pression. Un vérin à vis muni d'une petite manivelle fixé au dessus de cette boîte est raccordé au piston du cylindre, normalement saturé d'eau. La sonde qui se trouve dans le sol est reliée à la boîte de lecture par une tubulure Tecalan. Lorsque tout le système est saturé, la manivelle permet de monter ou d'abaisser le piston, ce qui provoque l'injection ou le retrait d'un certain volume d'eau dans la sonde. Un comparateur situé près du vérin permet de lire le déplacement en pouces du piston ( $1 \text{ po} = 25.4 \text{ mm}$ ), qui peut être ensuite converti en un volume d'eau injecté en  $\text{cm}^3$ . En effet, le déplacement vertical de un pouce du piston, soit  $25.4 \text{ mm}$ , correspond à un volume de  $193.05 \text{ cm}^3$  d'eau. Finalement, des manomètres reliés au circuit hydraulique sont situés à la surface de la boîte et permettent de lire la pression d'eau appliquée dans la sonde à différentes échelles. Un des manomètres est gradué jusqu'à  $2500 \text{ kPa}$  alors que le second permet de lire des pressions jusqu'à  $10\,000 \text{ kPa}$ . Puisqu'il est improbable que la résistance du sol dans lequel les essais sont effectués atteigne de telles valeurs, un troisième manomètre gradué jusqu'à  $700 \text{ kPa}$  a été installé sur la sortie 3 de la boîte du pressiomètre. L'utilisation de ce manomètre permet une meilleure lecture des valeurs de pression appliquées. La figure suivante montre un schéma indiquant les différentes composantes de la boîte de lecture du pressiomètre.

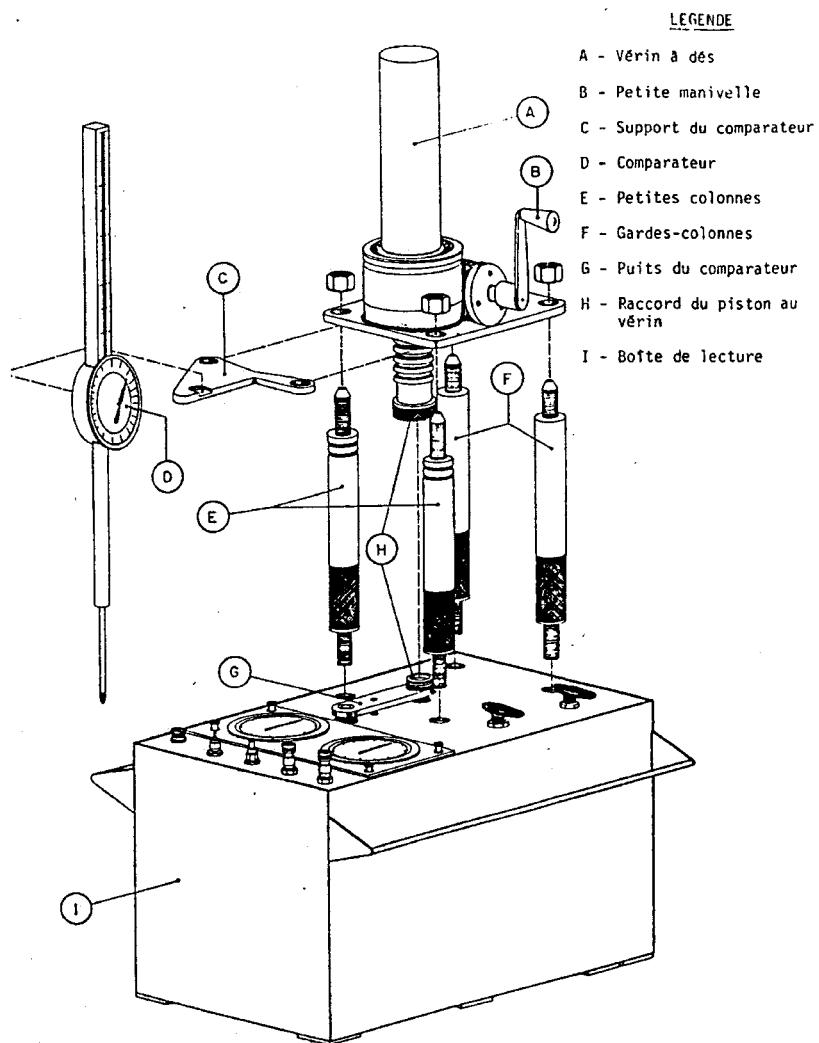


Figure 3.6 Schéma descriptif de la boîte de lecture du pressiomètre  
(tirée du manuel d'opération de Roctest)

Pour ce qui est de la sonde, présentée sur le schéma de la figure 3.7, elle est composée d'un corps cylindrique recouvert d'une gaine de caoutchouc(4) retenue à chaque extrémité par une bague métallique conique(3) surmontée d'un écrou(2). Pour faciliter son insertion dans le sol, un embout métallique légèrement conique a été usiné spécialement pour la sonde et est fixé à l'extrémité de celle-ci. Finalement, une tubulure Tecalan relie la sonde à la boîte de lecture en surface. La longueur de la sonde entre les

deux bagues métalliques, soit la longueur de la membrane extensible, est de 36 cm alors que la longueur totale de la sonde incluant l'embout métallique est de 64 cm. Le point milieu de la membrane se situe à 37 cm de l'extrémité de l'embout métallique. Le diamètre de la sonde étant égal à 70 mm, le rapport L/D du pressiomètre Texam est de 5.

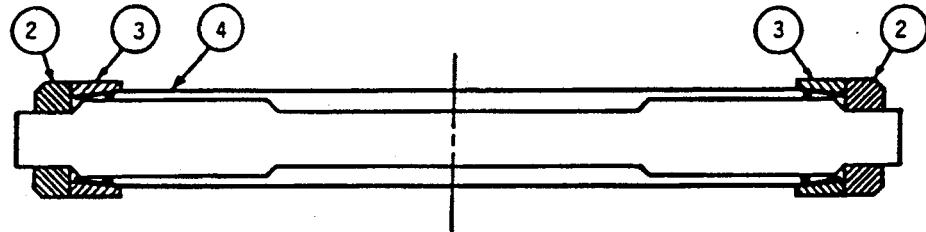


Figure 3.7 Schéma de la sonde pressiométrique (tirée du manuel d'opération de Roctest)

### 3.2.2 Remplissage et saturation

Avant toute utilisation du pressiomètre, celui-ci doit être d'abord rempli d'eau puis complètement saturé. Pour le remplissage initial, deux petites tubulures placées dans un réservoir d'eau propre sont raccordées sur les raccords 4 et 5 et la valve 8 se trouve sur «FILL » alors que la valve 9 est placée sur « TEST ». La figure 3.8 montre un schéma du circuit hydraulique. Le piston, qui a été préalablement remonté, doit être descendu à l'aide de la petite manivelle à une vitesse maximale de 45 tours/minute en s'assurant que les tubulures restent toujours immergées afin d'éviter la pénétration de l'air dans le cylindre. Une fois que le piston est complètement descendu, la boîte du pressiomètre est légèrement inclinée d'environ  $15^\circ$  puis le piston remonté afin de chasser l'air qui peut être restée dans le haut du cylindre. Lorsqu'il n'y a plus aucune bulle d'air évacuée par les tubulures, la boîte est remise à la verticale et le piston est redescendu à sa position la

plus basse. Le cylindre est maintenant rempli et le reste du circuit hydraulique est prêt à être saturé.

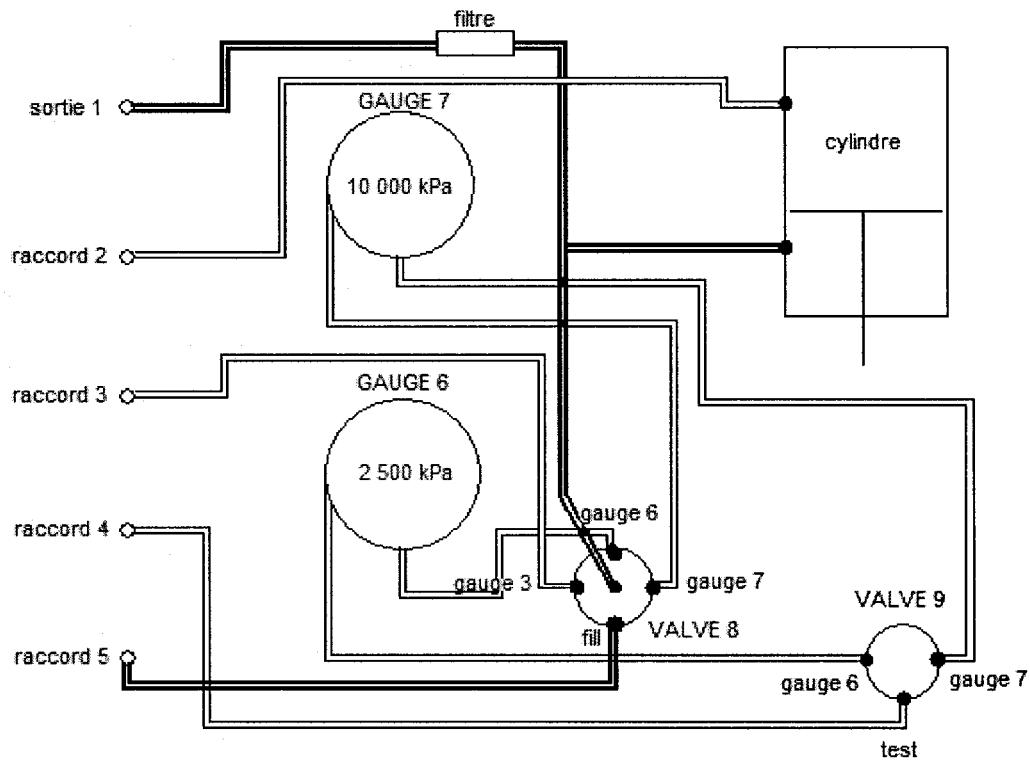


Figure 3.8 Schéma du circuit hydraulique du pressiomètre

La saturation des manomètres commence en raccordant une petite tubulure sur la sortie 1 et en plaçant la valve 8 sur « gauge 6 ». Le piston est remonté d'un demi pouce (12.7 mm) en s'assurant que la tubulure ne contienne plus aucune bulle d'air. La valve 9 est alors placée sur « gauge 6 » et le piston remonté jusqu'à l'absence de bulle d'air dans les tubulures. Chaque manomètre est ainsi saturé en plaçant les valves 8 et 9 sur la position du manomètre correspondant. Lorsque les manomètres sont saturés et qu'il n'y a plus aucune bulle d'air sortant des tubulures, la valve 8 est placée sur « FILL » et la valve 9 sur « TEST ». Le piston est redescendu à sa position la plus basse et la boîte du pressiomètre est inclinée légèrement pour effectuer les mêmes étapes qu'à la fin du

remplissage afin d'évacuer l'air qui peut s'être accumulée dans le haut du cylindre lors de la saturation des manomètres.

La vérification de la saturation peut être faite en plaçant la valve 8 sur « gauge 6 » puis en appliquant 2500 kPa sur le manomètre 6. L'utilisation de la deuxième manivelle, semblable à une grande roue à six rayons installée à l'opposé de la petite manivelle, facilite la tâche puisque qu'il est plus difficile de tourner la manivelle avec l'augmentation de la pression. Le pressiomètre est bien saturé si, à 2500 kPa, la valeur lue sur le comparateur est égale ou inférieure à 60 divisions. Si elle en est supérieure, la saturation doit être recommencée.

Ensuite, la sonde et la tubulure doivent également être saturées. Une extrémité de la tubulure doit être raccordée à la sonde et l'autre extrémité est raccordée sur la sortie 1 de la boîte. La sonde est placée à la verticale avec l'extrémité non raccordée vers le haut. Sur cette extrémité se trouve un bouchon qui doit être enlevé pour la saturation. À l'aide de la manivelle, l'eau est injectée dans la sonde et en ressort à l'autre extrémité. Lorsqu'il n'y a plus de bulles d'air à la sortie et que le surplus d'eau s'est échappé de manière à ce que la sonde soit à son diamètre initial, le bouchon est replacé et la tubulure est enlevée de la sortie 1. Le remplissage final est alors effectué de la même manière qu'au début des procédures. L'appareil est maintenant rempli et saturé; mais avant d'effectuer un premier essai, la courbe de calibration de l'appareil doit être déterminée.

### 3.2.3 Calibration

Lors de l'essai pressiométrique, l'eau est injectée dans la sonde, ce qui provoque son expansion. Pour chaque augmentation de volume, la pression d'eau présente dans la sonde peut être lue. Cependant, la gaine qui recouvre le corps de la sonde et qui prend de l'expansion étant en caoutchouc, celle-ci oppose une certaine résistance additionnelle

à celle du sol entourant la sonde. Afin de connaître seulement la résistance du sol, il est important de déterminer la valeur de la résistance offerte par la gaine pour chaque incrément de volume.

Pour ce faire, il suffit de raccorder la tubulure de la sonde sur la sortie 1. La valve 8 se trouve sur la position du manomètre utilisé pour les lectures et la valve 9 se trouve sur « TEST ». En tournant la manivelle de manière continue à une vitesse de un tour en deux secondes, l'eau est injectée dans la sonde qui est tenue verticalement à l'air libre. La pression indiquée par le manomètre est notée à chaque augmentation de volume de  $60 \text{ cm}^3$  (0.311 po) jusqu'à  $1200 \text{ cm}^3$  (6.216 po). Lorsque ce volume est atteint, la manivelle est tournée dans le sens inverse pour ramener la sonde à son volume initial, et la pression est encore notée à intervalle régulier. Les données obtenues permettent de tracer la courbe de calibration du pressiomètre en chargement et en déchargement. Les valeurs déduites pour chaque volume seront ensuite soustraîtes des données obtenues lors des essais *in situ*.

L'appareil est maintenant prêt à être transporté sur le site d'étude pour effectuer un premier essai. Le remplissage n'a pas à être refait à chaque utilisation, mais la saturation est vérifiée avant chaque essai et rectifiée s'il y a lieu.

### **3.3 Procédure des essais pressiométriques**

Au total, 20 essais ont été réalisés avec le pressiomètre Texam sur le site de Mascouche à différentes profondeurs, comprises entre 2.5 et 6.5 mètres. Tous les essais se sont déroulés de la même manière, à quelques exceptions près. Cette section explique les différentes étapes à suivre une fois que le matériel nécessaire se trouve sur le site d'étude.

### 3.3.1 Préparation du trou

Après que le pressiomètre ait été rempli, saturé et calibré, il est amené sur le site des essais où la saturation est vérifiée afin de s'assurer qu'aucune bulle d'air n'a pu s'infiltre dans le système durant le transport. Comme le pressiomètre Texam doit être inséré dans un trou déjà foré, la première étape des procédures consiste en la préparation du trou dans lequel l'essai sera réalisé. Dans chaque forage, trois essais ont été faits à des profondeurs différentes, soit à environ 2.5 mètres, 4.5 mètres et 6.5 mètres.

Les premiers deux mètres de sol, qui correspondent plus ou moins à la couche de surface d'argile raide, ont été forés avec une tarière de 20 centimètres de diamètre afin de faciliter les manipulations suivantes. À l'endroit où l'essai est effectué, le remaniement du sol au niveau des parois du trou doit être minimal pour obtenir les meilleurs résultats possibles. Cette condition ne peut être respectée si le trou est complètement foré à l'aide de tarières. Donc, afin de minimiser le remaniement, un échantillonneur à piston muni d'un tube Shelby de 73 millimètres de diamètre est utilisé au niveau où l'essai doit être réalisé. L'échantillon recueilli peut servir pour les essais au laboratoire alors que la cavité créée par l'échantillonneur permet d'effectuer l'essai pressiométrique dans un sol peu remanié.

La profondeur de l'essai est considérée comme le niveau où se situe le milieu de la sonde. Celle-ci, avec l'embout métallique installé, mesure au total 64 centimètres, et le milieu de la membrane se situe à 37 centimètres de l'extrémité de l'embout. Pour que le milieu de la membrane se trouve à 2.5 mètres, la profondeur à laquelle le premier essai est réalisé, le fond du trou créé avec l'échantillonneur doit de situer à 2.87 mètres environ. De cette manière, lorsque la sonde est insérée dans le sol, son extrémité repose à 2.87 mètres et le milieu de la membrane se trouve à 2.5 mètres qui correspond à la profondeur de l'essai. La longueur du tube Shelby utilisé pour l'échantillonnage est de 71 centimètres. Le forage à la tarière doit donc se faire jusqu'à 2.16 mètres pour

permettre ensuite d'échantillonner le sol entre 2.16 et 2.87 mètres et de faire l'essai à 2.5 mètres.

Une fois l'essai à 2.5 mètres terminé et la sonde retirée, le forage est poursuivi avec une tarière de 8 centimètres de diamètre jusqu'à la profondeur voulue pour le deuxième échantillonnage. Le trou pourrait se faire complètement à l'aide de l'échantillonneur, mais l'utilisation de la tarière de forage accélère le processus. De plus, seul l'endroit où l'essai est effectué nécessite d'être non remanié. Pour avoir un essai à 4.5 mètres, le forage doit se faire jusqu'à 4.16 mètres, suivi de l'échantillonnage entre 4.16 et 4.87 mètres. De la même manière, pour le troisième essai effectué à 6.5 mètres, les tarières sont utilisées pour forer de 4.87 mètres jusqu'à 6.16 mètres et l'échantillonneur permet de poursuivre le forage jusqu'à 6.87 mètres. La plupart des essais ont été faits aux profondeurs voulues, mais en raison d'erreurs de manipulation ou de difficultés lors du forage et de l'échantillonnage, certains essais ont été réalisés à des profondeurs légèrement différentes de celles anticipées.

### 3.3.2 Installation de la sonde

Lorsque le trou et le pressiomètre sont prêts pour exécuter l'essai, la sonde doit être installée à la profondeur voulue. D'abord, la sonde se trouve à la surface, avec la tubulure fixée à une extrémité et l'embout installé à l'autre extrémité. Son volume initial dans ce cas-ci est de  $1380 \text{ cm}^3$ , son diamètre de 70 millimètres et la distance entre les bagues métalliques, soit la longueur de la membrane, est de 36 centimètres.

Pour faciliter l'insertion et le retrait de la sonde, celle-ci est fixée par son extrémité supérieure à des tubages en PVC de 1.52 mètres de longueur et de diamètre égal à celui de la sonde (figure 3.9). Le nombre de tubages utilisés dépend de la profondeur à atteindre avec la sonde. La tubulure doit se trouver à l'intérieur des tubages. Lorsque

tous les tubages nécessaires sont vissés l'un à l'autre et finalement à la sonde, la tubulure est raccordée à la sortie 1 de la boîte du pressiomètre située à proximité du forage. La sonde peut alors être descendue à l'aide des tubages en PVC jusqu'au fond du trou et l'essai peut commencer.

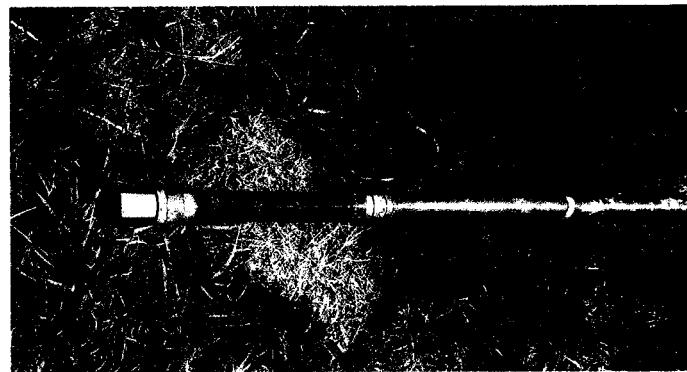


Figure 3.9 Sonde pressiométrique

### 3.3.3 Exécution de l'essai

Lorsque la sonde est installée à l'endroit voulu, il est temps de débuter l'essai. Celui-ci doit se faire rapidement pour que la condition non drainée soit respectée. L'essai se fait à déformation contrôlée, c'est-à-dire que le volume d'eau injecté est augmenté graduellement jusqu'à ce qu'il corresponde à une certaine déformation, et la pression est notée à intervalle régulier pour différentes valeurs de volume. La figure suivante montre une photo du pressiomètre prêt pour l'exécution de l'essai.

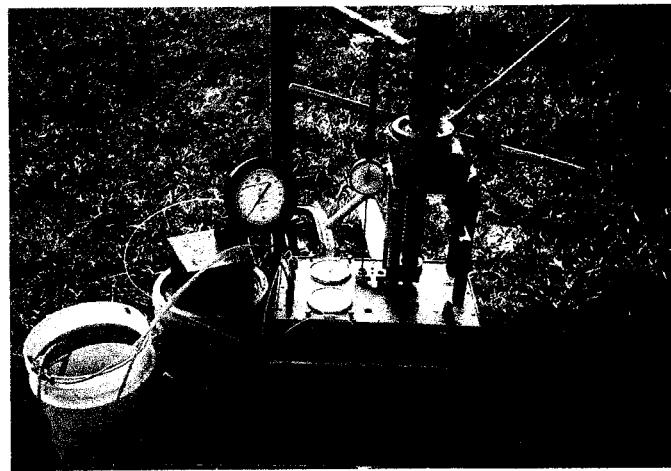


Figure 3.10 Pressiomètre Texam

Puisque seules les petites déformations sont considérées dans ce cas-ci, les déformations atteintes lors des essais sont en moyenne autour de 10% et ne dépassent pas 13%. D'après le diamètre initial de la sonde et sa longueur,  $D_0 = 7 \text{ cm}$  et  $L = 36 \text{ cm}$ , la déformation radiale correspondant à chaque augmentation de volume  $\Delta V$  en pouce (1 po = 25.4 mm) indiqué par le comparateur du pressiomètre peut être calculée de la manière suivante :

$$D = \sqrt{\left( \Delta V * 193.05 + \frac{\pi L D_0}{4} \right)} \frac{4}{36\pi}$$

et

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{D/2 - R_0}{R_0} * 100$$

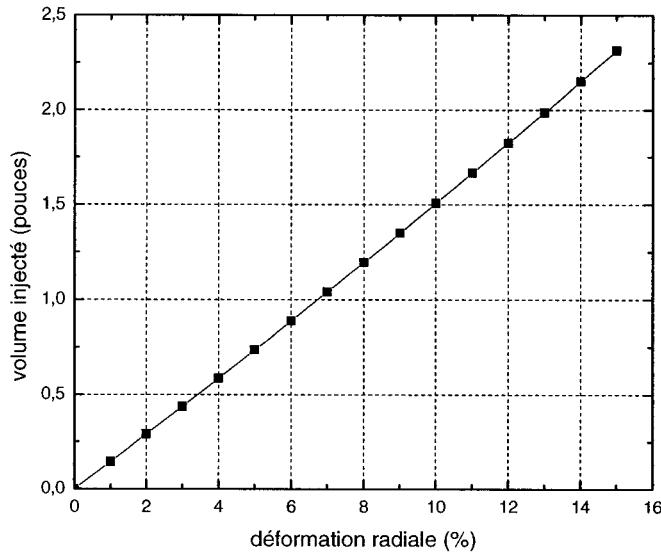


Figure 3.11 Relation entre le volume injecté et la déformation radiale

La figure 3.9 montre la relation entre l'augmentation de volume en pouces et la déformation radiale de la sonde, qui correspond également à la déformation de la cavité. D'après la relation, le volume injecté pour obtenir une déformation de l'ordre de 10% doit être environ de 1.5 pouces (38.1 mm). Le volume d'eau à injecter dans la sonde lors de l'essai pour atteindre la déformation désirée a donc été déterminé à l'aide de cette relation.

Lors de l'exécution de l'essai, la valve 9 est sur «TEST» et la valve 8 sur «gauge 3» puisque le manomètre de 700 kPa qui a été rajouté est utilisé pour la lecture de la pression. La grande manivelle à six branches sert à injecter graduellement un volume d'eau dans la sonde. La vitesse à laquelle la manivelle est tournée doit être autour d'une révolution en 5 secondes et être à peu près constante. La pression est lire à tous les 0.025 ou 0.050 pouces dans les premiers instants de l'essai puisque c'est à ce moment qu'elle varie le plus, puis elle est lire à tous les 0.2 pouces une fois que le volume injecté

ait atteint 0.2 pouces ou environ 1 % de déformation. Lors du chargement, la manivelle est tournée constamment et la lecture de la pression doit se faire rapidement au moment où les intervalles de volume sont atteints. Pour faciliter la tâche, une personne doit tourner la manivelle pendant qu'une autre peut prendre les lectures rapidement.

Une fois que le volume recherché est atteint, la manivelle est immédiatement tournée dans le sens inverse pour retirer l'eau de la sonde. La partie déchargement de l'essai commence. Cette partie se fait à peu près à la même vitesse que le chargement, soit une révolution aux 5 secondes. La lecture de la pression se fait encore une fois de manière constante, mais cette fois la pression est notée à tous les 0.05 pouces puisque la baisse de pression se fait beaucoup plus rapidement lors du déchargement, et les lectures se font jusqu'à ce que le manomètre indique 0.

Finalement, les données recueillies sont d'abord corrigées d'après la courbe de calibration de l'appareil puis mises sous forme de graphique montrant la pression en fonction de la déformation, tant pour la partie chargement que pour le déchargement. La résistance au cisaillement non drainé peut ensuite être déduite de ces graphiques. La section 3.4 présentera en détail le traitement des données.

### 3.3.4 Modifications du pressiomètre

Tous les essais pressiométriques ont été exécutés de la manière décrite précédemment. Cependant, deux modifications majeures ont été apportées à des composantes du pressiomètre au cours de la période d'expérimentation. Ces modifications ont été faites dans le but d'améliorer les résultats des essais. La première concerne le cylindre de pression présent dans la boîte du pressiomètre alors que la deuxième s'applique au manomètre.

Premièrement, le pressiomètre semblait ne pas fonctionner parfaitement lors de l'exécution des premiers essais. En effet, l'augmentation de la pression indiquée par le manomètre se faisait de manière saccadée. Après les trois premiers essais effectués, la boîte du pressiomètre a été ouverte pour vérifier l'état du circuit hydraulique. Cette vérification a permis de constater que le cylindre servant de réservoir d'eau était complètement rouillé et fissuré par endroit. Les essais ont donc été suspendus pendant quelques semaines pour permettre le remplacement du cylindre.

Deuxièmement, dans certains cas, après que la sonde soit descendue dans le forage, le manomètre indiquait déjà une certaine pression avant même que l'essai ne soit commencé. Puisque le diamètre du trou est à peine plus grand que celui de la sonde, ceci peut être dû au fait que le trou s'est légèrement refermé avant que la sonde ne soit installée. Les parois du trou s'appuient donc sur la membrane une fois que la sonde y est insérée et la pression qui en résulte est lue sur le manomètre. Dans d'autres cas, le manomètre indique une pression négative avant le début de l'essai. En effet, puisque la pression est nulle lorsque la sonde est au niveau du sol, celle-ci devient négative à mesure que la sonde est descendue dans le sol puisque le manomètre demeure en surface. Pour remettre la pression à zéro avant de commencer l'essai, une burette remplie d'eau a été raccordée au manomètre. En ouvrant l'accès de la burette au manomètre, celle-ci se vide pour rétablir la pression à zéro. Une fois le manomètre indiquant 0, la burette est fermée et l'essai peut se dérouler normalement. Cette technique a été utilisée seulement pour les six derniers essais.

### 3.4 Traitement des données

Les données obtenues à partir des essais pressiométriques correspondent à des valeurs de pression en fonction d'un volume, alors que la valeur recherchée est celle de la résistance au cisaillement du sol. Celle-ci peut être déduite une fois que les données

recueillies ont été corrigées et mises sous forme de graphique. Cette section présente le traitement des données, les corrections apportées et les différents graphiques à interpréter.

### 3.4.1 Correction des valeurs de pression

Certaines corrections doivent être apportées aux données obtenues des essais pressiométriques avant de les mettre sous forme de graphiques. Premièrement, la résistance de la membrane doit être soustraite des valeurs de pression correspondant à un volume donné. Comme expliqué à la section 3.1.3, la courbe de calibration de l'appareil en chargement et en déchargement a été déterminée avant d'effectuer les essais. Cette courbe est présentée à la figure 3.12.

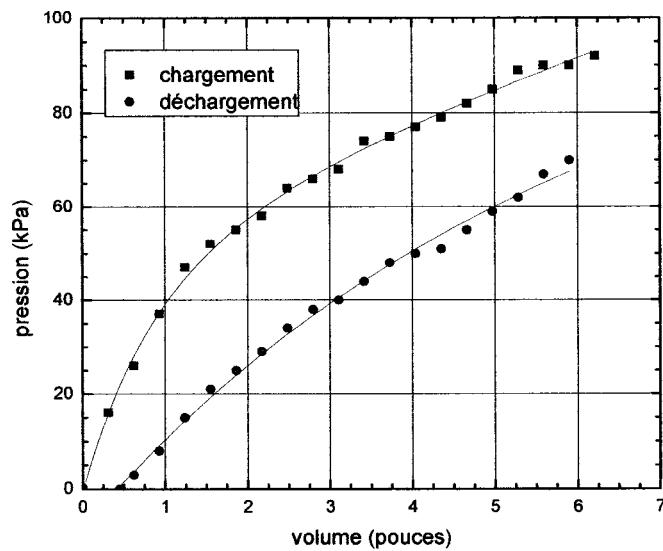


Figure 3.12 Courbe de calibration du pressiomètre

Sur cette figure, la pression lue sur le manomètre lorsque la sonde est en expansion est présentée en fonction du volume d'eau injecté dans la sonde pour provoquer son expansion. Comme la calibration est en fait un essai pressiométrique effectué à l'air libre, la pression lue représente la résistance offerte par la membrane à mesure que le volume d'eau est augmenté dans la sonde.

Lors des essais, la pression est notée à différentes valeurs de volume. Ces pressions représentent la résistance du sol mais comprennent aussi la résistance de la membrane en expansion. Pour connaître la résistance du sol, celle de la membrane doit être soustraite aux valeurs de pression indiquées par le manomètre. Donc, la pression corrigée est donnée par :

$$P_{corr} = P_{lue} - P_{membrane}$$

où  $P_{lue}$  est la pression lue sur le manomètre lors de l'essai, et  $P_{membrane}$  est la pression sur la courbe de calibration qui correspond au même volume d'eau que celui de la pression lue. Donc, toutes les valeurs de pression lues et notées pendant l'essai doivent être corrigées une à une puisque chacune d'entre elles correspond à un volume donné. Sur la courbe de calibration, une valeur de  $P_{membrane}$  correspond à ce même volume, et c'est cette valeur qui est soustraite à la pression lue. Cette correction est faite autant pour la partie chargement que déchargement. D'ailleurs, une courbe de calibration a été définie pour le chargement et une autre pour le déchargement. Un exemple de tableau dans lequel les données pressiométriques sont recueillies et corrigées est montré au tableau 3-1.

Normalement, la correction due à la résistance de la membrane n'est pas la seule à être apportée aux valeurs de pression. En effet, la pression créée par la colonne d'eau présente dans la tubulure doit habituellement être ajoutée à la pression lue sur le manomètre. Comme la pression est lue en surface alors que la sonde se trouve quelques

mètres plus bas, le poids de la colonne d'eau agit sur la sonde mais n'est pas indiquée par le manomètre. Il est donc important d'en tenir compte lorsque la courbe pressiométrique complète est interprétée. Par contre, dans ce cas-ci, la courbe pressiométrique est seulement utilisée pour déterminer la résistance au cisaillement non drainé du sol. Puisque la méthode employée est basée sur la pente d'une droite de la pression en fonction de la déformation et que la pression hydrostatique est constante tout au long de l'essai, son ajout à la valeur de pression lue ne change en rien les résultats finaux. Cette correction n'est donc pas prise en compte pour ce travail.

Tableau 3-1 Exemple d'un tableau de données pressiométriques

Essai pressiométrique				
$\Delta V$	$\Delta R/R_0$	$P_{lue}$	$P_{membrane}$	$P_{corr}$
0	0	4	0	4
0,05	0,348	58	2,9	55,1
0,075	0,521	75	4,8	70,2
0,1	0,694	98	6	92
0,125	0,867	118	7,2	110,8
0,15	1,040	138	8,4	129,6
0,2	1,384	168	10,8	157,2
0,4	2,749	278	20	258
0,6	4,096	368	27	341
0,8	5,426	425	33,6	391,4
1	6,740	490	39,6	450,4
1,2	8,037	520	44	476
1,4	9,320	548	48,6	499,4
1,35	9,001	460	17,7	442,3
1,3	8,680	412	16,8	395,2
1,25	8,359	372	16	356
1,2	8,037	338	14,4	323,6
1,15	7,715	302	14	288
1,1	7,391	268	13,2	254,8
1,05	7,066	238	11,8	226,2
1	6,740	210	10,8	199,2
0,95	6,413	180	10	170
0,9	6,085	155	9,2	145,8
0,85	5,756	132	8	124
0,8	5,426	105	7,2	97,8
0,75	5,095	82	6	76
0,7	4,764	60	4,8	55,2
0,65	4,430	45	4	41
0,6	4,096	24	2,8	21,2
0,55	3,761	7	1,6	5,4
0,53	3,627	0	1,5	-1,5

### 3.4.2 Courbes pressiométriques

La manière habituelle de présenter les données d'un essai pressiométrique est sous la forme d'un graphique de la pression en fonction de la déformation volumétrique. Les valeurs de pression sont celles qui ont été corrigées comme expliqué dans la section précédente, alors que les valeurs de déformation doivent être déterminées à partir des volumes notés lors de l'essai.

Le comparateur de l'appareil indique des variations de volume en pouces. Puisque le rayon initial de la sonde est connu, la déformation radiale  $\Delta R/R_0$  correspondant à la variation de volume peut être calculée de la même manière qu'à la section 3.3.3. Normalement, le forage dans lequel l'essai est effectué a un diamètre un peu plus grand que celui de la sonde. Au début de l'essai, la membrane n'est pas en contact avec les parois du trou et la pression augmente lentement jusqu'à ce que le volume de la sonde corresponde au volume initial de la cavité. La membrane est alors en contact avec la paroi et la pression augmente brusquement de manière linéaire. De cette façon, le volume initial de la cavité est connu et les déformations sont déduites à partir de celui-ci. Pour les essais réalisés dans le cadre de ce travail, l'échantillonneur a un diamètre à peine plus grand de quelques millimètres que celui de la sonde. Sauf exception, la pression augmente donc linéairement tout de suite au début de l'essai, ce qui indique que la sonde est en contact avec la paroi du forage dès le début de l'essai. Ainsi, l'augmentation de volume de la sonde pendant l'essai est la même que celle de la cavité. Le calcul de la déformation peut donc se faire avec le rayon connu de la sonde qui correspond également au rayon initial de la cavité. L'équation suivante permet de trouver la déformation en pourcentage d'après l'augmentation de volume :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\sqrt{\frac{\Delta V * 193.05}{\pi L}} + R_0^2 - R_0}{R_0} * 100$$

où :  $\Delta V$  est le volume lu lors de l'essai

$L = 36 \text{ cm}$  est la longueur de la membrane élastique recouvrant la sonde

$R_0 = 3.5 \text{ cm}$  est le rayon initial de la sonde

Cette valeur de  $\Delta R/R_0$  correspond à la déformation  $\epsilon_0 = u_{r0}/r_0$  décrite au chapitre 2 dans la théorie. Toutes les données corrigées peuvent maintenant être mises dans un graphique de la pression en fonction de la déformation montré à la figure 3.13, et la courbe pressiométrique est décrite par  $P_{corr} = f(\Delta R/R_0)$ .

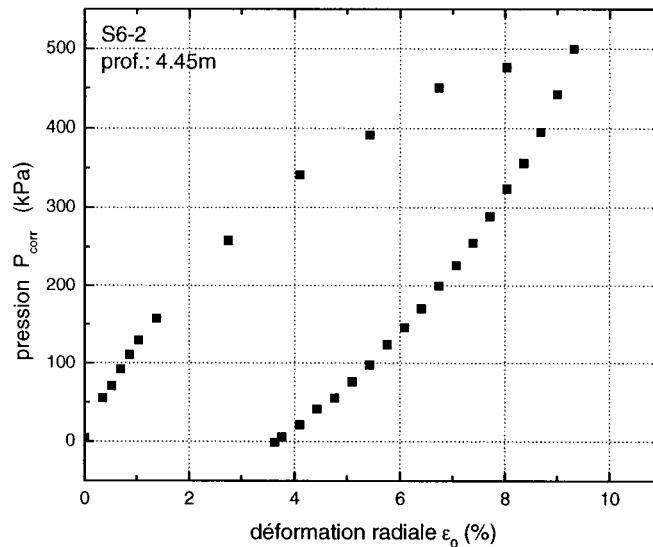


Figure 3.13 Courbe pressiométrique typique montrant le chargement et le déchargement

Cette courbe permet de bien visualiser l'évolution de la pression lors de l'essai, mais les valeurs de la résistance au cisaillement non drainé ne sont pas déduites de ces graphiques. Les deux sous-sections qui suivent expliquent les méthodes utilisées pour l'interprétation de la portion chargement et de la portion déchargement de la courbe pressiométrique dans le but de déterminer la résistance au cisaillement non drainé du sol.

### 3.4.2.1 Chargement

Parmi les méthodes décrites au chapitre 2 qui permettent de trouver la résistance au cisaillement non drainé du sol à partir de la portion chargement de la courbe pressiométrique, celle de Gibson et Anderson (1961) propose de mettre les valeurs dans un graphique semi-logarithmique. Effectivement, comme il a été démontré au chapitre 2, la portion de la courbe pressiométrique qui représente la phase plastique des déformations, suite à la portion linéaire qui correspond à la phase élastique, apparaît comme une droite dans un graphique semi-logarithmique. D'après la théorie, la résistance au cisaillement non drainé est égale à la pente de cette droite, calculée en logarithme népérien :

$$S_u = \frac{p_2 - p_1}{\ln \frac{\Delta V}{V_2} - \ln \frac{\Delta V}{V_1}}$$

où  $p_{i=1,2}$  est la pression mesurée avec le pressiomètre en deux points de la courbe  
 $V_{i=1,2}$  est le volume de la cavité à l'état déformé en deux points de la courbe  
 $\Delta V$  est le volume mesuré avec le pressiomètre

Contrairement à la théorie générale, les courbes pressiométriques dessinées suite aux essais effectués montrent la pression corrigée en fonction de la déformation radiale  $\Delta R/R_0$  plutôt que la déformation volumétrique. C'est que l'utilisation de  $\Delta V/V$  est valide particulièrement pour les grandes déformations. Comme la plupart des essais réalisés ne dépassent pas 10% de déformation, ils sont considérés comme des essais à petites déformations seulement, ce qui permet de faire quelques simplifications. Ceci est aussi vrai lorsque le rapport  $G/S_u$  est élevé, car le seuil de plasticité est atteint rapidement.

En effet, si les déformations sont petites, soit inférieures à 15 %,  $R_0 \approx R$  et:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta V}{V} &= \frac{\pi R^2 H - \pi R_0^2 H}{\pi R^2 H} \\ &= \frac{R^2 - R_0^2}{(R_0 + u_{r0})^2} \\ &= \frac{(R + R_0)(R - R_0)}{R_0^2} \\ &\approx \frac{2R_0(R - R_0)}{R_0^2} \\ &\approx \frac{2\Delta R}{R_0}\end{aligned}$$

La déformation radiale peut donc être utilisée dans le calcul de la pente puisque le facteur 2 s'annule au dénominateur. La figure 3.14 montre l'allure de la portion chargement d'une courbe pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique où la pente correspond à  $S_u$ .

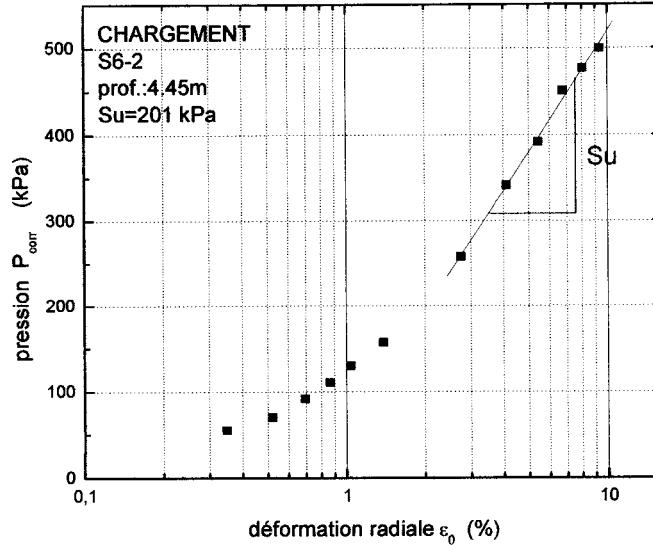


Figure 3.14 Exemple de la détermination de  $S_u$  à partir de la portion chargement d'une courbe pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique

La résistance au cisaillement non drainé a été calculée ainsi pour tous les essais effectués, à l'exception de quelques essais dont, pour différentes raisons, la portion chargement de la courbe pressiométrique ne permet pas une bonne évaluation de la pente. C'est d'ailleurs pour cette raison que différents auteurs ont proposé une méthode d'interprétation de la courbe pressiométrique qui s'oriente sur la portion déchargement de la courbe, qui est moins susceptible d'être touchée par le remaniement du sol.

#### 3.4.2.2 Déchargement

La section 2.3 présente une méthode d'interprétation du déchargement basée sur la théorie de la contraction d'une cavité cylindrique. La méthode est semblable à celle utilisée pour la portion chargement de la courbe. En effet, la courbe de déchargement

d'un essai pressiométrique présente une première phase élastique suivie d'une phase plastique des déformations, tout comme la courbe de chargement. Afin de faciliter l'interprétation de la courbe, les données doivent cependant être légèrement transformées.

Effectivement, la courbe de décharge, qui est décroissante, doit être transformée pour devenir une courbe croissante. De cette manière, la phase plastique apparaît comme une droite dans un graphique semi-logarithmique, et la pente de cette droite correspond à la résistance au cisaillement non drainé du sol. Pour obtenir une courbe croissante, les valeurs de pression et de déformation du début de la portion décharge sont considérées comme le zéro de la courbe, et les valeurs suivantes du décharge sont soustraites de la pression et de la déformation initiales pour obtenir une augmentation des valeurs plutôt que leur diminution. Donc, pour la portion décharge de chaque courbe pressiométrique, les données doivent être transformées de la manière suivante :

$$P_{\text{déch}} = P_{\text{corr e}} - P_{\text{corr}}$$

où  $P_{\text{déch}}$  est la pression transformée pour l'interprétation du décharge  
 $P_{\text{corr e}}$  est la pression correspondant à la valeur de déformation maximale atteinte, soit le début du décharge, et est constante pour chaque essai  
 $P_{\text{corr}}$  est la pression correspondant à chaque étape du décharge

et

$$\varepsilon_{\text{déch}} = \varepsilon_e - \varepsilon$$

où  $\varepsilon_{\text{déch}}$  est la déformation transformée pour l'interprétation du décharge

$\varepsilon_e$  est la déformation maximale atteinte, soit le début du déchargement, et est constante pour chaque essai, et

$\varepsilon$  est la déformation correspondant à chaque étape du déchargement

Une fois les données transformées, la courbe de déchargement ressemble à une courbe de chargement puisque les modifications apportées ont pour but de rendre la courbe de déchargement croissante. Les figures 3.15 et 3.16 montrent les courbes avant et après la modification des données.

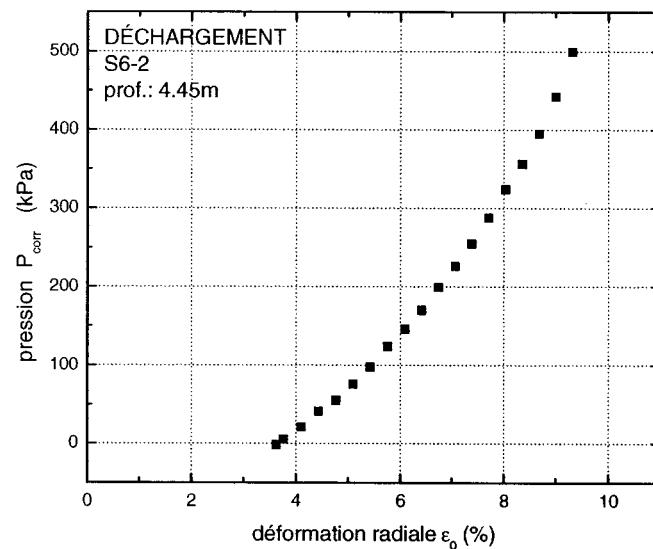


Figure 3.15 Courbe de déchargement typique

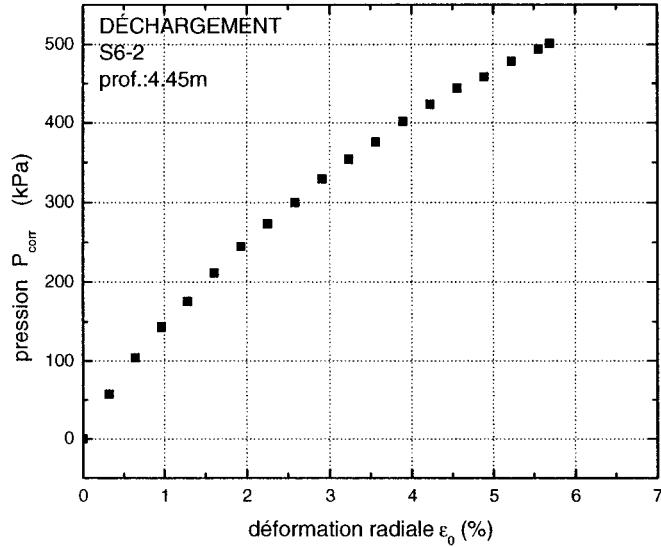


Figure 3.16 Courbe de déchargement modifiée pour devenir croissante

D'après la théorie de Houlsby et Withers (1988) exposée au chapitre 2, la pente dans un graphique semi-logarithmique de la partie représentant la phase plastique du déchargement correspond à deux fois la valeur de  $S_u$ . La figure 3.17 en montre d'ailleurs un exemple.

La résistance au cisaillement non drainé a été calculée avec cette méthode pour tous les essais réalisés. Contrairement à l'interprétation de la partie chargement des essais, celle de la partie déchargement s'est faite plus facilement et sans approximation puisque les courbes de déchargement sont généralement mieux définies que les courbes de chargement.

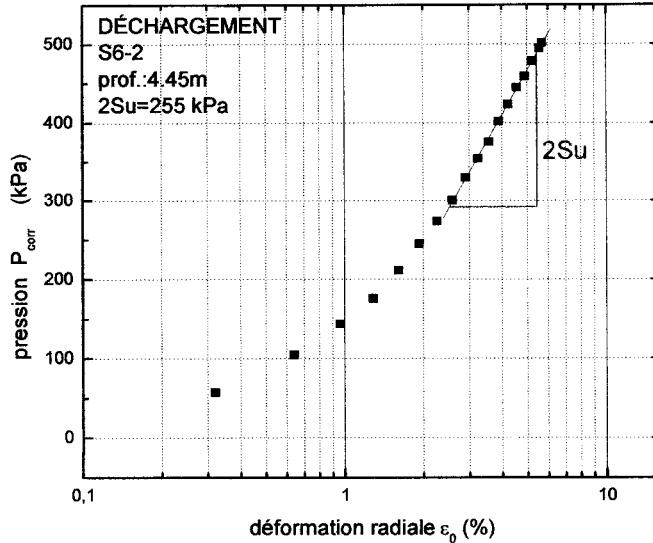


Figure 3.17 Exemple de la détermination de  $S_u$  à partir de la portion déchargement d'une courbe pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique

### 3.4.3 Modélisation des courbes pressiométriques

Afin de vérifier les résultats obtenus et de mieux comprendre le comportement de l'argile lors du déchargement, la modélisation des courbes pressiométriques selon la théorie élastique-parfaitement plastique a été effectuée. Cette modélisation se fait à partir des équations qui définissent la pression au niveau de la paroi de la cavité lors des phases de chargement et de déchargement. Ces équations ont été introduites au chapitre 2. Elles correspondent à celles déterminées avec les théories de Gibson et Anderson (1961) pour le chargement, et de Houlsby et Withers (1988) pour le déchargement. La comparaison de ces courbes théoriques avec les courbes expérimentales permet une meilleure compréhension des résultats.

Pour y parvenir, le module de cisaillement doit d'abord être déterminé à partir des données expérimentales. Dans la première portion de la courbe de déchargement, alors que les déformations sont élastiques, la courbe pressiométrique est définie par :

$$\psi_e - \psi = 2G(\varepsilon_e - \varepsilon)$$

où  $\psi_e$  est la pression maximale atteinte ( $P_{corr-e}$ ) et  $\varepsilon_e$  est la déformation maximale, donc le point initial du déchargement. Avec cette relation, une valeur approximative de  $2G$  peut être trouvée à partir des données expérimentales. Ensuite, la courbe théorique peut être tracée, à l'aide du logiciel Excel, avec cette valeur de  $2G$  et la valeur de  $S_u$  trouvée graphiquement avec la méthode décrite dans la section précédente.

Ferreira et Roberston (1992) et Pye (1995) proposent de commencer la modélisation par le déchargement puisque cette étape de l'essai est moins sensible au remaniement. Les deux phases de la courbe de déchargement sont modélisées à partir des équations suivantes de la pression  $\psi$  en fonction de la déformation  $\varepsilon$ , données par Houlsby et Withers (1988) et Jefferies (1988) :

1- phase élastique, pour  $\frac{S_u}{G} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_e$  :

$$\psi = \psi_e + 2G(\varepsilon - \varepsilon_e)$$

2- phase plastique, pour  $\varepsilon < \frac{S_u}{G}$  :

$$\psi = \psi_e - 2S_u \left\{ 1 + \ln \left( \frac{2G}{2S_u} (\varepsilon_e - \varepsilon) \right) \right\}$$

La courbe pressiométrique théorique trouvée avec ces équations est superposée à la courbe expérimentale. Comme proposé par Pye (1995), la valeur de  $G$  dans les équations est changée jusqu'à ce que les deux courbes coïncident.

De la même manière, les deux phases de la courbe de chargement sont modélisées à partir des équations suivantes de la pression  $\psi$  en fonction de la déformation  $\varepsilon$ , qui découlent de la théorie de Gibson et Anderson (1961) :

1- phase élastique, pour  $\varepsilon \leq \frac{S_u}{2G}$ :

$$\psi = p_0 + 2G\varepsilon$$

2- phase plastique, pour  $\varepsilon > \frac{S_u}{2G}$ :

$$\psi = p_0 + S_u \left[ 1 + \ln \frac{2G}{S_u} \varepsilon \right]$$

où  $p_0$  est nulle puisque la pression initiale en début d'essai a été ramenée à zéro dans plusieurs des cas. La courbe pressiométrique théorique correspondant au chargement est à son tour ajustée sur la courbe expérimentale en variant la valeur de  $G$ . La modélisation de la phase de chargement est donc indépendante de celle de la phase de déchargement.

### 3.5 Cône effilé instrumenté (ISCT)

En plus des essais pressiométriques, plusieurs essais au cône effilé instrumenté, aussi appelé ISCT pour Instrumented Sharp Cone Test, ont été réalisés sur le site de Mascouche dans le cadre d'un autre projet. Les résultats de certains de ces essais serviront de comparaison pour les résultats des essais pressiométriques.

### 3.5.1 Description du cône effilé instrumenté

Le cône effilé instrumenté a été développé en 1984 par M. Branko Ladanyi, professeur à l'École Polytechnique de Montréal. La dernière version de l'appareil, montrée à la figure 3.18, consiste en une sonde légèrement conique sur laquelle se trouvent cinq capteurs de pression électroniques. Ces capteurs de pression permettent de mesurer la contrainte latérale totale mobilisée lors de la descente de la sonde dans une cavité préalablement forée de diamètre inférieur à la sonde. Celle-ci étant de forme conique, chaque capteur correspond à une déformation précise de la paroi de la cavité puisque le rayon de la sonde augmente d'une extrémité à l'autre. En effet, la sonde utilisée présente deux angles d'effilement successifs, soit de 1 et de 2 degrés. La sonde est descendue de manière continue à l'aide d'un piston dans la cavité réalisée complètement avec un échantillonneur à tube Shelby. Cette technique, comme pour le pressiomètre, permet de minimiser le remaniement du sol.

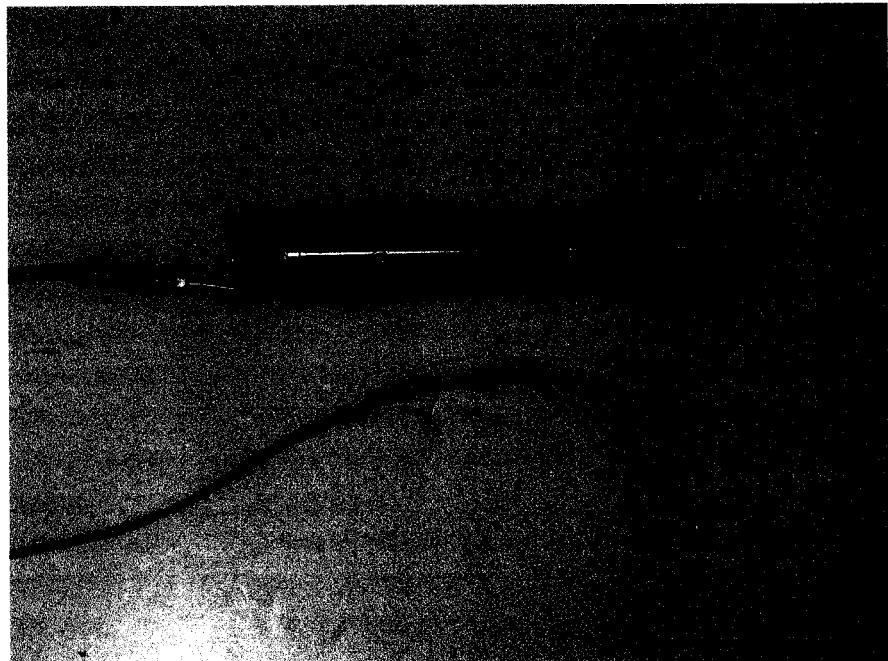


Figure 3.18 Cône effilé instrumenté

Lors de la descente, la sonde et ses capteurs sont reliés à la surface par des fils conducteurs à un système d'acquisition. Ce dernier permet de faire la lecture de la contrainte totale mobilisée à toutes les 5 secondes pendant l'essai, ce qui correspond à une donnée à tous les 1.7 centimètres. Également, un capteur de position mesure la profondeur de chacun des capteurs pendant la descente de la sonde. De cette manière, la lecture de la pression appliquée sur chaque capteur permet d'obtenir un profil continu de la résistance du sol avec la profondeur (figure 3.19).

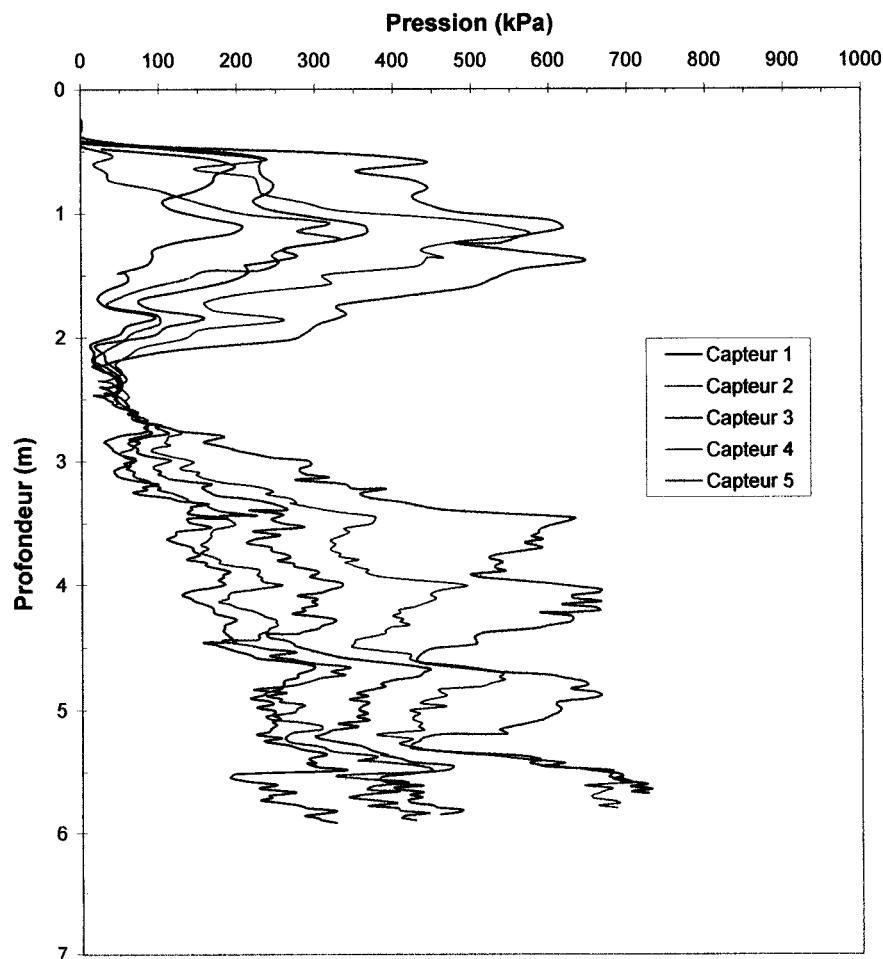


Figure 3.19 Profil de la contrainte latérale d'un essai au cône effilé instrumenté  
(tirée de Longtin, 2003)

### 3.5.2 Traitement des données

Le principe du cône effilé instrumenté est sensiblement le même que celui du pressiomètre puisqu'il s'agit d'une lecture de pression correspondant à une déformation plane donnée. La théorie de l'expansion d'une cavité cylindrique s'applique, et la méthode d'interprétation utilisée avec les données pressiométriques peut être employée.

Les données obtenues avec l'essai au cône effilé instrumenté sont généralement présentées dans un graphique de la pression en fonction de la profondeur pour chaque capteur (figure 3.17). Pour analyser ces données à la manière d'un essai au pressiomètre, la pression lue par chacun des capteurs à une même profondeur est notée sur le profil de la pression en fonction de la profondeur. Puisque le rayon de la sonde est connu au niveau de chaque capteur, la déformation correspondante à ceux-ci est également connue. La relation entre la pression et la déformation peut ainsi être analysée avec la même méthode graphique utilisée pour la courbe pressiométrique.

Le rayon initial de la cavité correspond au rayon du tube Shelby, soit 3,65 centimètres. Les rayons correspondant à chaque capteur et les déformations calculées avec le rayon initial de la cavité sont présentés au tableau 3-2.

Tableau 3-2 Déformation calculée au niveau de chaque capteur du cône effilé instrumenté

Capteur	Rayon (cm)	$\Delta V/V (%)$
1	3.729	4.19
2	3.780	6.76
3	3.865	10.82
4	3.992	16.40
5	4.396	31.06

Contrairement aux données pressiométriques, l'utilisation de la déformation volumétrique  $\Delta V/V$ , où  $V$  correspond au volume total à l'état déformé, s'impose puisque les déformations sont en partie supérieures à 15%. Comme il a été expliqué plus haut, l'utilisation de  $\Delta R/R_0$  s'applique seulement pour les petites déformations.

Pour une même profondeur, les valeurs de pression indiquées par chaque capteur sont mises sous forme de graphique semi-logarithmique en fonction de la déformation propre à chacun des capteurs. L'analyse se fait de la même manière que pour une courbe pressiométrique, c'est-à-dire que la pente de la droite apparaissant dans le graphique semi-logarithmique est calculée et correspond à la résistance au cisaillement non drainé (figure 3.20).

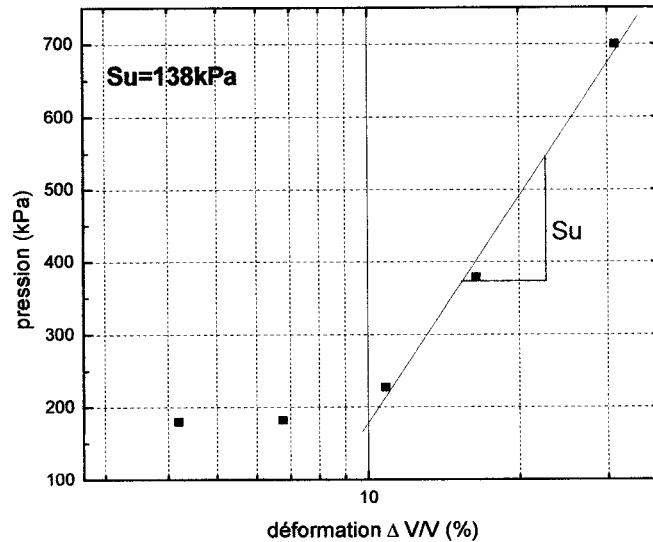


Figure 3.20 Exemple de la détermination de  $S_u$  à partir des données du cône effilé instrumenté

## **CHAPITRE 4**

### **PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Les essais pressiométriques réalisés lors de la période estivale 2002 ont permis de tracer de nombreuses courbes pressiométriques. L'interprétation de ces courbes s'est faite selon les méthodes présentées au chapitre précédent et la résistance au cisaillement non drainé a pu être déduite de l'interprétation de ces courbes. Les essais au scissomètre de même que les essais au cône effilé instrumenté effectués sur le même site ont également été interprétés de manière à déduire la résistance au cisaillement non drainé du sol. Premièrement, les résultats des essais pressiométriques sont présentés. Cette section comprend les détails de chaque courbe, les modifications apportées puis finalement les valeurs de résistance au cisaillement non drainé. Deuxièmement, l'analyse des résultats présente la comparaison des valeurs de  $S_u$  à partir des différents essais in-situ et les résultats de la modélisation des courbes pressiométriques sont discutés.

#### **4.1 Présentation des résultats**

Plusieurs essais pressiométriques ont été réalisés dans le cadre de ce travail. Tous les essais se sont déroulés sur le même site, présenté à la section 3.1, et chacun d'entre eux possède un code qui les identifie. Les résultats de certains essais n'ont pu être retenus pour différentes raisons, et quelques modifications ont été apportées aux courbes expérimentales pour en faciliter l'interprétation. Cette section explique d'abord la

codification des essais, les détails relatifs à chacun des essais et les modifications apportées aux courbes pressiométriques. Finalement, les valeurs de résistance au cisaillement non drainé provenant de ces courbes pressiométriques sont présentées.

#### 4.1.1 Codification des essais

Chaque essai est nommé selon un code qui indique le forage dans lequel il a été réalisé et la profondeur à laquelle il a été fait. Au total, sept trous ont été forés et trois essais ont été effectués à des profondeurs différentes dans chaque forage. Le code identifiant les essais commence d'abord par le numéro du forage, attribué par ordre d'exécution, précédé de la lettre S pour «sondage». Le premier trou à avoir été foré est donc nommé S1, le second S2 et ainsi de suite jusqu'à S7. Ensuite, puisque trois essais ont été faits dans chaque forage à des profondeurs approximatives de 2.5 mètres, 4.5 mètres et 6.5 mètres, l'essai réalisé à 2.5 mètres est identifié par le chiffre 1, celui à 4.5 mètres par le chiffre 2 et le dernier, à 6.5 mètres, par le chiffre 3. Ce chiffre apparaît à la suite du numéro du forage dans lequel l'essai a été effectué. Par exemple, l'essai exécuté à une profondeur d'environ 4.5 mètres dans le cinquième trou à avoir été foré est identifié par le code S5-2. Ainsi, il est possible de connaître facilement la profondeur approximative d'un essai de même que le forage dans lequel il a été fait. Pour le reste du travail, ces codes sont utilisés pour identifier les essais dont il est question.

#### 4.1.2 Description des essais

Dans la section précédente, il est mentionné que les profondeurs recherchées pour effectuer les essais pressiométriques étaient de 2.5, 4.5 et 6.5 mètres. Cependant, pour différentes raisons, certains essais ont été réalisés à des profondeurs légèrement différentes des profondeurs voulues. La codification des essais permet de connaître la

profondeur approximative à laquelle les essais ont été faits, alors que le tableau suivant indique la profondeur réelle à laquelle ils ont été effectués.

Tableau 4-1 Profondeurs des essais pressiométriques

Essai	Date	Profondeur recherchée	Profondeur réelle
S1-1	20-06-2002	2.50	2.39
S2-1	26-06-2002	2.50	2.44
S2-2	02-07-2002	4.50	4.40
S2-3	02-07-2002	6.50	6.00
S3-1	13-08-2002	2.50	2.50
S3-2	13-08-2002	4.50	4.50
S3-3	13-08-2002	6.50	6.94
S4-1	21-08-2002	2.50	2.50
S4-2	21-08-2002	4.50	4.50
S4-3	21-08-2002	6.50	6.00
S5-1	23-08-2002	2.50	2.50
S5-2	23-08-2002	4.50	4.46
S5-3	23-08-2002	6.50	6.00
S6-1	28-08-2002	2.50	2.50
S6-2	28-08-2002	4.50	4.45
S6-3	28-08-2002	6.50	6.45
S7-1	30-08-2002	2.50	2.42
S7-2	30-08-2002	4.50	4.50
S7-3	30-08-2002	6.50	6.45

Bien que la procédure des essais pressiométriques ait été sensiblement la même pour chacun d'entre eux, les courbes pressiométriques obtenues avec ces essais présentent des particularités parfois similaires, et parfois spécifiques pour quelques essais. Les erreurs de manipulations ou le mauvais fonctionnement des appareils utilisés peuvent être la cause de ces particularités. Les détails relatifs à chacun des essais sont décrits ci-dessous, et la description de chaque essai se réfère aux courbes pressiométriques corrigées présentées à l'annexe A.

### S1-1 :

L'essai S1-1 est le deuxième essai réalisé à cet endroit. Lors du premier essai, le joint entre la petite tubulure et le manomètre a été mal scellé, ce qui a provoqué une fuite et les lectures de pression n'ont pu être faites adéquatement. Le comparateur a été remis à zéro, le manomètre saturé à nouveau et bien scellé, et l'essai a été recommencé sans que la sonde n'ait été déplacée. Cette fois, le volume de la sonde a été augmenté jusqu'à une déformation de 25% environ pour s'assurer que l'essai ne soit pas réalisé entièrement dans le sol remanié par le premier essai.

### S2-1 :

L'essai S2-1 n'a pas été interprété et la courbe n'a pas été dessinée puisque le déchargement s'est fait beaucoup trop rapidement et aucune lecture pertinente n'a pu être faite.

### S2-2 et S2-3 :

Aucune difficulté n'est survenue avec les essais S2-2 et S2-3. La pression initiale est de 74 kPa pour le premier et de 85 kPa pour le deuxième, indiquant dans les deux cas que le rayon de la cavité est plus petit que celui de la sonde. La cavité s'est donc légèrement refermée avant l'introduction de celle-ci. Ils sont les derniers à avoir été réalisés avant le remplacement du cylindre du pressiomètre.

### S3-1 :

Aucun résultat n'a été trouvé avec l'essai S3-1. La pression est négative au début et à la fin de l'essai et la courbe obtenue n'est en rien semblable à une courbe pressiométrique typique. Ni le chargement et ni le déchargement n'ont pu être interprétés. Pourtant, aucune difficulté n'est survenue lors de l'installation de la sonde ni lors de l'essai. Un mauvais calcul de la profondeur est peut-être la

cause de cet essai manqué. En effet, si la sonde a été installée à quelques dizaines de centimètres avant la profondeur prévue, l'essai s'est déroulé dans un sol remanié par le forage à la tarière et aucun résultat ne peut en être tiré.

#### S3-2 :

Aucun problème n'a affecté l'essai S3-2. La pression initiale est de 47 kPa. La paroi de la cavité est donc en contact avec la sonde dès que celle-ci est insérée dans le forage.

#### S3-3 :

L'essai S3-3 présente aussi une pression initiale positive, égale à 93 kPa. La pression finale est également positive, même lorsque la sonde est revenue à son diamètre initial. La résistance au cisaillement a été calculée avec le chargement, bien que cette portion de la courbe pressiométrique soit difficilement interprétable. Les difficultés sont survenues lors de la descente de la sonde dans le forage. La cavité semblait s'être refermée et la sonde a dû être forcée pour atteindre la profondeur voulue de 6.5 mètres. Une fois la sonde installée, il s'est avéré que celle-ci était plutôt située à 6.94 mètres. Une erreur dans le calcul de la profondeur est peut-être survenue.

#### S4-1 :

L'essai S4-1 présente une pression négative au début du chargement, et celle-ci commence à augmenter seulement autour de 5% de déformation. La courbe sera modifiée pour permettre la déduction de  $S_u$ .

#### S4-2 :

Lors du chargement, la pression augmente immédiatement au début de l'essai, mais une chute de la pression survient entre 4% et 7% de déformation. La

détermination de  $S_u$  avec la portion chargement de la courbe s'est donc faite approximativement.

#### S4-3 :

Lors de l'essai S4-3, la pression est négative au départ et demeure plus ou moins constante jusqu'à 5% de déformation. De plus, l'essai devait être réalisé à une profondeur de 6.5 mètres mais en raison d'erreurs de manipulation, il très probable que l'essai ait été effectué autour de 6 mètres. À ce niveau, la cavité a été forée à l'aide d'une tarière et non d'un échantillonneur à paroi mince. L'essai a donc probablement été réalisé dans un sol remanié par la technique de forage.

#### S5-1 :

La portion chargement de la courbe pressiométrique de l'essai S5-1 ne permet pas une très bonne interprétation puisqu'une légère chute de pression apparaît lors du chargement. .

#### S5-2 :

Tout comme l'essai S4-2 et S5-1, l'essai S5-2 montre une pression qui augmente dès le début de l'essai, mais une chute de pression survient entre des déformations de 4% et 6%.

#### S5-3 :

Aucun résultat n'a été trouvé avec l'essai S5-3. Les portions chargement et déchargeant de la courbe pressiométrique sont presque superposées et l'interprétation en serait inutile. Comme l'essai S4-3, l'essai S5-3 a probablement été réalisé à une profondeur de 6 mètres plutôt que 6.5 mètres.

**S6-1 :**

Pour l'essai S6-1, la pression négative a été remise à zéro à l'aide d'une burette remplie d'eau et reliée au manomètre. Cette technique a été décrite à la section 3.3.3. Une petite chute de pression entre des déformations de 2% et 3% est également survenue lors de la partie chargement de cet essai.

**S6-2 :**

La pression négative a été remise à zéro avec la burette avant le début de l'essai S6-2. La courbe pressiométrique est très bien définie, tant pour le chargement que le déchargement. L'essai S6-2 est donc un des seuls essais pour lequel la détermination de  $S_u$  a pu être faite sans problème avec la portion chargement de la courbe.

**S6-3 :**

Comme pour les derniers essais mentionnés, la pression a été remise à zéro également au début de l'essai S6-3. La courbe pressiométrique est bien définie et les valeurs de  $S_u$  ont pu être trouvées facilement avec le chargement et le déchargement.

**S7-1 :**

Au début de l'essai S7-1, la pression, qui a été remise à zéro avant de débuter l'essai, est presque constante et commence à augmenter autour de 3% de déformation.

**S7-2 :**

La pression négative a été remise à zéro avant le début de l'essai S7-2. Cet essai présente une chute de pression entre des déformations de 1% et 3% lors du chargement.

### S7-3 :

La pression a également été remise à zéro avant le commencement de l'essai S7-3, et celui-ci montre aussi une légère chute de pression autour de 4% de déformation.

L'allure de certaines courbes pressiométriques qui n'ont pu être interprétées s'explique par des erreurs de manipulation. En effet, il est mentionné plus haut que les essais S4-3 et S5-3 ont probablement été réalisés à des profondeurs où le forage a été fait à la tarière plutôt qu'à l'aide de l'échantillonneur à paroi mince. Il en résulte un remaniement du sol et les courbes pressiométriques obtenues ne présentent pas l'allure souhaitée rendant difficile, voire impossible, leur interprétation.

Cette erreur est également responsable du fait que, sur les courbes des essais S4-3 et S5-3, la pression n'augmente pas immédiatement au début de l'expansion contrairement à la majorité des essais. L'allure d'une telle courbe indique que la sonde n'est pas en contact avec les parois de la cavité en début d'essai. Normalement, puisque le diamètre des tubes à paroi mince utilisés pour former la cavité est sensiblement le même que la sonde, la pression devrait augmenter dès le début de l'expansion car la sonde est directement en contact avec les parois de la cavité. Comme les essais S4-3 et S5-3 ont été effectués au niveau où la cavité a été faite à l'aide de tarières de diamètre plus grand que la sonde, la pression augmente seulement une fois que le volume de la sonde est tel que la membrane s'appuie sur les parois de la cavité. Le même comportement est observé avec les essais S4-1 et S7-1, effectués autour de 2.5 mètres. Pourtant, ces essais ont été réalisés dans une cavité de diamètre supposé égal à celui de la sonde. Cependant, comme le sol est constitué à cette profondeur d'une argile de faible résistance, les parois de la cavité ont pu s'effondrer par endroit après le retrait de l'échantillonneur, laissant une cavité de diamètre légèrement plus grand que celui espéré.

Certaines courbes montrent aussi une discontinuité dans la portion chargement de l'essai. Ces discontinuités sont caractérisées par une chute de pression lors de l'expansion de la sonde. En tout, huit courbes présentent ces discontinuités et différents facteurs peuvent expliquer ce comportement.

Premièrement, lors de la descente de la sonde dans le forage de diamètre égal à celle-ci, une certaine quantité d'argile remaniée peut s'accumuler sur la membrane de la sonde. Cette couche d'argile est d'abord sollicitée lors de l'expansion de la sonde jusqu'à ce que le sol intact soit à son tour sollicité, ce qui expliquerait la chute de résistance lors de l'expansion.

Deuxièmement, la présence de la cavité suite à l'exécution du forage occasionne un léger déchargement du sol qui est habituellement négligé lors de l'analyse des essais pressiométriques. En effet, considérant un comportement élastique-parfaitement plastique du sol lors du déchargement, celui-ci a un effet négligeable si les déformations demeurent élastiques. Par contre, si les déformations atteignent la phase plastique, ce déchargement peut avoir un effet sur la résistance du sol autour de la cavité et provoquer les discontinuités observées au début du chargement.

Troisièmement, l'injection de l'eau dans la sonde se fait à l'aide d'une manivelle qui doit être tournée de manière continue et régulière. Si la vitesse à laquelle la manivelle est tournée n'est pas constante, le taux de déformation du sol sera irrégulier, ce qui pourrait se manifester par des chutes de pression lors de l'expansion de la sonde. Cependant, cette hypothèse est la moins probable puisque non seulement la vitesse de rotation de la manivelle était vérifiée pour justement tenter d'éviter ce problème, mais en plus il serait logique que ce genre de discontinuités survienne également lors du déchargement, ce qui n'est pas le cas.

#### 4.1.3 Courbes pressiométriques nettes

Les courbes pressiométriques corrigées présentant les irrégularités discutées ci-dessus et montrées à l'annexe A ont été transformées en courbes pressiométriques nettes. Dans un essai au pressiomètre typique, deux phases constituent le chargement. La première correspond à la phase de décollement, qui permet de déduire la contrainte horizontale initiale égale à la pression à laquelle la phase d'expansion de la cavité est entamée. Pour les essais S4-1, S4-3 et S7-1 présentant cette phase, l'abscisse du graphique montrant la courbe pression-déformation a été déplacée pour que l'origine corresponde à la pression de décollement. Cette transformation est nécessaire pour que les courbes puissent être interprétées normalement. Les figures 4.1 et 4.2 montrent un exemple de courbe pressiométrique corrigée et de la courbe pressiométrique nette qui en découle.

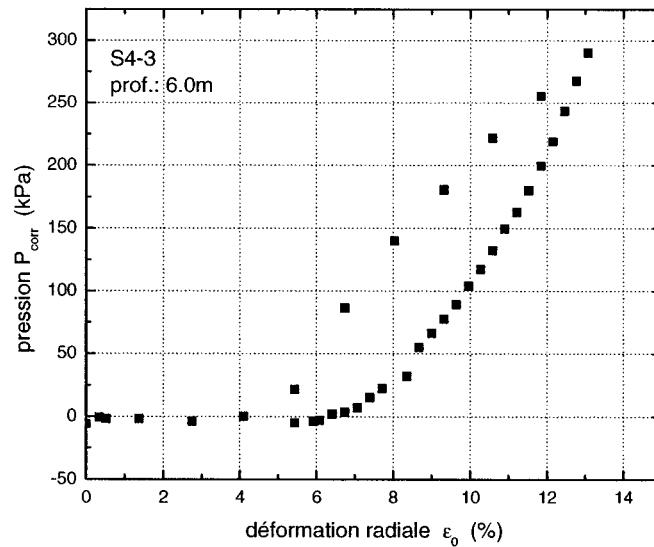


Figure 4.1 Courbe pressiométrique corrigée

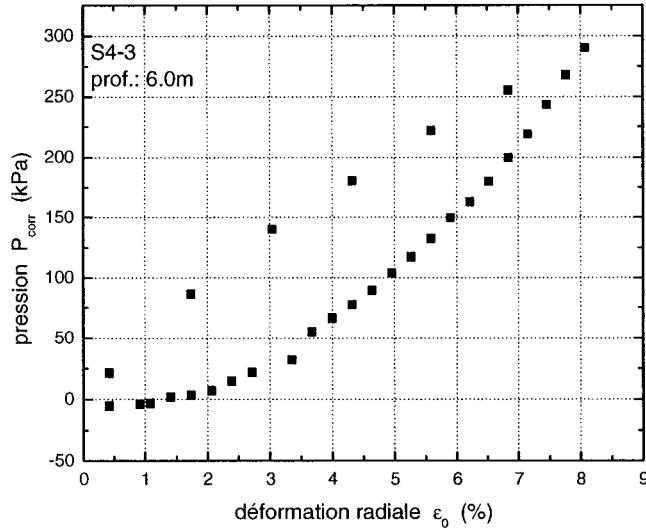


Figure 4.2 Courbe pressiométrique nette

Les courbes présentant une chute de pression dans la phase de chargement ont également été modifiées afin de faciliter leur interprétation. La première portion du chargement située avant la chute de pression a ainsi été éliminée et l'abscisse a été déplacé de manière à considérer uniquement la deuxième portion du chargement suivant la chute de pression. Les figures 4.3 et 4.4 présentent une courbe pressiométrique corrigée dont le chargement montre une chute de pression et la courbe nette correspondante. Cette transformation permet d'interpréter ces courbes normalement, mais elle laisse bien sûr place à l'erreur puisque les causes exactes de cette irrégularité sont inconnues, donc la validité de cette transformation n'est pas vérifiée. Les valeurs de résistance au cisaillement déduites de ces courbes transformées approximativement peuvent donc être inexactes. Les courbes pressiométriques nettes sont montrées à l'annexe B.

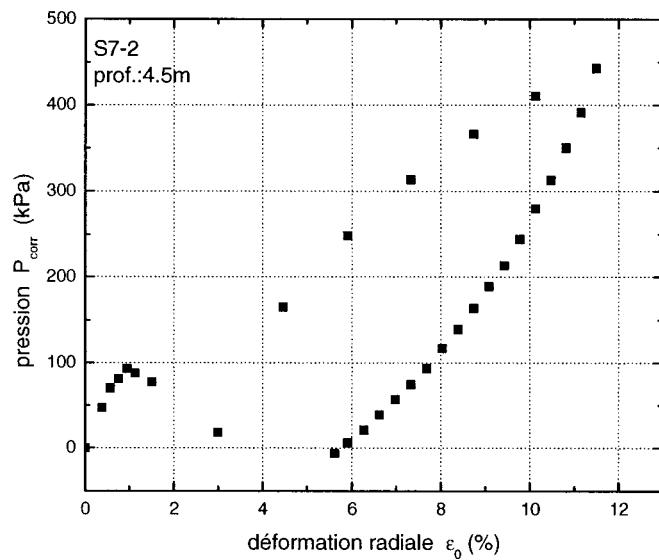


Figure 4.3 Courbe pressiométrique corrigée montrant une chute de pression

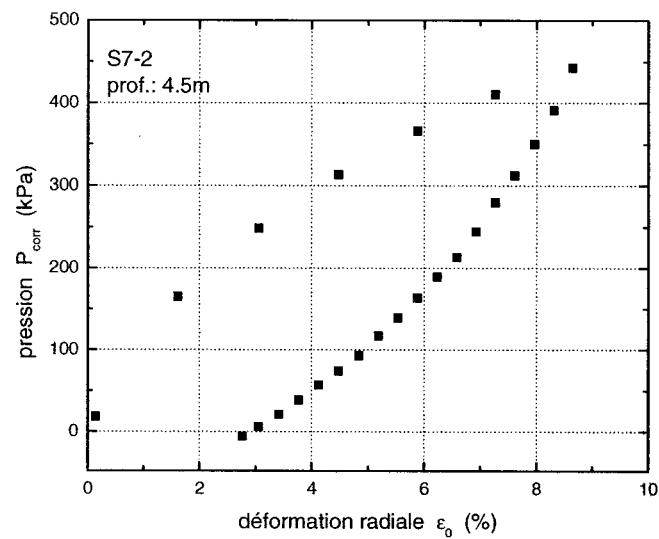


Figure 4.4 Courbe pressiométrique nette

#### 4.1.4 Valeurs de résistance au cisaillement non drainé

Lors de l'étude expérimentale, 20 essais pressiométriques ont été réalisés sur le site de Mascouche. De ce nombre, seulement 16 essais ont pu être interprétés. Les données obtenues suite à ces essais ont été traitées puis mises sous forme de graphiques. L'interprétation de ces graphiques a permis de déterminer la résistance au cisaillement non drainé de l'argile constituant le sol du site d'étude.

Le tableau 3.2 présente les valeurs de  $S_u$  calculées à partir de la pente des courbes pressiométriques de chaque essai, tant pour la partie chargement que déchargement. Les graphiques semi-logarithmiques à partir desquels  $S_u$  a été calculés sont présentés à l'annexe C.

Tableau 4-2 Valeurs de la résistance au cisaillement non drainé déterminées avec les essais au pressiomètre sur le site de Mascouche

	Essai	-1	-2	-3
	Prof. (m)	≈2.5	≈4.5	≈6.5
$S_{u\text{-pressiomètre}} \text{ (kPa)}$ (chargement)	S1	130	-	-
	S2	-	151	177
	S3	-	170	75
	S4	95	180	174
	S5	120	208	-
	S6	83	201	243
	S7	90	188	241
$S_{u\text{-moyen}} \text{ (kPa)}$		104	183	182
$S_{u\text{-pressiomètre}} \text{ (kPa)}$ (déchargement)	S1	37	-	-
	S2	-	129	138
	S3	-	116	75
	S4	33	107	76
	S5	38	118	-
	S6	41	128	128
	S7	33	113	132
$S_{u\text{-moyen}} \text{ (kPa)}$		36	119	110

Les valeurs de  $S_u$  indiquées dans ce tableau varient beaucoup d'un essai à l'autre, particulièrement pour les valeurs déduites des courbes de chargement. D'après les valeurs obtenues à 2.5m, il est possible de détecter la couche de faible résistance présente sous la croûte de surface. Cette couche apparaît sur le profil du sol présenté à la section 3.1. La différence entre les valeurs de  $S_u$  obtenues avec le chargement et celles déterminées avec le déchargement constitue le principal fait observable à partir du tableau présentant les valeurs de  $S_u$ . Selon la théorie d'interprétation des essais en déchargement, les valeurs de  $S_u$  qui en découlent devraient en effet être sensiblement les mêmes que celles provenant de l'analyse du chargement. Ces différences seront discutées dans la section suivante.

## 4.2 Comparaison des résultats et discussion

La résistance au cisaillement non drainé de l'argile de Mascouche a été déterminée à partir des phases de chargement et de déchargement d'essais pressiométriques, à partir d'essais scissométriques et finalement à partir d'essais au cône effilé instrumenté. Bien que la résistance au cisaillement non drainé doive être considérée comme propre à un type d'essais (Wroth, 1984), la comparaison de celle-ci avec d'autres essais permet néanmoins de valider d'une certaine manière ces valeurs. La comparaison des valeurs de résistance au cisaillement non drainé obtenues avec les différents essais compose donc la première partie de l'analyse des résultats. Ensuite, la modélisation de courbes pressiométriques théoriques à partir des données expérimentales permet de mieux comprendre la différence des résultats obtenus entre le chargement et le déchargement.

### 4.2.1 Pressiomètre vs scissomètre

Les valeurs de résistance au cisaillement non drainé obtenues avec le pressiomètre et le scissomètre ont maintes fois fait l'objet de comparaison par plusieurs auteurs.

Généralement, les valeurs de  $S_u$  déterminées à l'aide de la courbe pression-expansion d'un essai au pressiomètre sont supérieures aux valeurs de  $S_u$  déterminées à l'aide du scissomètre. Les valeurs obtenues dans le cadre de ce travail avec le pressiomètre Texam ne démentent pas ce fait observé dans les études précédentes. En effet, tant les valeurs trouvées à partir de la courbe de chargement que celle trouvées à partir du déchargement sont plus élevées que les valeurs trouvées au scissomètre, à l'exception des valeurs de  $S_u$  déterminées avec la phase de déchargement de tous les essais effectués à 2.5 mètres. Les sondages au scissomètre ont été réalisés à proximité des essais pressiométriques avec un scissomètre Nilcon. Des palettes de 6.5 cm par 13.0 cm ont été utilisées. Le tableau 4-3 montre que les valeurs de  $S_u$  trouvées avec la courbe de chargement sont en moyenne de 2.0 à 2.7 fois plus élevées que celle trouvées au scissomètre. Pour ce qui est des valeurs déterminées avec la courbe de déchargement, elles sont de 0.7 à 1.6 fois plus élevées que les valeurs du scissomètre.

Tableau 4-3 Comparaison des valeurs de  $S_u$  au pressiomètre avec le scissomètre

Prof. (m)	Essai	$S_{u-ch}$ (kPa)	$S_{u-déch}$ (kPa)	$S_{u-scisso}$ (kPa)	$\frac{S_{u-ch}}{S_{u-scisso}}$	$\left( \frac{S_{u-ch}}{S_{u-scisso}} \right)_{moy}$	$\frac{S_{u-déch}}{S_{u-scisso}}$	$\left( \frac{S_{u-déch}}{S_{u-scisso}} \right)_{moy}$
2.5	S1-1	130	37	51	2.6	2.0	0.7	0.7
	S4-1	95	33		1.9		0.7	
	S5-1	120	38		2.3		0.8	
	S6-1	83	41		1.6		0.8	
	S7-1	90	33		1.8		0.7	
4.5	S2-2	151	129	78	1.9	2.3	1.7	1.5
	S3-2	170	116		2.1		1.5	
	S4-2	180	107		2.3		1.4	
	S5-2	208	118		2.7		1.5	
	S6-2	201	128		2.6		1.6	
	S7-2	188	113		2.4		1.5	
6.5	S2-3	177	138	68	2.6	2.7	2.0	1.6
	S3-3	75	75		1.1		1.1	
	S4-3	174	76		2.5		1.1	
	S6-3	243	128		3.5		1.9	
	S7-3	241	132		3.5		1.9	

Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences entre la résistance au cisaillement non drainé obtenue au pressiomètre et au scissomètre. Tout d'abord, si l'essai pressiométrique n'est pas fait assez rapidement, un drainage partiel du sol autour de la sonde peut causer la consolidation du sol et résulter en une valeur de  $S_u$  plus élevée. Ensuite, des taux de déformation élevés dans le sol autour de la membrane en expansion et un faible rapport longueur-diamètre ( $L/D$ ) de la sonde utilisée peuvent également contribuer à l'obtention de valeurs de  $S_u$  élevées. À l'inverse, la résistance au

cisaillement non drainé déterminée avec le scissomètre est sous-estimée étant donné la distribution non uniforme des contraintes aux extrémités inférieures et supérieures des lames du scissomètre (Wroth, 1984).

Pour éviter le drainage et assurer des conditions non drainées lors d'un essai pressiométrique, Baguelin et al. (1986) proposent d'utiliser un taux de déformation radiale d'au moins 1%/minute. Le taux de déformation exact auquel les essais pressiométriques ont été effectués n'a pas été calculé, mais le taux de déformation suggéré par Baguelin et al. (1986) pour éviter le drainage partiel a été pris en compte avant le début de l'expérimentation. Pour une déformation maximale autour de 10% dans la phase d'expansion, suivi de la phase de contraction effectuée à une vitesse légèrement plus lente, la durée des essais a été en moyenne de 12 à 15 min. Les conditions non drainées étaient donc probablement satisfaites lors des essais puisqu'il est certain que le taux de déformation utilisé n'était pas inférieur à 1%/minute.

Le rapport  $L/D$  de la sonde intervient dans la condition de déformation plane. Pour que cette condition soit satisfaite, la sonde devrait être de longueur infinie, alors que celle utilisée avec le pressiomètre Texam a un rapport  $L/D = 5$ . Silvestri (2003) mentionne plusieurs études qui ont montré que la résistance au cisaillement non drainé déterminée avec une sonde de rapport  $L/D = 6$  est surestimée par un facteur de 1.14 à 1.50 par rapport au cas idéal. L'influence du rapport  $L/D$  sur les argiles de l'est du Canada reste cependant peu connue.

Silvestri (2003) a fait la comparaison des valeurs de  $S_u$  trouvées à partir d'essais au pressiomètre auto-foreur et au scissomètre réalisés dans une argile de l'est du Canada. Dans ce cas, les valeurs de  $S_u$  obtenues au pressiomètre sont en moyenne 39% plus élevées que celle obtenues au scissomètre. D'après cet auteur, les concentrations de contraintes présentes aux extrémités des lames du scissomètre produisent la rupture progressive de l'argile soumise à l'essai et sous-estime les valeurs de  $S_u$ . En effet,

comme les argiles sensibles de l'est du Canada possèdent une structure floculée, les concentrations de contraintes qui se développent lors de la rotation des lames du scissomètre provoquent l'apparition de zones de rupture localisées de faible résistance, menant à une rupture prématuée de l'argile. Lors de l'expansion de la sonde pressiométrique dans l'argile, l'absence de telles conditions laisse croire que les valeurs de  $S_u$  trouvées avec le pressiomètre seront normalement plus élevées que celles trouvées avec le scissomètre. Les études faites par Silvestri et Aubertin (1988) sur l'argile de Louiseville ont montré que l'essai au scissomètre peut sous-estimer d'environ 25% la résistance au cisaillement non drainé des argiles de l'est du Canada.

Pour ce qui est de la résistance au cisaillement obtenue à une profondeur de 2.5 mètres avec la phase de déchargement des courbes pressiométriques, la raison de sa valeur inférieure à celle du scissomètre demeure inconnue. Les essais réalisés à cette profondeur ont été effectués selon la procédure utilisée pour les autres essais, avec les mêmes modifications apportées au cours de la période d'expérimentation. La raison expliquant ces faibles valeurs n'est donc probablement pas reliée aux procédures d'essai. De plus, les valeurs de  $S_u$  déterminées avec la phase de chargement de ces essais semblent réalistes lorsque comparées avec les valeurs de  $S_u$  au scissomètre. Aussi, le fait que ces faibles valeurs ne soient trouvées qu'à 2.5 mètres peut laisser croire que les caractéristiques de l'argile à cette profondeur soient en partie responsables de ces valeurs inattendues. En effet, l'argile située à 2.5 mètres de profondeur est très molle contrairement à celle constituant le sol à des profondeurs supérieures à 3.5 mètres. Cette dernière possède une résistance au cisaillement non drainé allant jusqu'au double de celle de l'argile molle retrouvée entre 2 et 3.5 mètres. Cette argile est peut-être plus sensible à la phase d'expansion de la sonde et ses paramètres s'en trouvent ainsi modifiés lorsque la phase de déchargement est amorcée, d'où les valeurs de  $S_u$  plus faibles que celles du scissomètre. Également, rien n'indique que les valeurs de  $S_u$  provenant du déchargement soient valides, d'autant plus qu'elles sont toutes inférieures à celles déduites du chargement, et ce pour tous les essais, peu importe la profondeur.

Ce point sera discuté plus loin avec la modélisation des courbes pressiométriques. Finalement, la comparaison de la résistance au cisaillement non drainée obtenue avec le pressiomètre et celle obtenue avec le scissomètre permet de valider les valeurs obtenues sur la base de corrélations déjà établies. La comparaison des valeurs de  $S_u$  trouvées avec différents essais doit tenir compte qu'il n'existe pas de valeur unique de  $S_u$  étant donné les modes de déformation propres à chaque essai.

#### 4.2.2 Pressiomètre vs cône effilé instrumenté

Parallèlement aux essais pressiométriques, des essais au cône effilé instrumenté (ISCT) ont été réalisés sur le site de Mascouche. Ces essais permettent également de déduire la résistance au cisaillement non drainé de l'argile. Puisque l'essai ISCT correspond à un essai en chargement et que la phase de déchargement est absente, la comparaison des valeurs de  $S_u$  se fera uniquement avec les valeurs obtenues à partir de la phase de chargement des essais pressiométriques.

Deux méthodes d'interprétations ont été utilisées pour la détermination des valeurs de  $S_u$  avec l'essai ISCT. La première correspond à celle employée dans ce travail pour les essais pressiométriques, soit le calcul de la pente de la courbe pressiométrique dans un graphique semi-logarithmique. La méthode détaillée appliquée aux essais ISCT est présentée à la section 3.5 du chapitre précédent. La deuxième méthode est celle de Ladanyi (1972), décrite à la section 2.2. Les résultats obtenus à partir de cette méthode proviennent du mémoire de maîtrise de Longtin (2003).

Parmi les essais ISCT, seulement trois d'entre eux ont pu être interprétés selon la première méthode. La détermination de  $S_u$  avec les données du cône instrumenté est difficile puisque seulement cinq points, correspondant aux cinq capteurs, permettent de tracer la courbe à analyser. De plus, il a été possible d'utiliser les cinq points pour

calculer la pente de la droite uniquement pour les données des essais à 4.5 mètres de profondeur. Pour les données obtenues à 2.5 mètres, les cinq points sont trop dispersés pour appliquer la méthode d'interprétation. Également, les essais ISCT ont été réalisés jusqu'à une profondeur inférieure à 6 mètres, empêchant ainsi de déduire les valeurs de  $S_u$  à 6.5 mètres. La comparaison des valeurs de  $S_u$  peut donc se faire uniquement pour les valeurs déterminées à 4.5 mètres.

Les trois mêmes essais ont été analysés avec la méthode de Ladanyi. Dans ce cas, puisque les résultats proviennent d'une autre étude, les valeurs de  $S_u$  ont été déduites pour des profondeurs différentes de celles des essais pressiométriques. Les valeurs retenues correspondent à celles déterminées aux profondeurs les plus proches de celles des essais au pressiomètre, soient 4.6 et 4.75 mètres. Le tableau 4-4 montre les valeurs de résistance au cisaillement non drainé obtenues à partir de ces deux méthodes.

Tableau 4-4 Comparaison des valeurs de  $S_u$  provenant des essais au pressiomètre et ISCT

Essai	Prof. (m)	# essai	$S_u$ (kPa)	moyenne (kPa)	$S_{u-pmt}/S_{u-isct}$
Pressiomètre (PMT)	4.50	S2-2	151	183	1.18
		S3-2	170		
		S4-2	180		
		S5-2	208		
		S6-2	201		
		S7-2	188		
ISCT (méthode de la pente)	4.50	F2-8	133	155	
		F2-9	194		
		F2-10	138		
ISCT (méthode de Ladanyi)	4.60	F2-9	160	200	0.92
	4.75	F2-8	239		

L'essai au cône effilé instrumenté étant semblable à un essai pressiométrique, les valeurs de  $S_u$  obtenues avec les deux essais devraient être du même ordre de grandeur. Cependant, à l'exception de l'essai F2-10, le calcul de la pente s'est fait avec les cinq points correspondant aux cinq capteurs, sans considérer les phases élastique et plastique d'une courbe pressiométrique habituelle. Étant donné la grande sensibilité des capteurs, ces phases sont souvent absentes dans la distribution des points obtenus avec l'essai ISCT. D'après Longtin (2003), cette approximation sous-estime d'environ 20% les valeurs de  $S_u$  obtenues d'après le calcul de la pente avec les essais ISCT. Effectivement, la valeur moyenne de  $S_u$  déterminée à 4.5 mètres avec les essais pressiométriques est supérieure de 18% de la moyenne des valeurs de  $S_u$  obtenues en calculant la pente des essais ISCT. Les courbes issues des essais ISCT qui ont été interprétées sont montrées à l'annexe D. Pour ce qui est des valeurs déterminées avec la méthode de Ladanyi (1972), puisqu'elles proviennent de profondeurs différentes de 4.5 mètres et considérant le fait que l'essai ISCT permet de prendre un grand nombre de mesures le long du dépôt de sol et ainsi de détecter de minces couches de résistance variable, il est logique que les valeurs obtenues avec le pressiomètre soient plus ou moins du même ordre de grandeur que celles obtenues avec l'essai ISCT selon la méthode de Ladanyi.

#### 4.2.3 Modélisation des courbes pressiométriques

Dans les sections précédentes, les valeurs de résistance au cisaillement non drainé ont été comparées avec celles provenant d'autres essais in-situ. Ces comparaisons ont permis, en particulier pour les valeurs de  $S_u$  déterminées avec la phase de chargement, de valider les valeurs déduites à partir des essais pressiométriques effectués sur le site de Mascouche. Malheureusement, aucune autre étude réalisée sur ce site ne présente d'essais en déchargement. La modélisation du comportement de l'argile de Mascouche à partir des données obtenues au pressiomètre est donc un point important qui permet de mieux comprendre les résultats obtenus.

En effet, les valeurs de  $S_u$  déterminées avec la courbe de déchargement sont plus faibles que celles obtenues avec la courbe de chargement. Pourtant, la méthode d'interprétation du déchargement proposée par Houlsby et Whitters (1988) et utilisée dans ce travail pour déduire la résistance au cisaillement non drainé prévoit que les valeurs devraient être semblables. Pour vérifier la validité des valeurs de  $S_u$  trouvées avec l'analyse du déchargement, la courbe pressiométrique théorique correspondant à chaque essai a été dérivée à partir des données obtenues.

La modélisation, décrite à la section 3.4, a été faite d'après un modèle de sol élastique-parfaitement plastique proposé par Houlsby et Whitters (1988) et Jefferies (1988). Un modèle hyperbolique a également été proposé par Ferreira et Robertson (1992). Le choix du modèle élastique-parfaitement plastique allait de soi puisque la méthode d'interprétation du déchargement qui a permis de déduire  $S_u$  est celle présentée par Houlsby et Whitters (1988). De plus, Pye (1995) a étudié les deux modèles et ses recherches ont montré que pour une argile raide, le rapport de  $S_u$  trouvé selon le modèle hyperbolique avec le  $S_u$  trouvé selon le modèle élastique-parfaitement plastique est de 0.98. Les deux modèles permettent donc une bonne déduction de la résistance au cisaillement non drainé.

La modélisation consiste à utiliser les valeurs de  $S_u$  et de  $G$  dans l'équation théorique des courbes de chargement et de déchargement des essais pressiométriques et de comparer les courbes théoriques obtenues avec les courbes expérimentales. En modifiant le paramètre  $G$  dans l'équation théorique, la courbe théorique qui coïncide le mieux avec la courbe expérimentale est conservée. Puisque la phase de déchargement du sol est moins sensible au remaniement que celle de chargement, Ferreira et Robertson (1992) et Pye (1995) proposent de commencer par modéliser celle-ci, puis la courbe de chargement peut à son tour être modélisée sans trop compromettre la courbe de déchargement.

Les premières courbes théoriques modélisées à partir des paramètres déduits du déchargement sont présentées à l'annexe E. La figure 4.5 en est un exemple. Pour ce qui est de la phase de déchargement, les données expérimentales suivent plutôt bien la courbe de déchargement théorique, et ce pour la majorité des essais. Par contre, les données expérimentales obtenues lors de la phase d'expansion de l'essai ne coïncident pas avec les courbes théoriques. La modélisation a été faite de manière à ce que la dernière partie du chargement corresponde le mieux possible avec les données expérimentales, comme proposé par Ferreira et Robertson (1992). Ces auteurs négligent le début du chargement étant donné le remaniement qui peut influencer les données expérimentales au début de la phase d'expansion. Cependant, pour ajuster la courbe théorique de cette manière, la valeur du paramètre  $G$  doit être, pour la majorité des cas, doublée par rapport à la valeur déterminée pour la modélisation du déchargement. Le tableau 4-5 présente les valeurs des paramètres utilisés pour la modélisation. L'augmentation importante du paramètre  $G$  dans la phase d'expansion de la courbe théorique et l'incohérence des données expérimentales avec cette courbe indiquent que la valeur de la résistance au cisaillement trouvée à partir de la phase de contraction semble en effet ne pas s'appliquer à la courbe de chargement expérimentale.

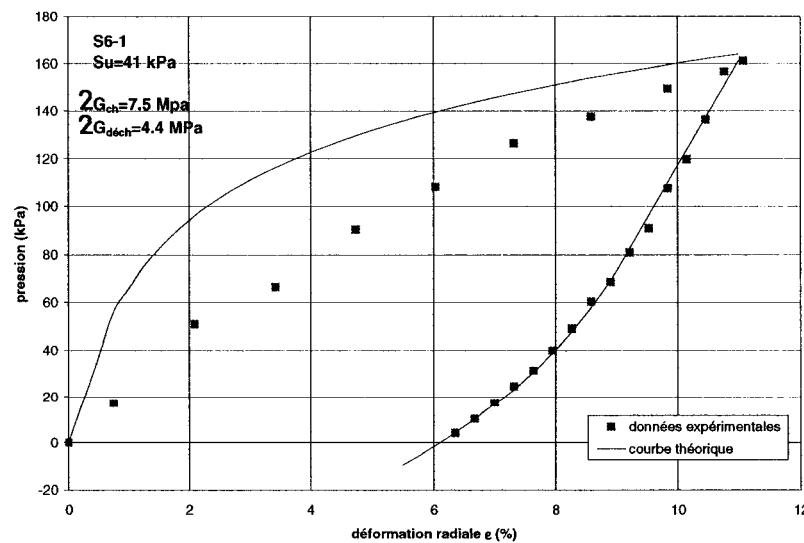


Figure 4.5 Modélisation de la courbe pressiométrique à partir de  $S_{u-\text{déch}}$

Tableau 4-5 Paramètres utilisés pour la modélisation à partir des  $S_u$  trouvés avec le déchargement

Prof. (m)	Essai	$S_{u\text{-déch}}$ (kPa)	$2S_{u\text{-déch}}$ (kPa)	$2G_{ch}$ (MPa)	$2G_{déch}$ (MPa)	$G_{ch}/G_{déch}$
2.5	S1-1	37	74	11.0	5.7	1.9
	S4-1	33	66	8.0	5.2	1.5
	S5-1	38	75	8.0	5.7	1.4
	S6-1	41	82	7.5	4.4	1.7
	S7-1	33	65	5.5	5.0	1.1
	<i>moyenne</i>	36	72	8.0	5.2	1.5
4.5	S2-2	129	257	26.0	16.0	1.6
	S3-2	116	231	24.0	12.0	2.0
	S4-2	107	214	35.0	14.0	2.5
	S5-2	118	235	24.0	12.0	2.0
	S6-2	128	255	24.0	12.0	2.0
	S7-2	113	225	24.0	10.0	2.4
	<i>moyenne</i>	119	236	26.2	12.7	2.1
6.5	S2-3	138	276	30.0	15.0	2.0
	S4-3	76	151	15.0	6.0	2.5
	S6-3	128	255	18.0	8.5	2.1
	S7-3	132	264	17.0	8.2	2.1
	<i>moyenne</i>	119	237	20.0	9.4	2.2

Comme les valeurs de  $S_u$  diffèrent selon qu'elles aient été déterminées avec la phase d'expansion ou de contraction, la modélisation de la phase d'expansion de toutes les courbes expérimentales a été refaite avec les valeurs de  $S_u$  déduites du chargement. La figure 4.6 montre l'exemple d'une courbe théorique obtenue de cette manière et superposée aux données expérimentales, alors que les autres courbes sont présentées à l'annexe F. En utilisant la résistance au cisaillement déterminée à partir du chargement pour modéliser celui-ci, les données expérimentales suivent évidemment très bien la

courbe théorique. Les valeurs des différents paramètres utilisés apparaissent au tableau 4-6.

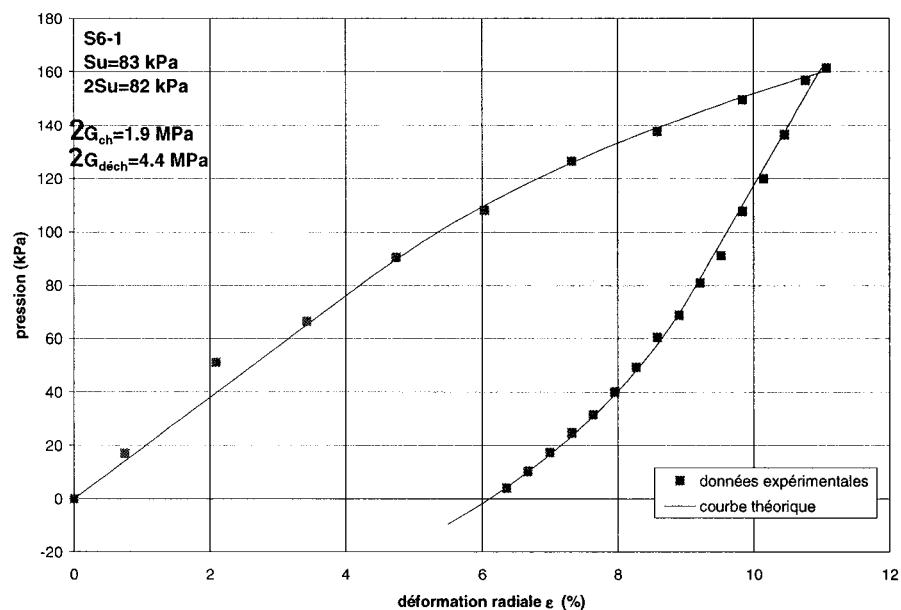


Figure 4.6 Modélisation d'une courbe pressiométrique à partir de  $S_{u-ch}$  et de  $2S_{u-déch}$

Tableau 4-6 Paramètres utilisés pour la modélisation à partir de  $S_u$  du chargement et de  $2S_u$  du déchargement

Prof. (m)	Essai	$S_{u\text{-ch}}$ (kPa)	$2S_{u\text{-déch}}$ (kPa)	$2G_{ch}$ (MPa)	$2G_{déch}$ (MPa)	$G_{déch}/G_{ch}$
2.5	S1-1	130	74	0.9	5.7	6.33
	S4-1	95	66	1.8	4.4	2.41
	S5-1	120	75	1.7	4.2	2.55
	S6-1	83	82	1.9	4.4	2.32
	S7-1	90	65	1.3	4.0	3.08
	<i>moyenne</i>	104	72	1.5	4.5	3.33
4.5	S2-2	151	257	16.0	16.0	1.00
	S3-2	170	231	10.0	12.0	1.20
	S4-2	180	214	13.0	14.0	1.08
	S5-2	208	235	9.7	12.0	1.24
	S6-2	201	255	10.0	12.0	1.20
	S7-2	188	225	8.4	10.0	1.19
	<i>moyenne</i>	183	236	11.2	12.7	1.15
6.5	S2-3	177	276	17.0	15.0	0.88
	S4-3	174	151	4.2	6.0	1.44
	S6-3	243	255	6.5	8.5	1.31
	S7-3	241	264	7.0	8.2	1.17
	<i>moyenne</i>	209	237	8.7	9.4	1.2

La valeur du paramètre  $G$  dans ce cas est beaucoup plus proche de la valeur de  $G$  utilisée pour modéliser le déchargement, à l'exception des essais réalisés à 2.5 mètres. Pour les essais effectués à 4.5 et 6.5 mètres, le module de cisaillement  $G$  correspondant aux meilleures modélisations est en moyenne supérieur de 15% et de 20% pour la phase de déchargement par rapport à la phase de chargement. Pour les essais effectués à 2.5 mètres, le paramètre  $G$  correspondant à la phase de déchargement est plus que le double du  $G$  correspondant à la phase de chargement.

La valeur plus élevée du module de cisaillement trouvée lors de la phase de contraction est peut-être due au remaniement de l'argile qui peut affecter la phase d'expansion, particulièrement au début de l'essai. Puisque la courbe théorique est modélisée pour correspondre aux données expérimentales du chargement qui peuvent être influencées par le remaniement, le module de cisaillement qui en découle peut ne pas être exact. D'ailleurs, Pye (1995) mentionne que tout au long de la modélisation, le paramètre  $G$  doit être assumé comme étant fonction de la procédure de modélisation visant à obtenir la meilleure courbe théorique possible, et non comme une propriété du sol. Le module de cisaillement  $G$  est utilisé comme un paramètre variable permettant d'ajuster la courbe pressiométrique théorique avec les données expérimentales de la phase d'expansion et de contraction. On peut donc s'attendre à obtenir des valeurs de  $G$  variables. La vraie valeur de  $G$  devrait alors être déterminée à partir d'une boucle chargement-déchargement réalisée lors de l'expansion. Cette technique n'a malheureusement pas été expérimentée lors des essais pressiométriques réalisés dans le cadre de ce travail.

Les valeurs de la résistance au cisaillement non drainé déterminée avec la pente de la courbe de déchargement ne sont pas celles attendues. Houlsby et Whiters (1988), Jefferies (1988) et Ferreira et Robertson (1992) assument tous que la résistance lors du chargement égale la résistance lors du déchargement. Les phases d'expansion et de contraction de l'essai pressiométrique peuvent être considérées comme un problème de déformation plane non drainé où le chemin des contraintes lors du déchargement est l'inverse du chemin des contraintes lors du chargement. Puisque la résistance en déformation plane est la même pour le chargement et le déchargement, ces auteurs ont conclu qu'il est raisonnable d'assumer un rapport de 2 entre la résistance ultime atteinte lors du déchargement et celle atteinte lors du chargement, soit  $\tau_{ult}^*/\tau_{ult} = 2$ . La figure 4.7 permet de bien visualiser  $\tau_{ult}^*$  et  $\tau_{ult}$ , où  $\tau_{ult}^* = 2S_u$  et  $\tau_{ult} = S_u$ . Jefferies (1988) a d'ailleurs étudié l'effet de l'anisotropie de résistance sur le modèle proposé en supposant une diminution de résistance de 30% lors du déchargement sur l'argile raide de

Beaufort. Les résultats obtenus ont montré que l'anisotropie de la résistance était négligeable sur la courbe expansion/contraction.

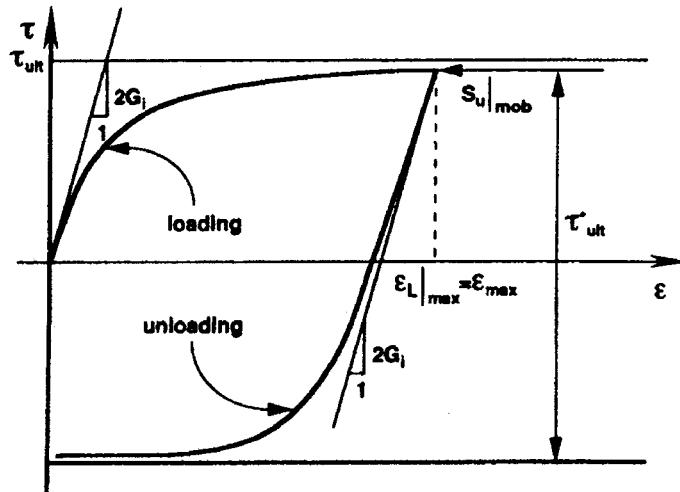


Figure 4.7 Modèle proposé par Ferreira et Robertson  
(tirée de Ferreira et Robertson, 1992)

Dans le cas de l'argile de Mascouche, l'anisotropie de la résistance semble plus importante et non négligeable. Au tableau 4-7 se trouvent les valeurs du rapport  $\tau^*_{ult}/\tau_{ult}$  qui correspond à la résistance ultime atteinte lors du déchargement, égale à la pente de cette courbe dans un graphique semi-log et jusqu'ici considérée comme  $2S_u$ , sur la résistance ultime atteinte lors du chargement, égale à  $S_u$ . Comme expliqué plus haut, ce rapport devrait être de 2 dans le cas où la résistance est assumée comme étant isotrope.

Tableau 4-7 Valeurs de  $\tau_{ult}$  et  $\tau^*_{ult}$  d'après le chargement et le déchargement

Prof. (m)	Essai	$\tau_{ult}$ (kPa)	$\tau^*_{ult}$ (kPa)	$\tau^*_{ult}/\tau_{ult}$	$(\tau^*_{ult}/\tau_{ult})_{moy}$
2.5	S4-1	95	66	0.69	0.76
	S5-1	120	75	0.63	
	S6-1	83	82	0.99	
	S7-1	90	65	0.72	
4.5	S2-2	151	257	1.70	1.31
	S3-2	170	231	1.36	
	S4-2	180	214	1.19	
	S5-2	208	235	1.13	
	S6-2	201	255	1.27	
	S7-2	188	225	1.20	
6.5	S2-3	177	276	1.56	1.23
	S4-3	174	151	0.87	
	S6-3	243	255	1.05	
	S7-3	241	264	1.10	

Pour les essais réalisés à 2.5 mètres dans l'argile molle, le rapport  $\tau^*_{ult}/\tau_{ult}$  est en moyenne égal à 0,76, indiquant une diminution de résistance supérieure à 100%. Cette couche d'argile molle qui apparaît sur le profil du sol introduit à la section 3.1 semble énormément sensible à l'effet de l'expansion et de contraction de la sonde. Pour les essais effectués à 4.5 mètres et 6.5 mètres dans l'argile raide, la moyenne des rapports  $\tau^*_{ult}/\tau_{ult}$  calculés avec les meilleurs résultats pour chaque essai est de 1.31 et 1.23 respectivement. Il semble donc que la résistance de l'argile de Mascouche diminue en moyenne de 69% et de 77% lors de la phase de déchargement selon la profondeur.

La diminution importante de la résistance de l'argile étudiée dans la phase de déchargement n'est pas négligeable. L'hypothèse selon laquelle la résistance du sol peut être assumée comme ayant la même valeur lors des deux phases d'un essai

pressiométrique ne s'applique donc pas à l'argile de Mascouche. Pour valider son hypothèse, Jefferies (1988) a effectué des essais triaxiaux non drainés sur l'argile de Beaufort. Juste avant que la résistance en compression au pic soit atteinte, le sens de la contrainte de cisaillement était inversé. L'essai se continuait alors jusqu'à l'atteinte d'une résistance au pic dans le sens opposé. Les résultats obtenus ont montré un rapport de la résistance au déchargement avec celle au chargement  $\beta = 0.83$ . La modélisation tenant compte de ce rapport a permis à Jefferies (1988) de conclure que l'anisotropie de la résistance était négligeable sur la courbe expansion/contraction. Dans un tel essai, l'inversion des contraintes, qui simule la phase de déchargement d'un essai pressiométrique, survient juste avant l'atteinte du pic, autour de 4%. L'argile ne subit donc pas nécessairement de déformation plastique importante. Pour l'argile de Mascouche, une déformation en moyenne de 10% a été atteinte avant l'amorce du déchargement. Pour cette argile, la résistance au pic est généralement atteinte autour de 1% de déformation radiale. L'argile subit donc une déformation plastique importante avant le début de la phase de déchargement. Malheureusement, il est difficile de savoir si ces déformations plastiques subies par l'argile peuvent influencer la résistance au déchargement de celle-ci. En fait, le cheminement des contraintes lors d'un essai pressiométrique peut être connu, mais uniquement pour la phase élastique du chargement. Aussitôt que les déformations deviennent plastiques, le cheminement des contraintes est inconnu (Hamouche, 1995).

Le rapport de la résistance au déchargement sur la résistance au chargement  $\beta = S_u_{déch}/S_u$  devrait quand même être préférablement déterminé au laboratoire. Une fois ce rapport connu, la détermination de la valeur de  $S_u$  pourra se faire facilement en calculant la pente de la phase de déchargement dans un graphique semi-log, qui sera égale à  $(1+\beta)S_u$  plutôt que  $2S_u$  comme il a été supposé.

Finalement, les courbes de chargement des essais pressiométriques ont pour la plupart subi quelques modifications pour ajuster les irrégularités qu'elles présentaient. Dans

certains cas, les modifications peuvent varier selon l'individu qui interprète les courbes, comme ce pourrait être le cas avec les chutes de résistances présentes dans plusieurs courbes de chargement et discutées dans une section précédente. La résistance au cisaillement non drainé déduite de ces courbes est donc approximative et risque de varier beaucoup. D'ailleurs, les  $S_u$  correspondant à la pente des courbes de chargement varient de 151 à 208 kPa pour les essais à 4.5 mètres, et de 177 à 241 kPa pour les meilleurs essais à 6.5 mètres. D'un autre côté, les valeurs de la pente des courbes de déchargement qui est proportionnelle à  $S_u$ , varient de 214 à 257 kPa à 4.5 mètres, et de 255 à 276 kPa pour les meilleurs essais à 6.5 mètres. L'intervalle des valeurs issues du déchargement est plus restreint que celui des valeurs issues du chargement qui laissent place davantage aux approximations. Puisque le déchargement est moins sujet au remaniement et par conséquent aux irrégularités, la résistance au cisaillement qui pourrait être déduite de la phase de contraction serait sûrement plus représentative de l'argile. Par contre, si la valeur de  $\beta$  est inconnue, ce qui est le cas pour l'argile de Mascouche, la façon la plus sûre de déduire  $S_u$  à partir d'un essai pressiométrique reste l'interprétation de la phase d'expansion, malgré l'influence possible du remaniement et les modifications apportées au courbes de chargement qui présentaient des irrégularités.

## **CHAPITRE 5**

### **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

Les essais in-situ utilisés pour déterminer différents paramètres de l'argile possèdent l'avantage d'être plus représentatifs du sol étudié que les essais au laboratoire qui nécessitent l'échantillonnage du sol. Le remaniement du sol est donc plus important pour les essais au laboratoire, influençant ainsi les résultats obtenus. Les essais in-situ ne sont pas pour autant totalement à l'abri du remaniement, qui est un des problèmes majeurs des essais au pressiomètre. L'interprétation des ces essais à partir de la portion déchargement de la courbe pressiométrique permet d'éviter l'influence du remaniement dû au pré-forage nécessaire à l'insertion de la sonde du pressiomètre.

Afin de vérifier l'application de cette méthode d'interprétation sur l'argile de Mascouche, la phase de déchargement en plus de la phase de chargement des essais au pressiomètre Texam réalisés dans cette argile ont été interprétées dans le but de déduire la résistance au cisaillement non drainé. La comparaison des valeurs de  $S_u$  avec celles trouvées à l'aide du scissomètre et du cône effilé instrumenté a d'abord permis de valider les données pressiométriques obtenues. La modélisation du comportement de l'argile à partir des essais pressiométriques a ensuite permis d'avoir une idée du comportement en déchargement de l'argile de Mascouche. Suite à cette procédure, il s'avère qu'une des hypothèses assumées par les auteurs ayant développé les théories d'interprétation du déchargement ne s'applique pas à l'argile de Mascouche. Ce dernier

chapitre présente d'abord la conclusion amenée pour les différents points discutés dans ce rapport, puis les recommandations suggérées pour pousser plus loin cette étude.

## 5.1 Conclusions

Lorsque comparées aux valeurs de  $S_u$  déterminées avec le scissomètre, la résistance au cisaillement non drainé déduite de la phase de chargement des essais pressiométriques montre des valeurs supérieures en moyenne de 2.0 à 2.7 fois plus élevées. Cette surévaluation des valeurs de  $S_u$  par le pressiomètre ou encore la sous-estimation de  $S_u$  par le scissomètre est bien connue par les géotechniciens, et les valeurs obtenues sont en accord avec ces généralités.

Les valeurs de  $S_u$  obtenues avec le chargement des essais au pressiomètre ont également été comparées avec celles déterminées d'après la pente des courbes des essais au cône effilé instrumenté. Les valeurs issues du pressiomètre sont en moyenne supérieures de 18% par rapport à celles déduites des essais au cône effilé instrumenté. Une sous-estimation de cette méthode d'interprétation du cône effilé instrumenté d'environ 20% a été établie par Longtin (2003). Lorsque les essais ISCT sont interprétés avec la méthode de Ladanyi, les valeurs de  $S_u$  correspondent plus ou moins avec celles du pressiomètre. Sur la base de ces comparaisons, les valeurs de résistance au cisaillement non drainé déduites avec la phase de chargement du pressiomètre sont donc valides.

L'essentiel du travail portait cependant sur l'analyse en déchargement des essais pressiométriques. L'interprétation de cette phase n'a pas donné les résultats souhaités. D'après la méthode utilisée, la résistance au cisaillement non drainé est assumée comme étant égale lors du chargement et du déchargement. Les résultats obtenus avec la modélisation démontrent que cette hypothèse ne peut s'appliquer à l'argile de Mascouche. En effet, il semble que la résistance de cette argile diminue en moyenne de

69% à 77% lors du déchargement. Pour ce qui est de la couche d'argile molle à 2.5 mètres, cette diminution est encore plus importante puisqu'elle est supérieure à 100%.

Avec la connaissance du rapport  $\beta$  de la résistance au déchargement sur la résistance au chargement, le calcul de la pente de la phase de déchargement d'un essai pressiométrique pourrait s'avérer un moyen simple et efficace de déterminer  $S_u$ . Afin d'analyser les courbes de chargement, quelques transformations ont été nécessaires étant donné les irrégularités souvent présentes dans ces courbes. Contrairement à celles-ci, les courbes de déchargement ne présentaient aucune irrégularité. Les modifications apportées aux courbes de chargement pour contourner les irrégularités dépendent en partie de la personne qui les interprète. La résistance au cisaillement déduite des ces courbes, bien qu'elle ait été vérifiée avec d'autres essais, est une valeur approximative qui peut facilement varier. Les courbes de déchargement n'ayant aucun besoin d'être modifiées, la résistance au cisaillement issue de ces courbes pourra être plus représentative du sol étudié, dans la mesure où  $\beta$  est connu.

## 5.2 Recommandations

Afin de profiter des avantages de l'interprétation en déchargement des essais pressiométriques, des informations supplémentaires sur le comportement de l'argile de Mascouche devraient être obtenues à partir d'essais au laboratoire. Ce qui importe de déterminer avec ces essais, c'est le rapport  $\beta$ , égal à la résistance au déchargement sur la résistance au chargement. Puisque le déchargement pressiométrique consiste en une rotation des contraintes de 90° par rapport au chargement, l'essai triaxial non drainé, qui permet une telle rotation des contraintes, pourrait simuler en partie le comportement de l'argile en chargement et en déchargement. Il suffit d'inverser le sens de la contrainte principale au cours de l'essai. Cette méthode a d'ailleurs été utilisée par Jefferies

(1988). Le but est d'avoir une idée de  $\beta$  qui permettrait de déduire  $S_u$  à partir de la phase de déchargement des essais au pressiomètre.

Il serait également intéressant d'effectuer d'autres essais pressiométriques en chargement et en déchargement dans d'autres argiles de l'est du Canada. Une analyse semblable à celle réalisée pour ce travail pourrait révéler si la diminution de la résistance lors du déchargement survient pour les argiles sensibles en général. Des interrogations demeurent aussi à propos de la couche d'argile molle présente entre 2 et 3.5 mètres. Elle semble en effet n'offrir pratiquement pas de résistance au déchargement. Des essais au pressiomètre effectués dans une argile ayant une faible résistance comme celle trouvée à 2.5 mètre à Mascouche aideraient sans doute à mieux comprendre le comportement de cette couche d'argile de faible résistance.

## BIBLIOGRAPHIE

BAGUELIN, F., JÉZÉQUEL, J.F. and SHIELDS, D.H. (1978). *The Pressuremeter and Foundation Engineering*. 1<sup>st</sup> Edition. Trans Tech Publications, Clausthal, Germany.

BAGUELIN, F., JÉZÉQUEL, J.F., LE MÉE, E. et LE MÉHAUTÉ, A. (1972). Expansion de sondes cylindriques dans les sols cohérents. *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 61. 189-202.

FERREIRA, R.S. and ROBERTSON, P.K. (1992). Interpretation of Undrained Self-Boring Test Results Incorporating Unloading. *Canadian Geotechnical Journal*, 29. 918-928.

GIBSON, R.E. and ANDERSON, W.F. (1961). In-Situ Measurement of Soil Properties with the Pressuremeter. *Civil Engineering Public Works Review*, 56. 615-618.

HAMOUCHE, K.K. (1995). *Comportement des argiles Champlain sollicitées horizontalement*. Thèse de doctorat. Université Laval, Québec, Canada.

HOLTZ, R.D. and KOVACS, W.D. (1991). *Introduction à la géotechnique*. Traduit par Jean Lafleur. Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

HOULSBY, G.T. and WITHERS, N.J. (1988). Analysis of the Cone Pressuremeter Test in Clay. *Géotechnique*, 38. 575-587.

JEFFRIES, M.G. (1988). Determination of Horizontal Geostatic Stress in Clay with Self-Bored Pressuremeter. *Canadian Geotechnical Journal*, 25. 559-573.

LADANYI, B. (1963). Expansion of a Cavity in a Saturated Clay Medium. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 89, SM4. 127-161.

LADANYI, B. (1972). In-Situ Determination of Undrained Stress-strain Behavior of Sensitive Clays with the Pressuremeter. *Canadian Geotechnical Journal*, 9. 313-319.

LADANYI, B. (1995). A Brief History of Pressuremeter. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Pressuremeter and its New Avenues*, Sherbrooke, Canada. 25-45.

LADANYI, B., LONGTIN, H. and DUCHARME, A. (2000). Use of the Sharp Cone Test for In-Situ Determination of Undrained Shear Strength of Clay. *Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization, Geo-Denver 2000*. 94-105.

LEROUEIL, S., TAVENAS, F. et LE BIHAN, J.-P. (1983). Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 20. 681-705.

LONGTIN, H. (2003). *Caractérisation des sols argileux au moyen du cône effilé instrumenté*. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

MAIR, R.J. and WOOD, D.M. (1987). *Pressuremeter Testing – Methods and Interpretation*. CIRIA Ground Engineering Report, Butterworths, London.

MCHAYLEH, J. (1994). *Détermination in-situ des propriétés mécaniques de l'argile par la méthode du cône effilé instrumenté*. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique de Montréal, Montréal, Canada.

PALMER, A.C. (1972). Undrained Plane-strain Expansion of a Cylindrical Cavity in Clay: a Simple Interpretation of the Pressuremeter Test. *Géotechnique*, 22. 451-457.

PYE, C.N. (1995). The Influence of Constitutive Models on Self-Boring Pressuremeter Interpretation in Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 32. 420-427.

SALENÇON, J. (1966). Expansion quasi-statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élasto-plastique. *Annales des Ponts et Chaussées*, III. 175-187.

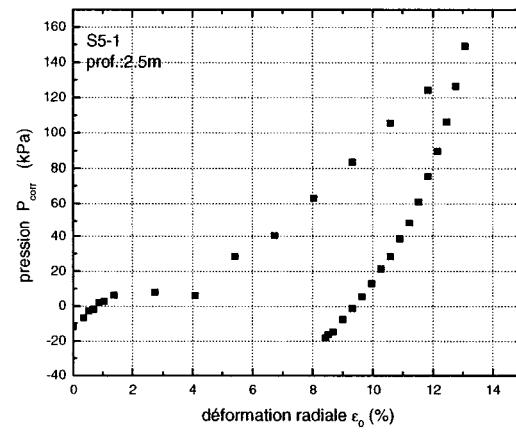
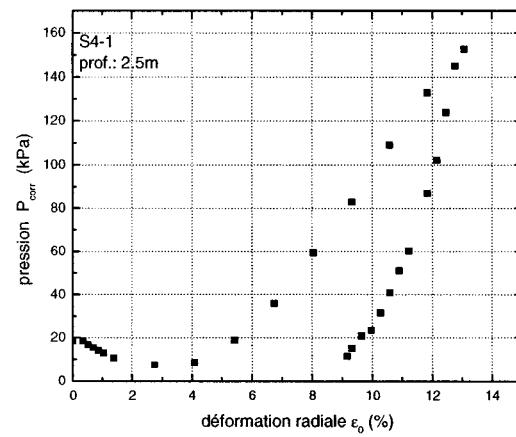
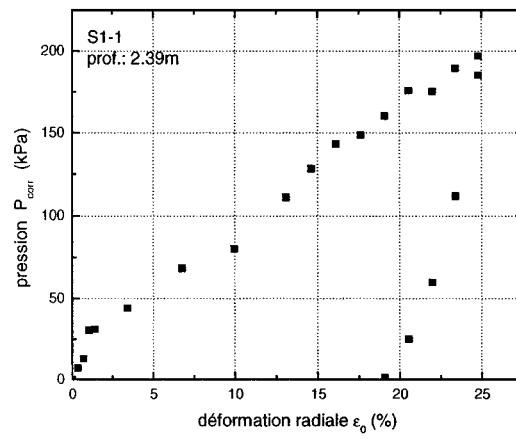
SILVESTRI, V. (1995). Determination of Undrained Shear Strength of Soft Clay by Pressuremeter Tests. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Pressuremeter and its New Avenues*, Sherbrooke, Canada. G. Ballivy. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 231-238.

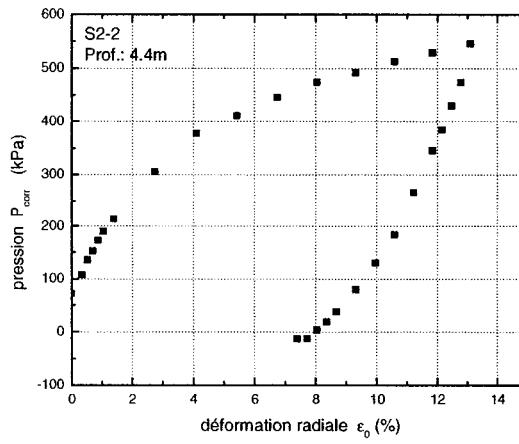
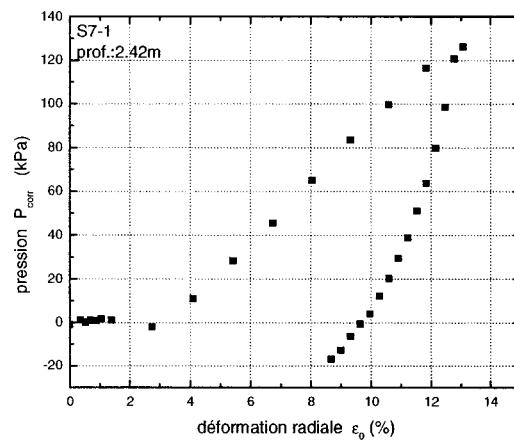
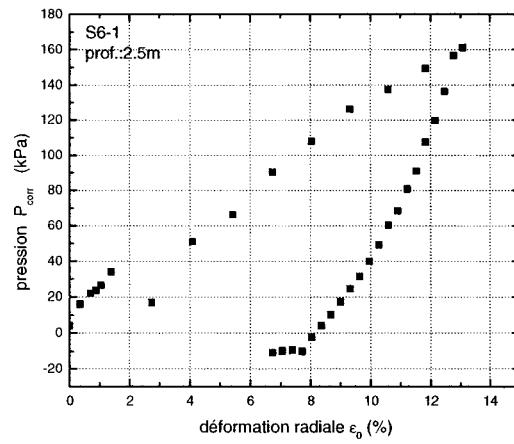
SILVESTRI, V. (2003). Assessment of Self-Boring Pressuremeter Tests in Sensitive Clay. *Canadian Geotechnical Journal*, 40. 362-387.

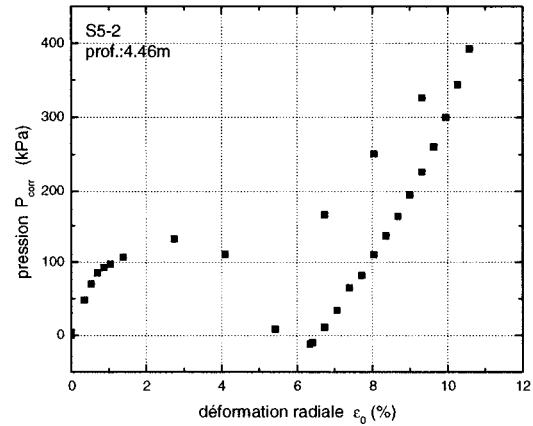
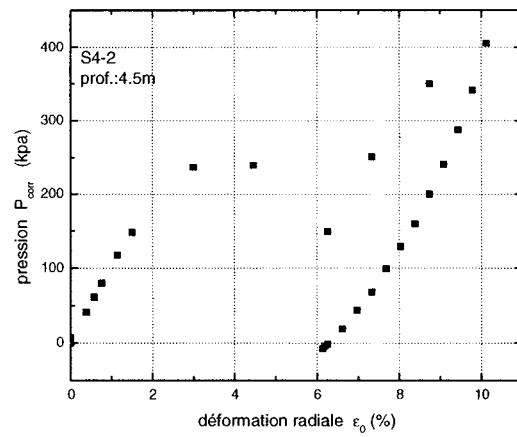
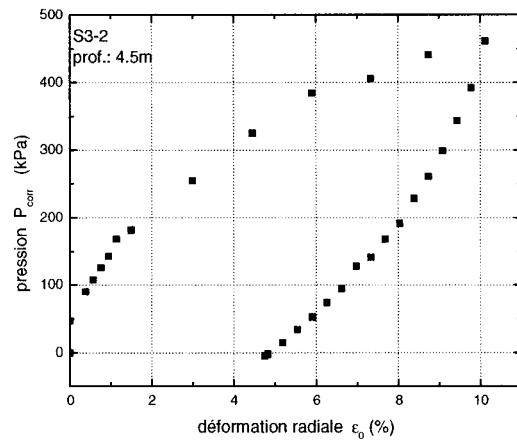
WINDLE, D. and WROTH, C.P. (1977). Some Laboratory Experiments Related to the Results of Pressuremeter Tests. *Géotechnique*, 27. 181-201.

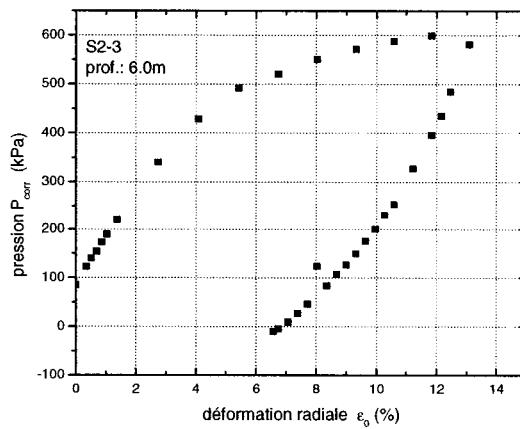
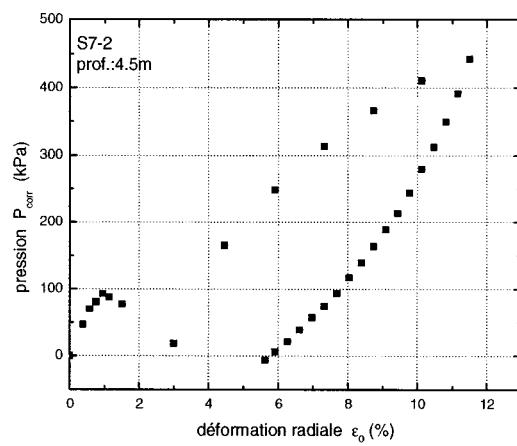
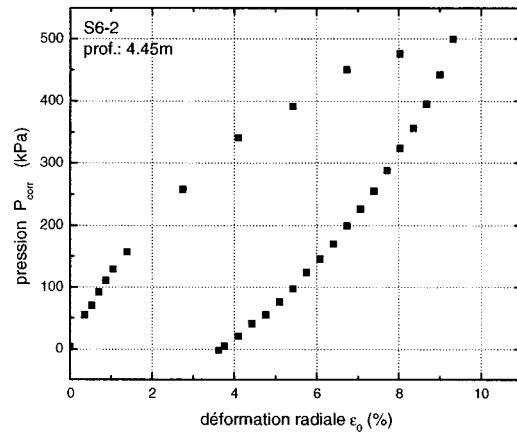
WROTH, C.P. (1984). The Interpretation of In-Situ Soil Tests. *Géotechnique*, 34. 449-489.

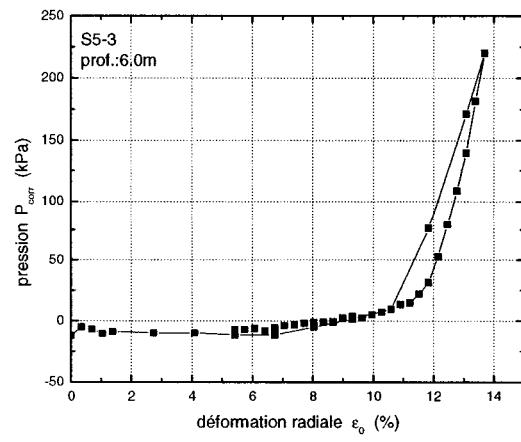
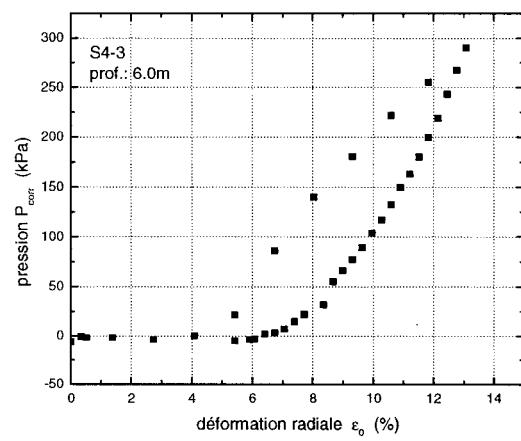
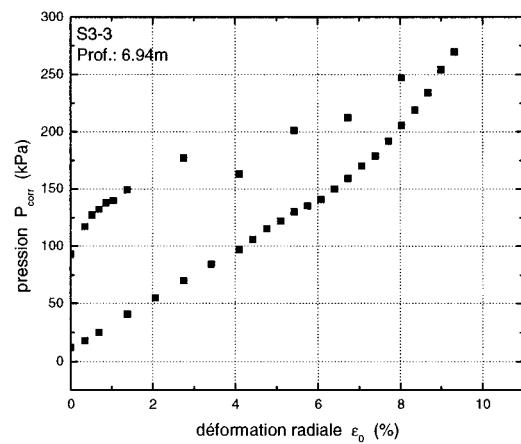
**ANNEXE A****COURBES PRESSIOMÉTRIQUES CORRIGÉES**

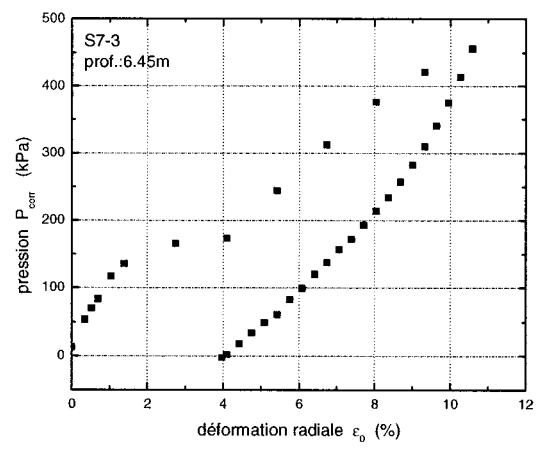
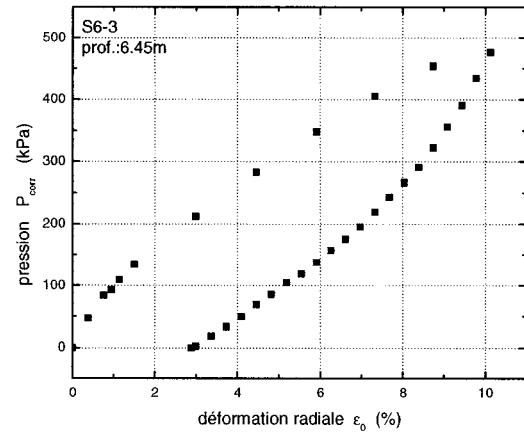






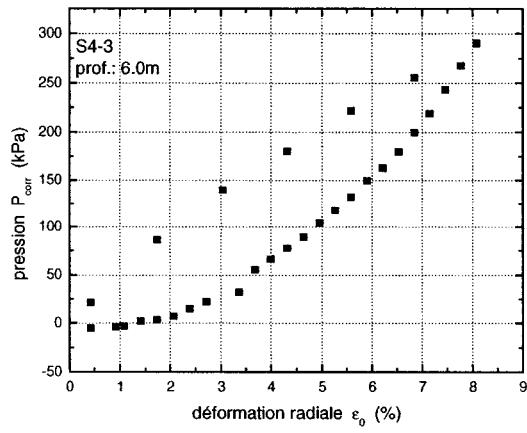
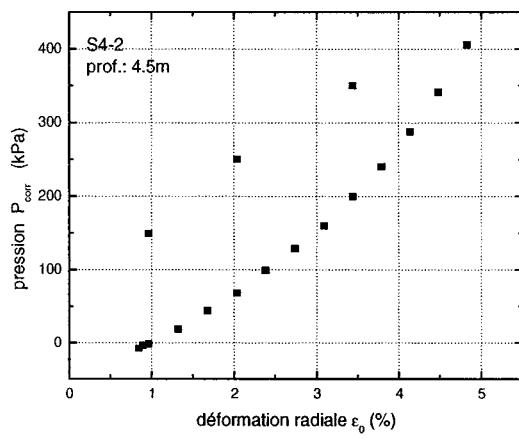
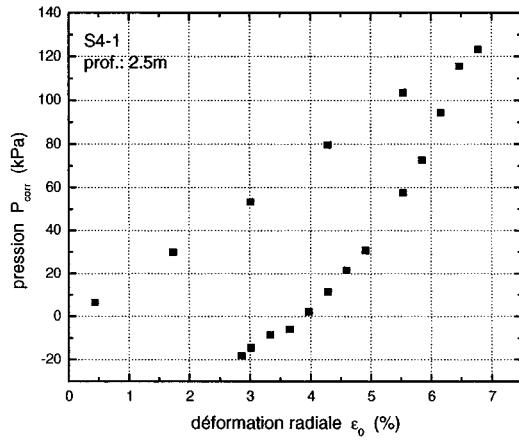


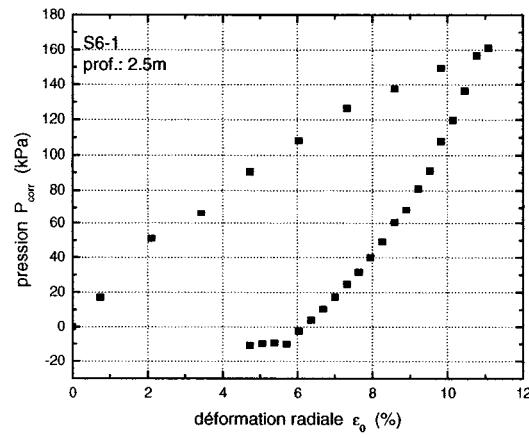
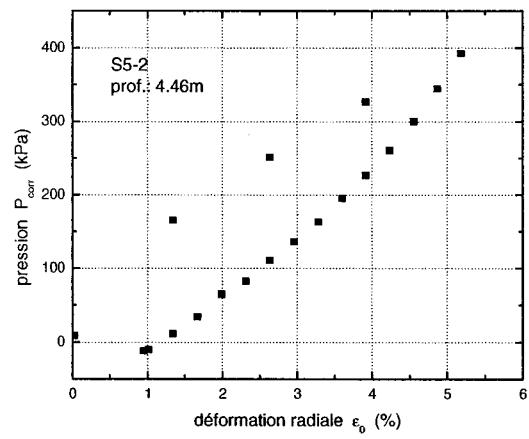
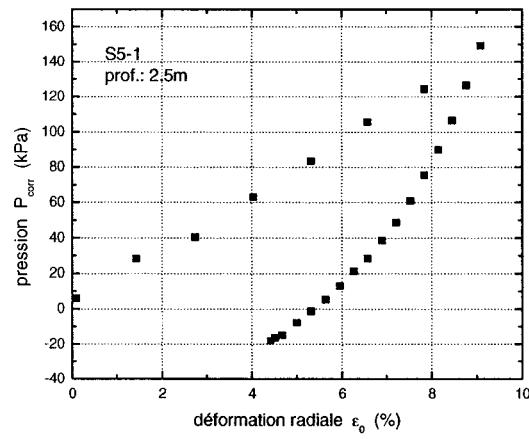


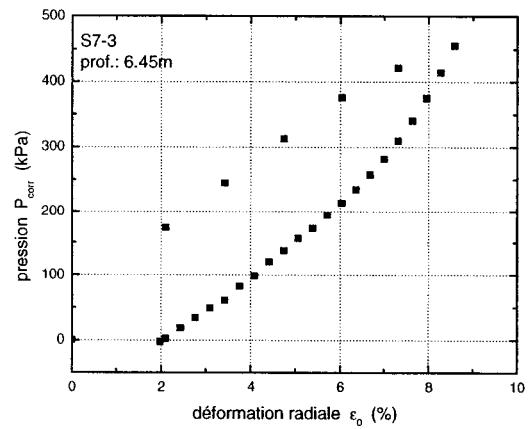
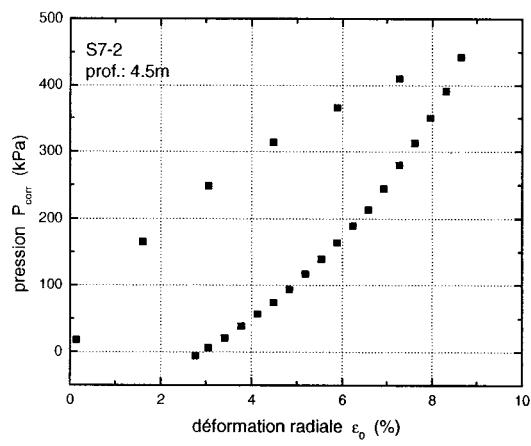
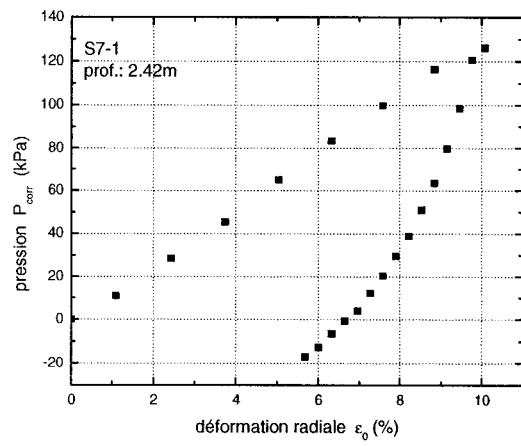


**ANNEXE B**

COURBES PRESSIOMÉTRIQUES NETTES

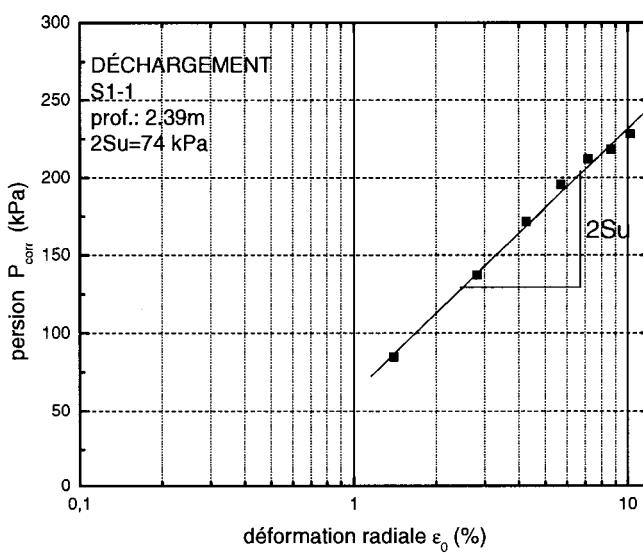
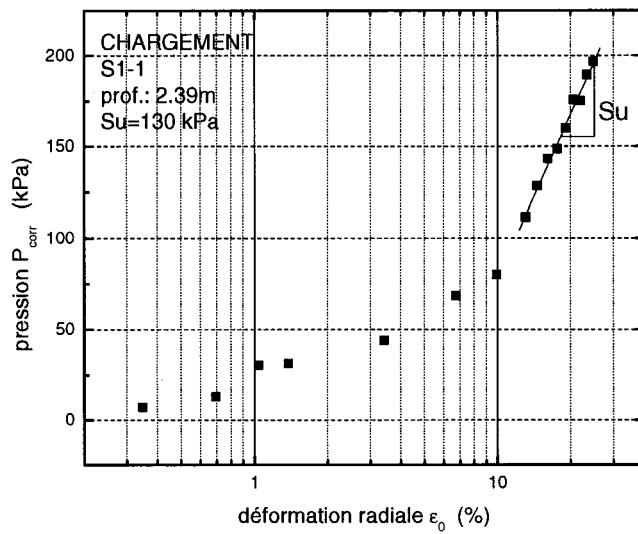


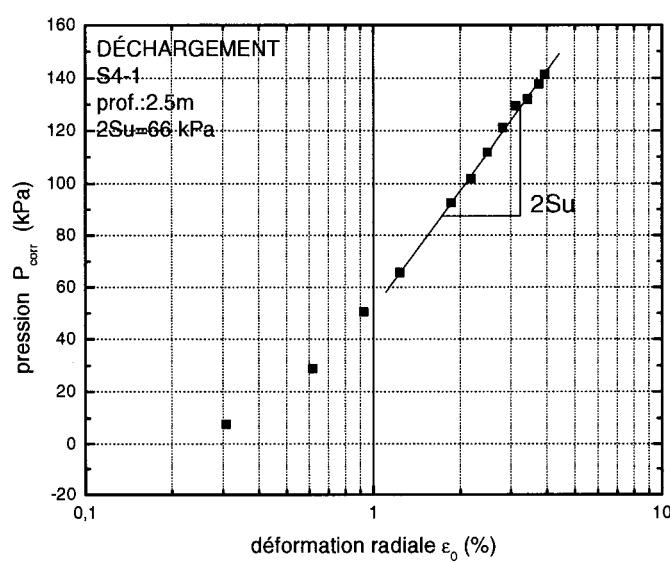
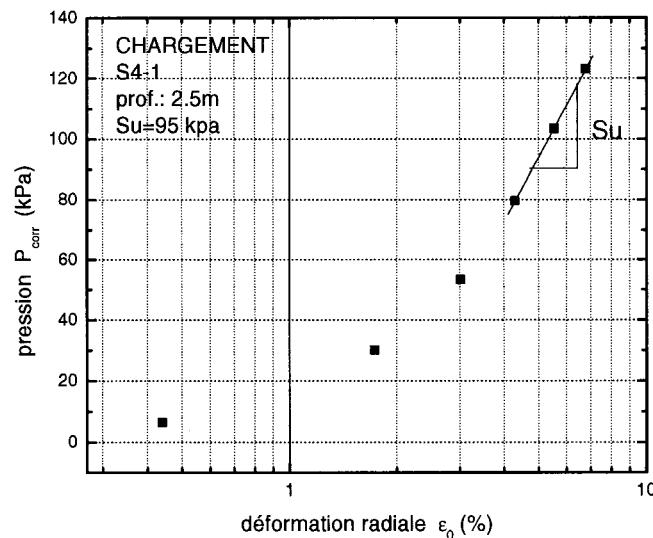


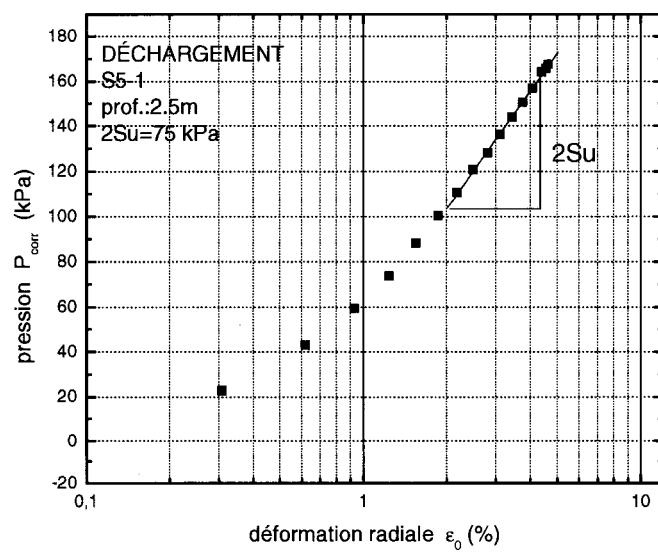
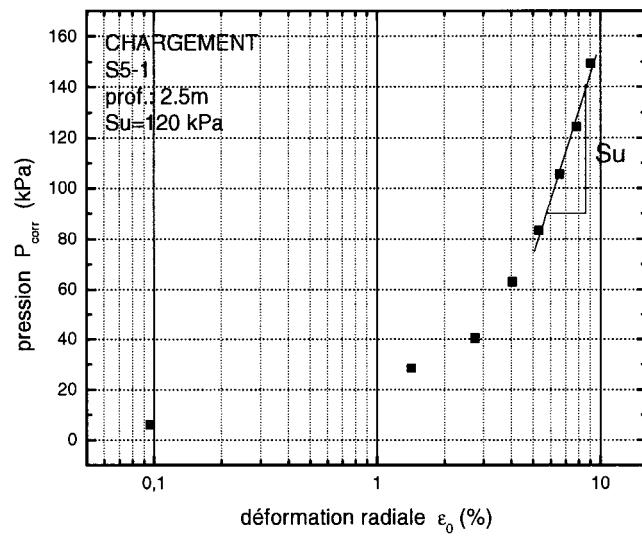


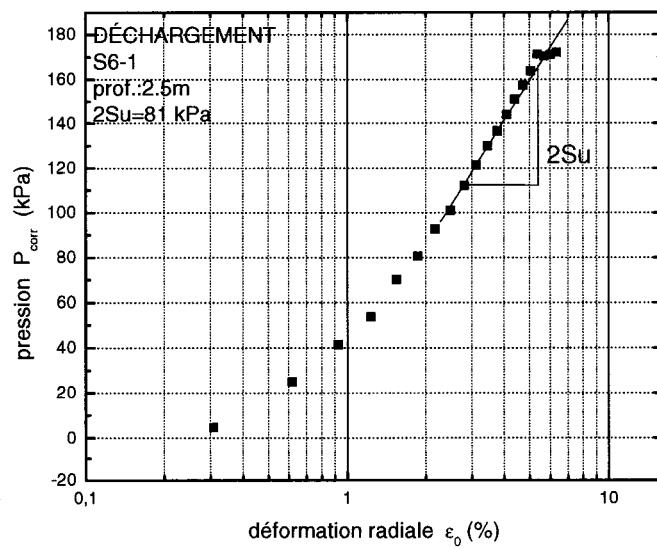
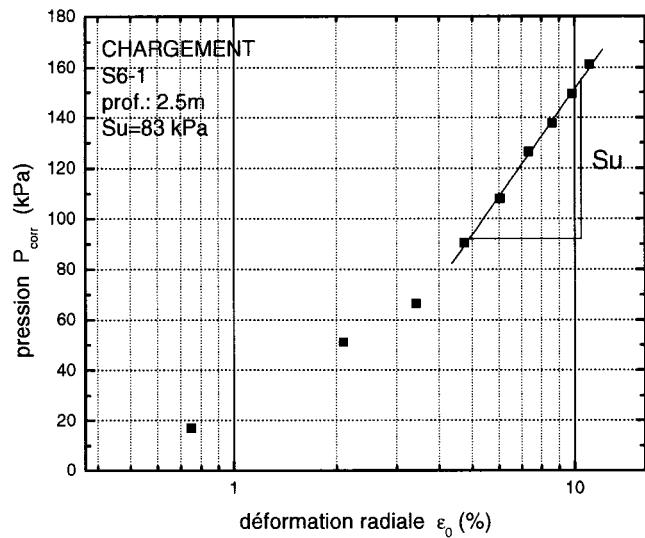
**ANNEXE C**

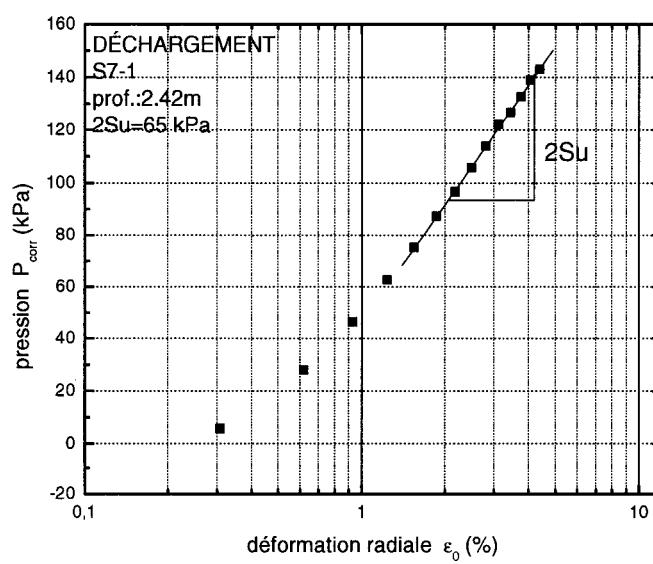
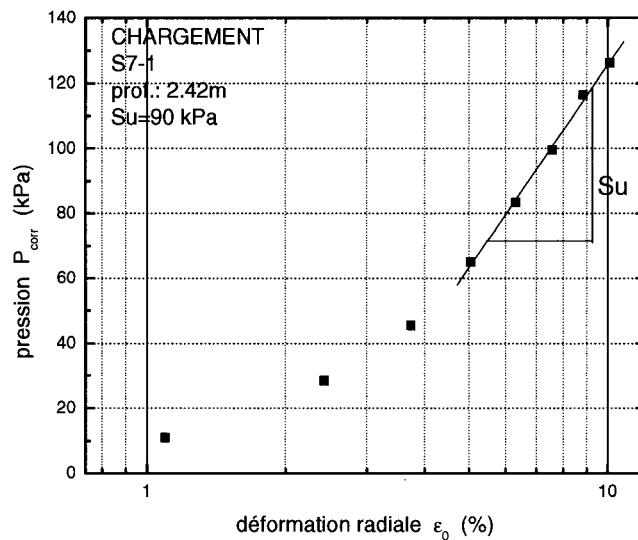
GRAPHIQUES SEMI-LOGARITHMIQUES  
ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES

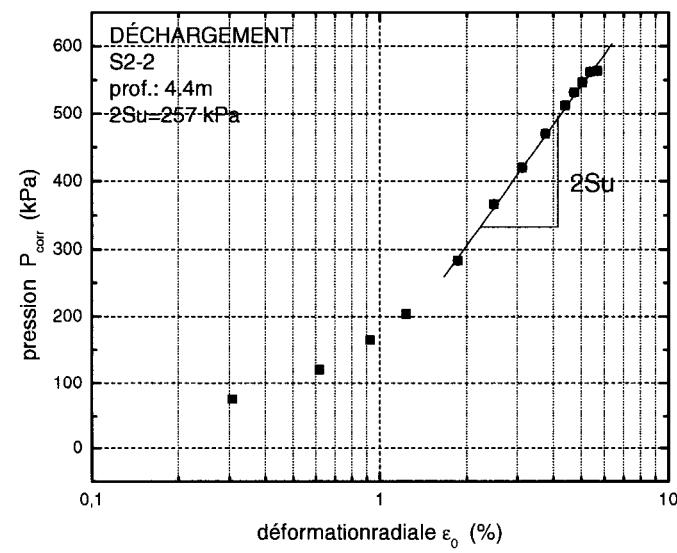
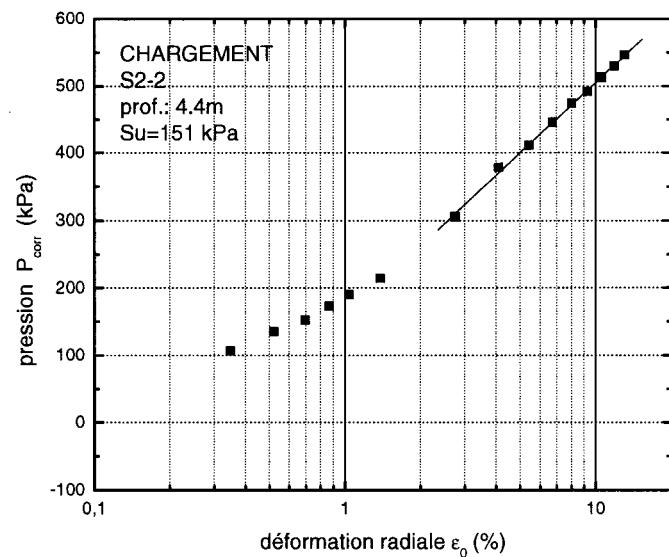


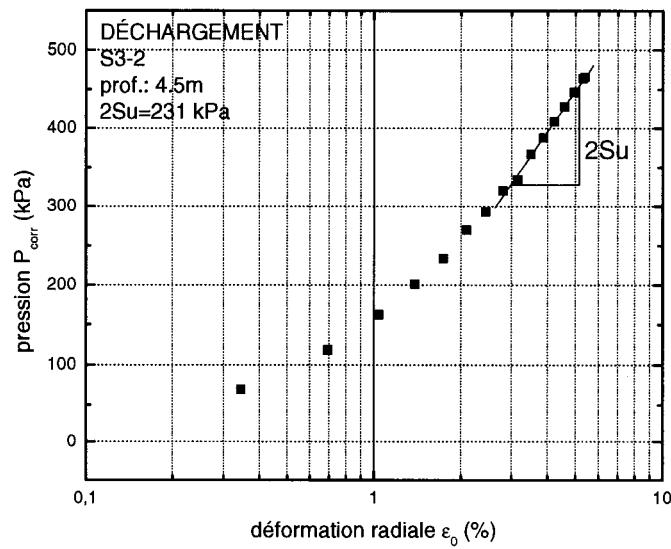
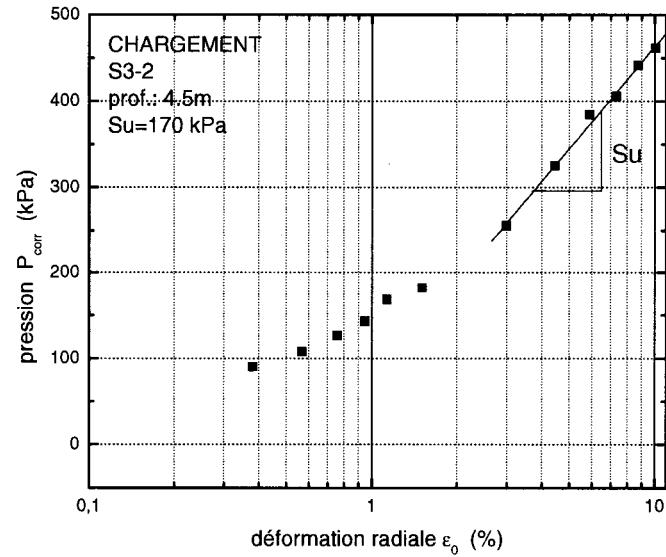


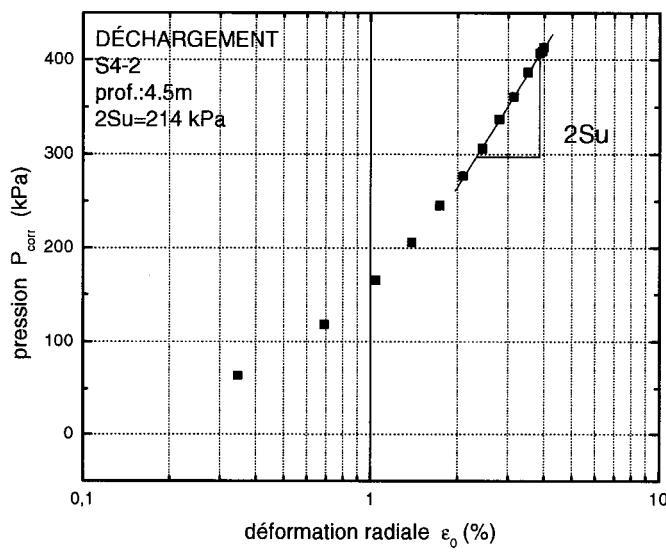
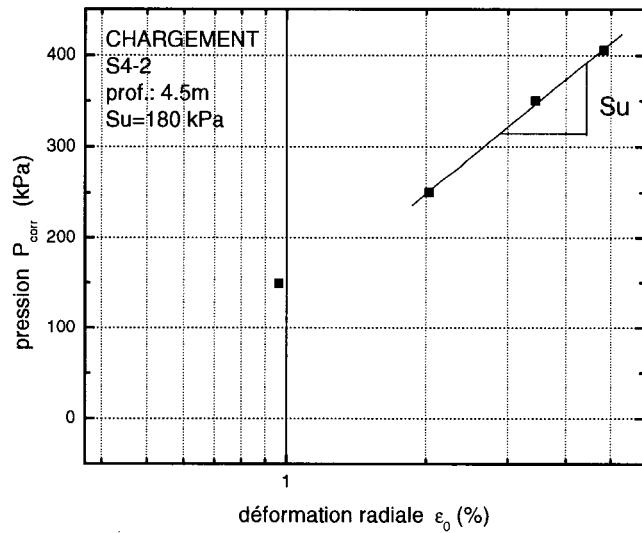


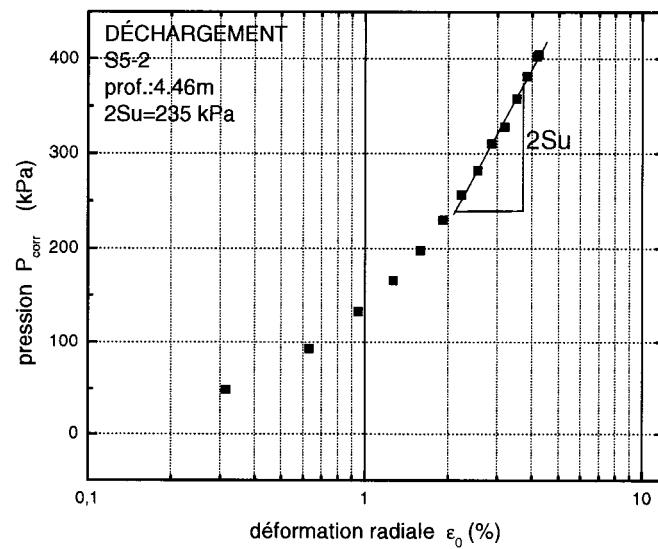
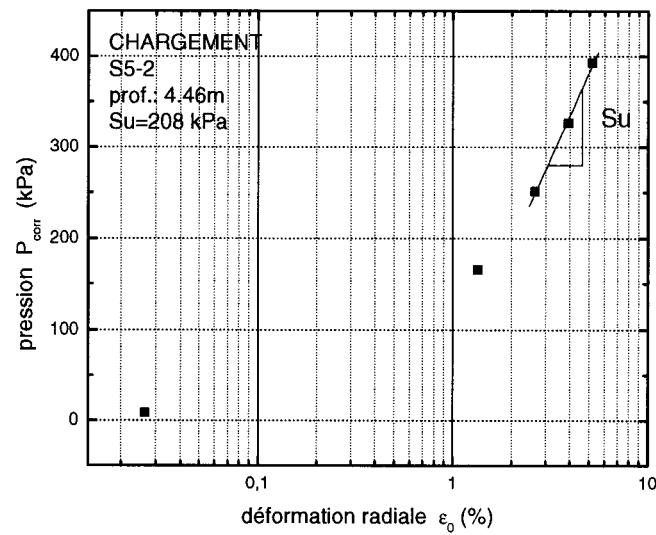


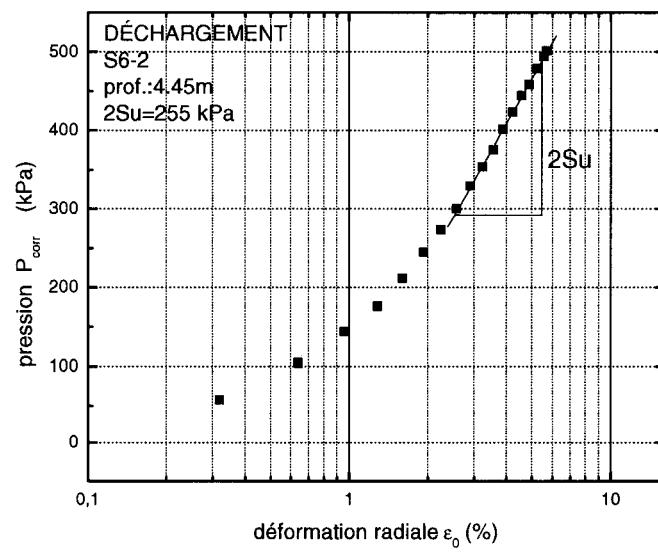
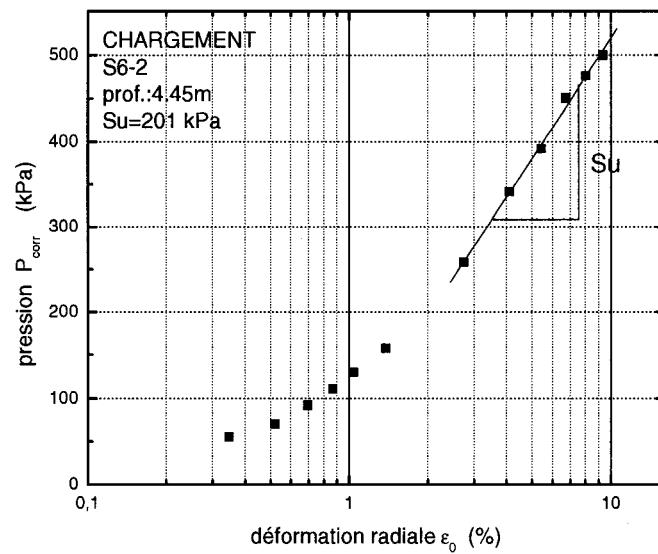


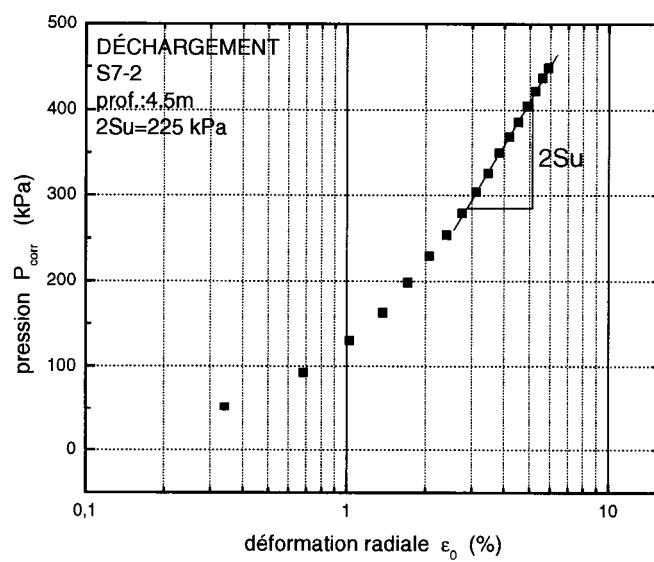
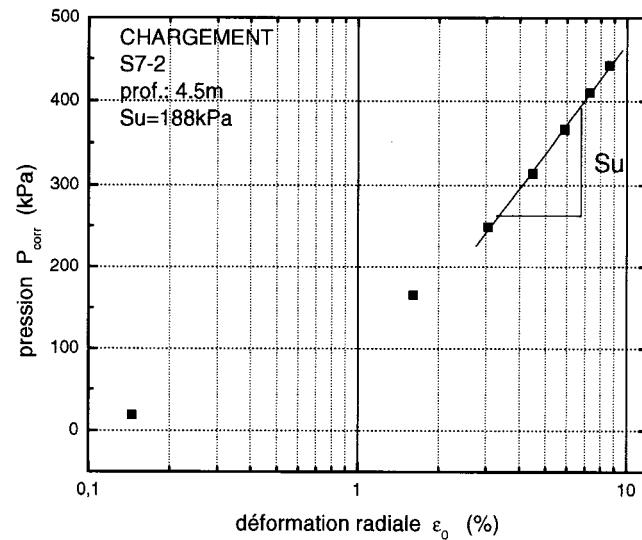


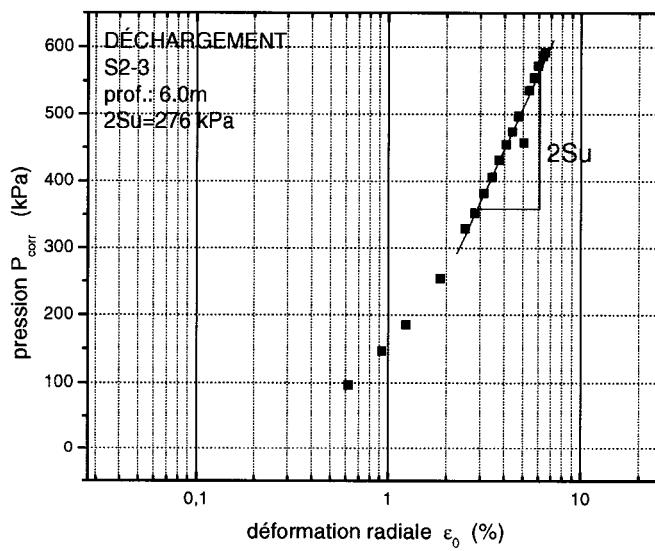
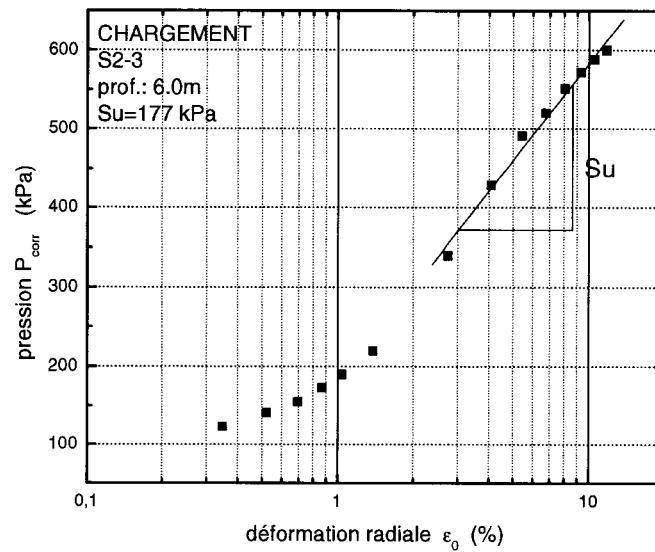


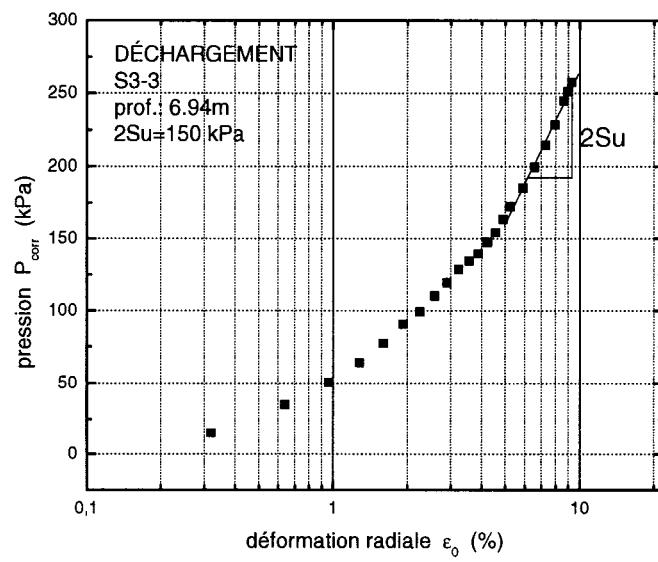
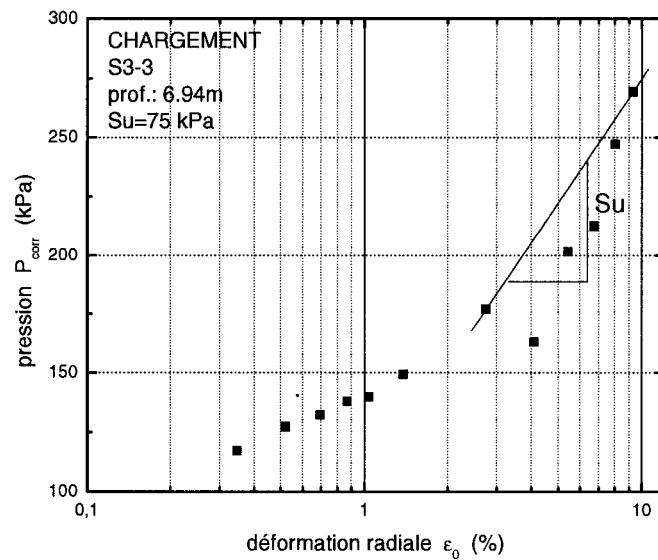


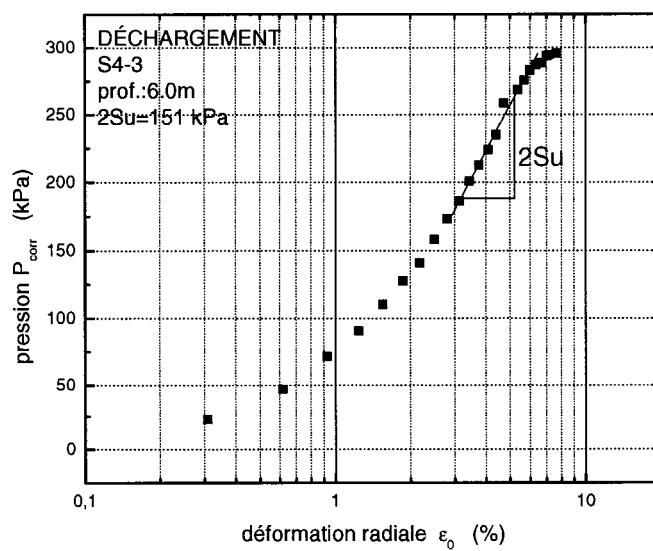
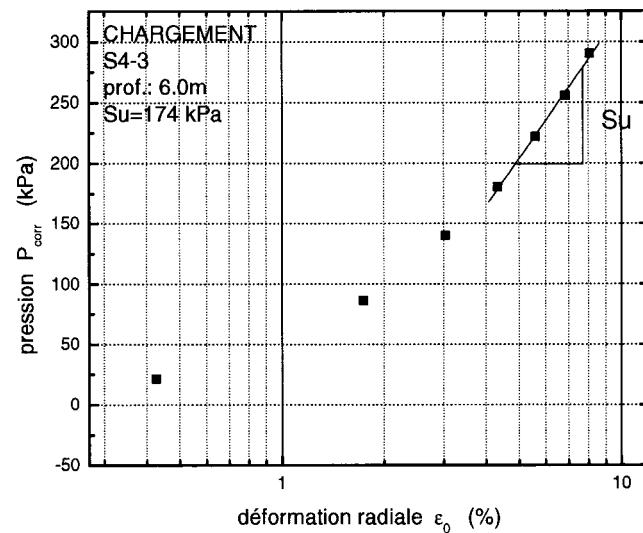


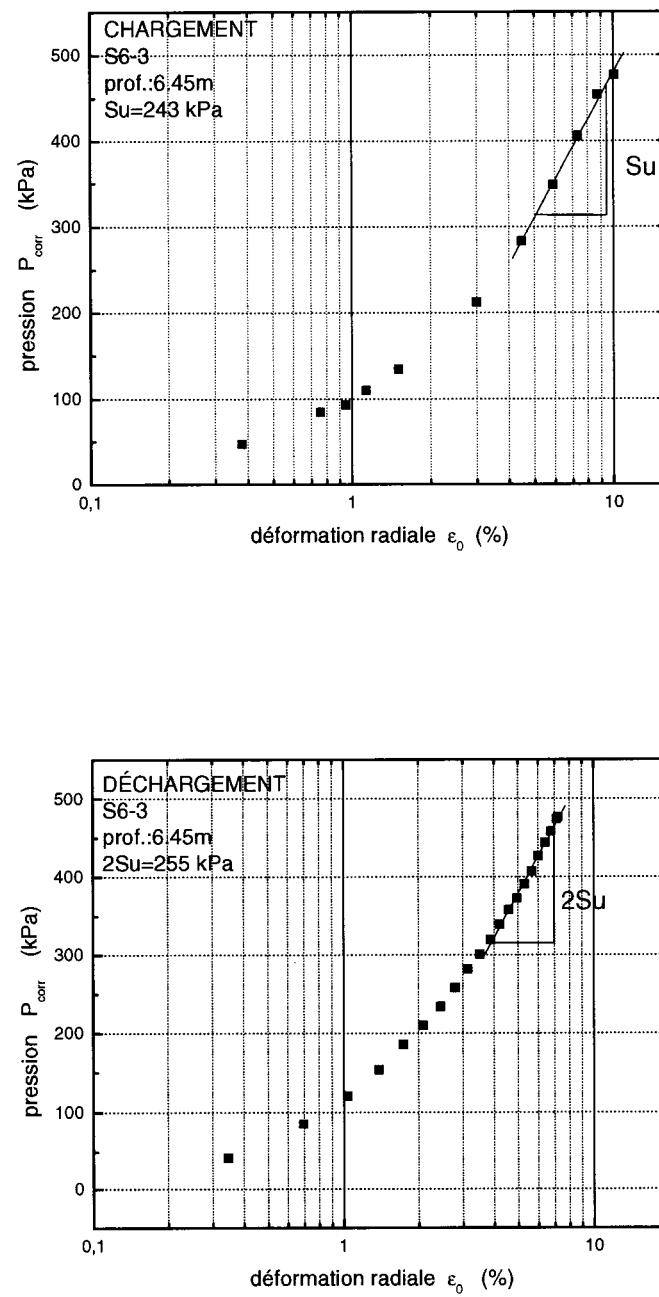


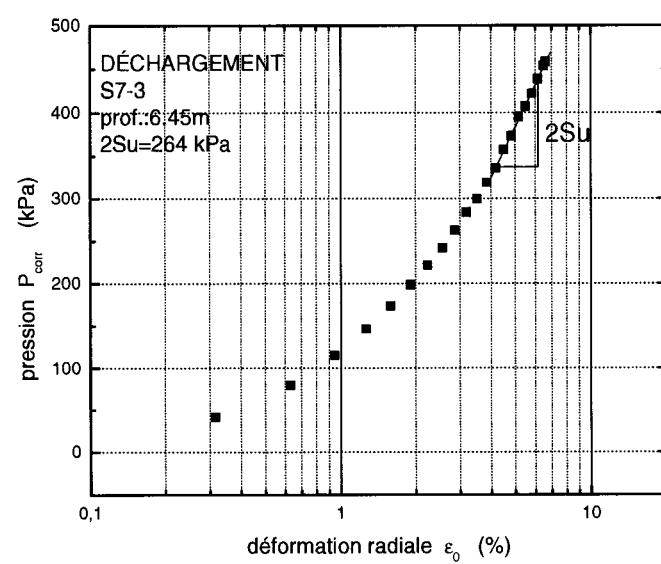
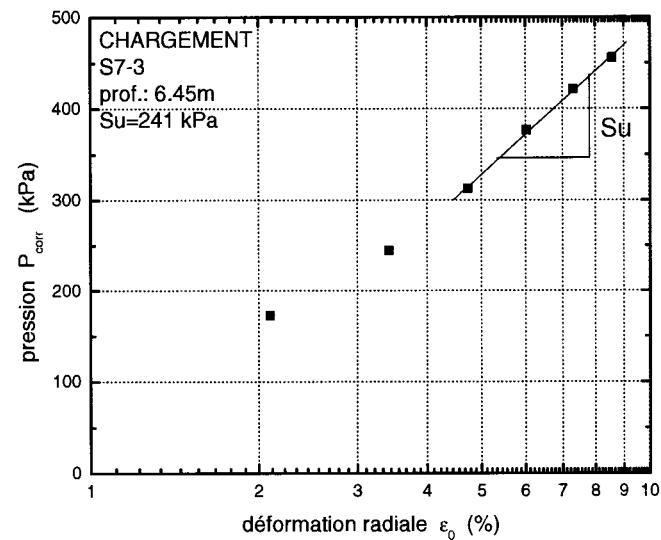






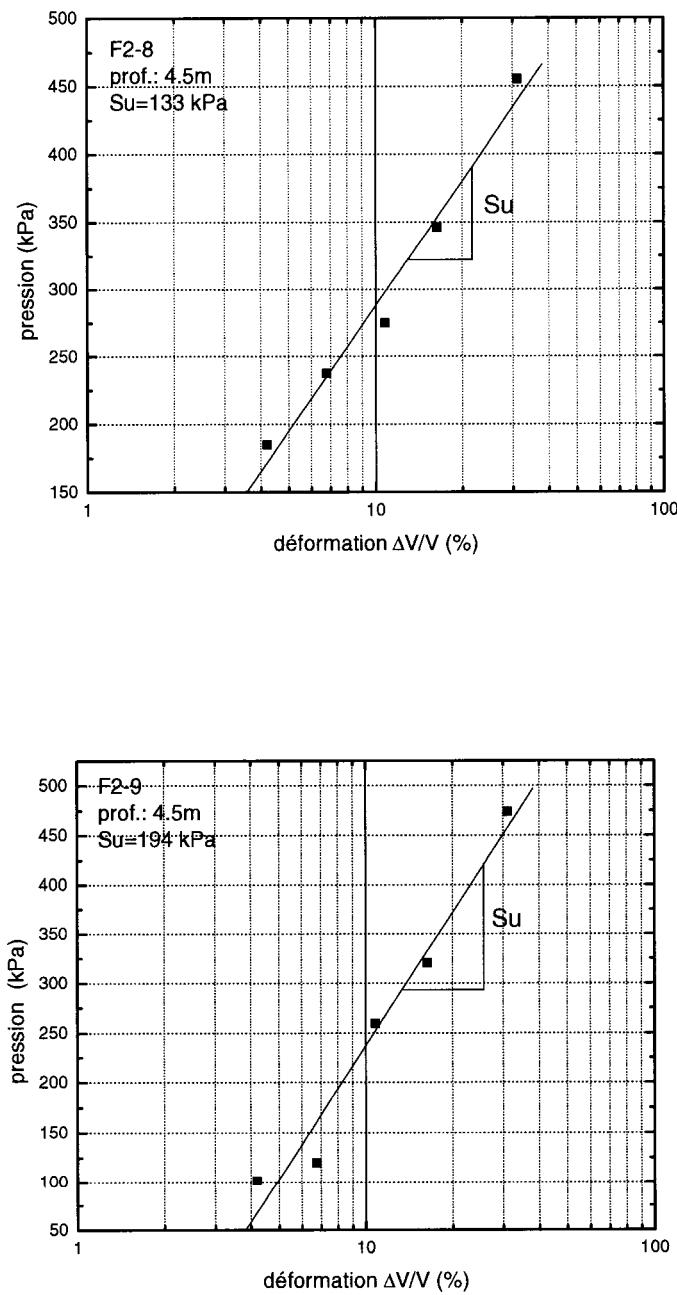


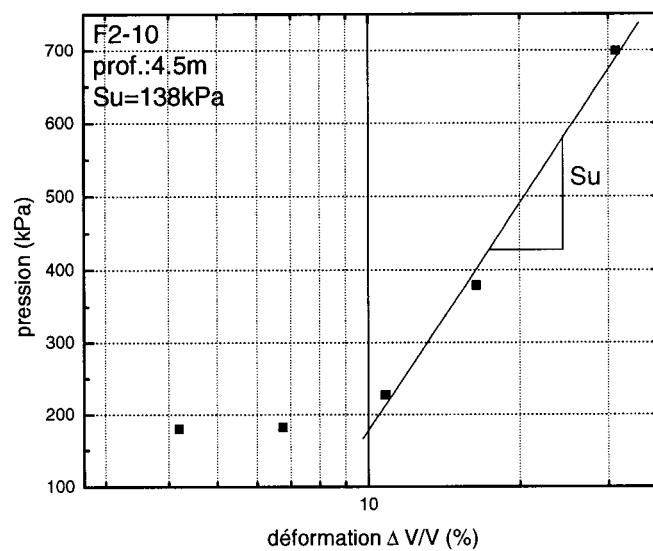




**ANNEXE D**

**GRAPHIQUES SEMI-LOGARITHMIQUES  
ESSAIS ISCT**

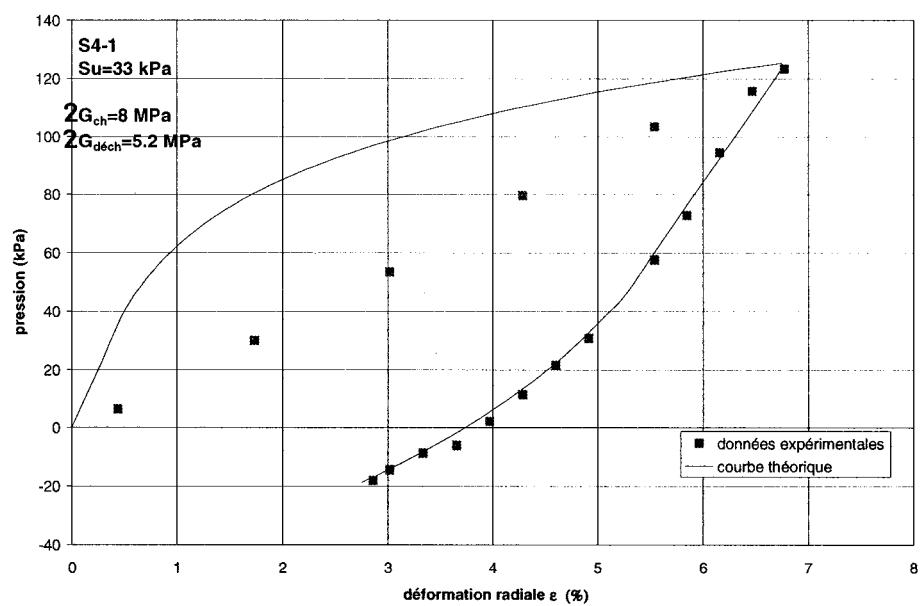
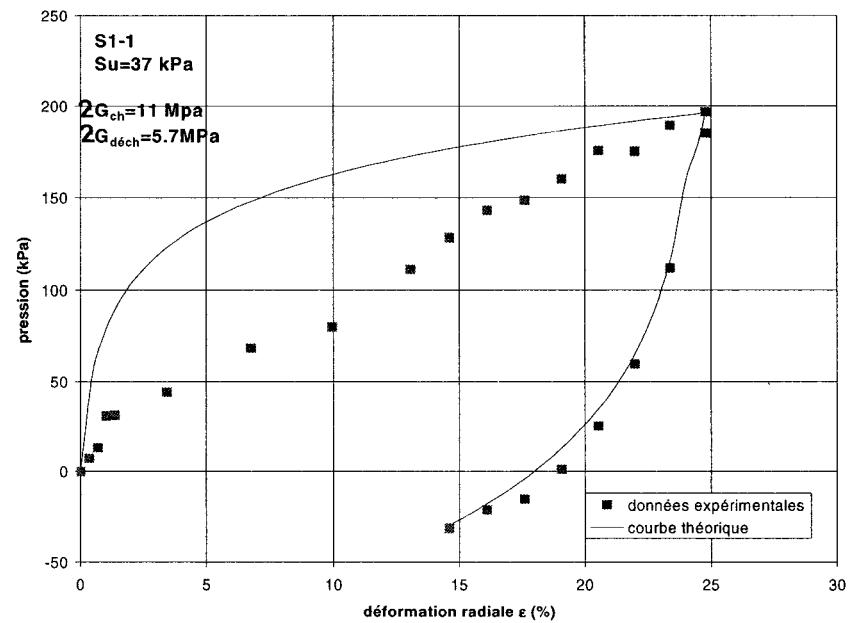


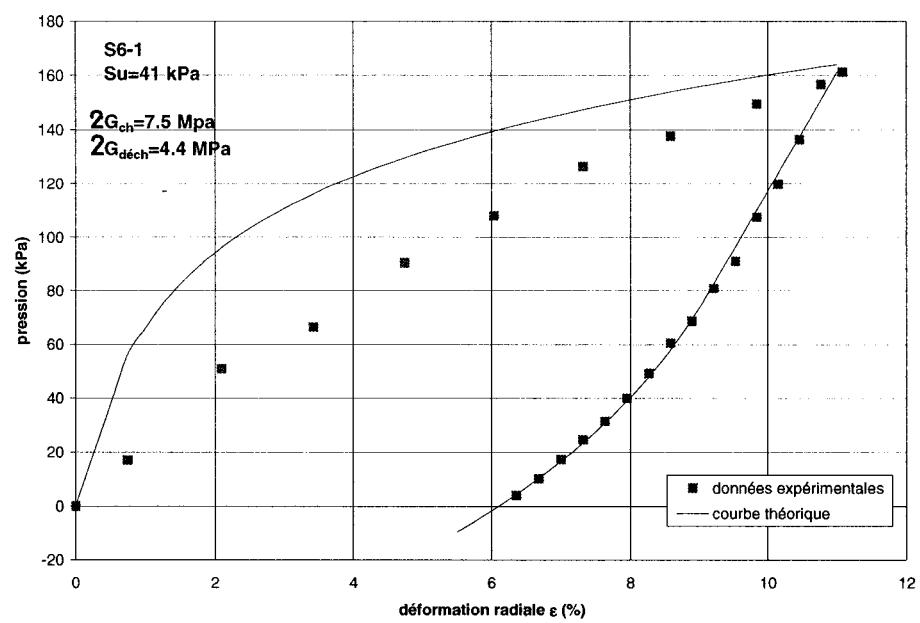
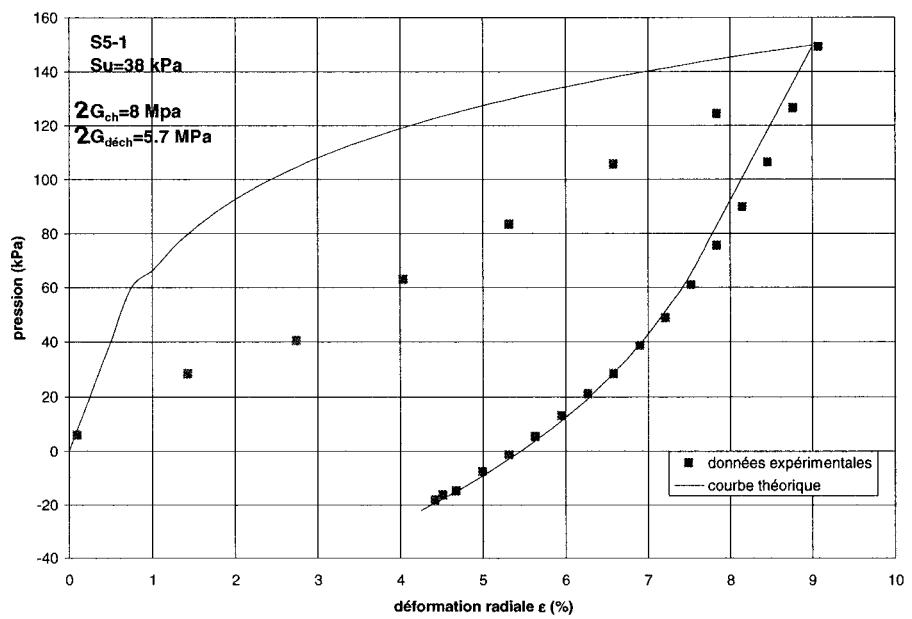


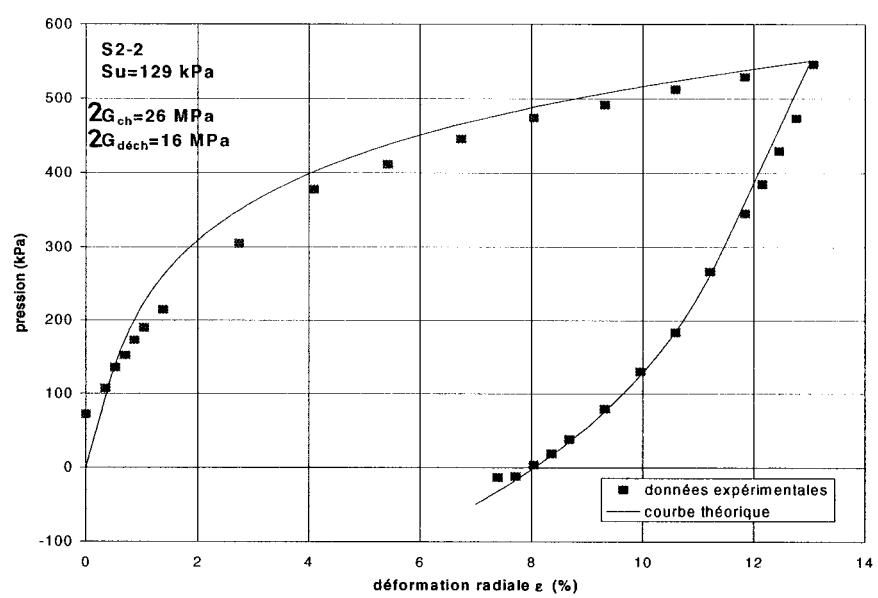
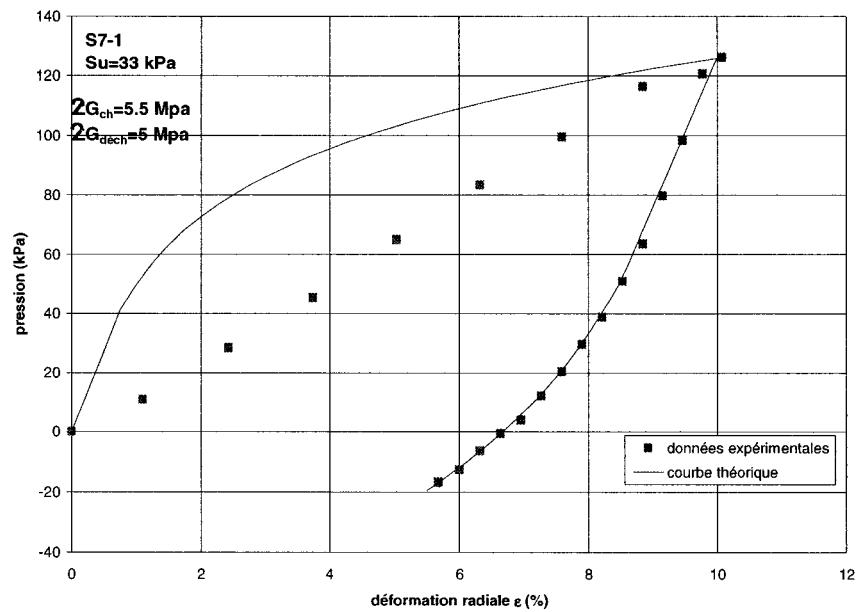
## **ANNEXE E**

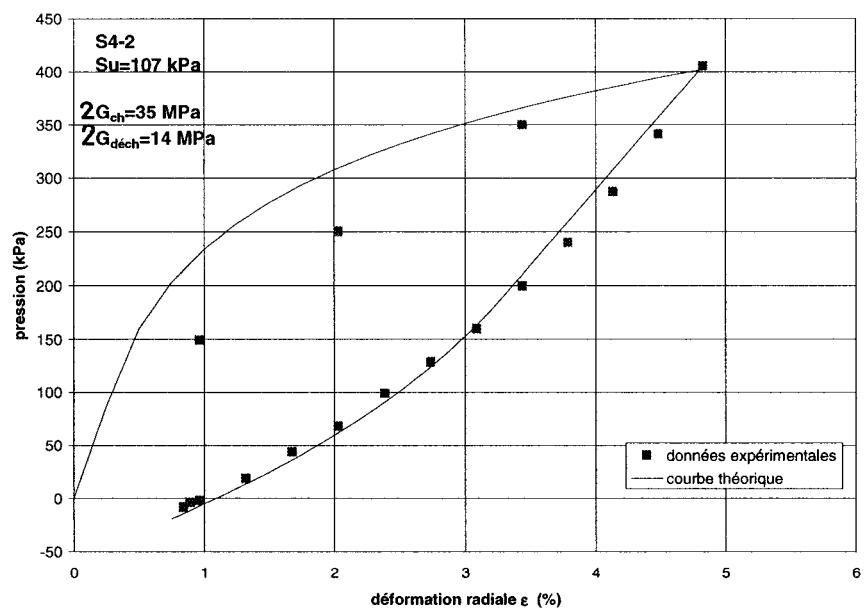
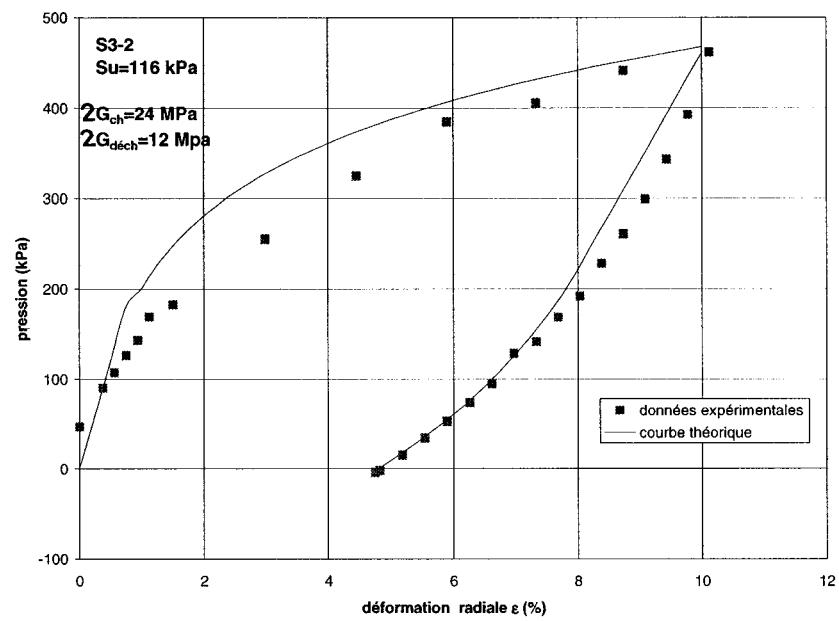
### **MODÉLISATION DES COURBES PRESSIONÉTRIQUES**

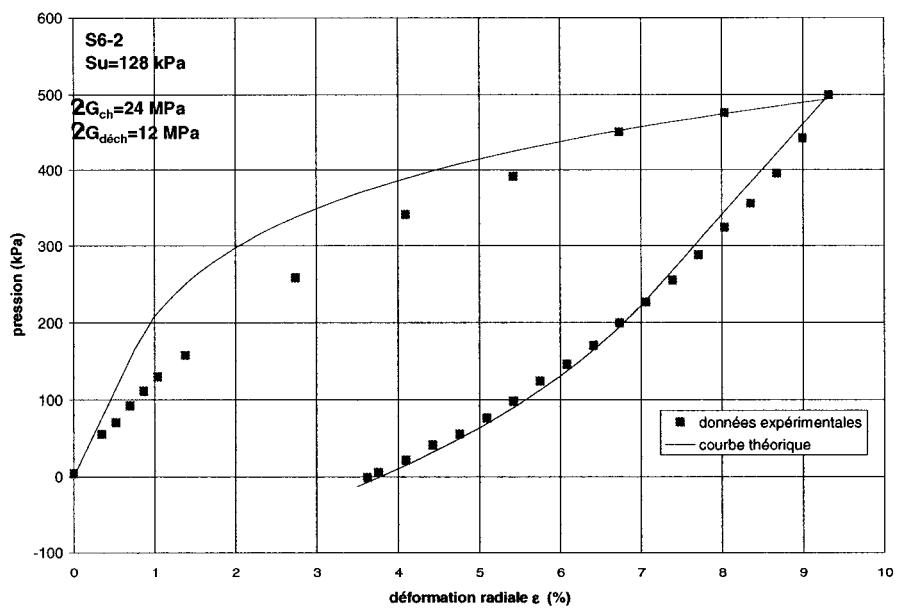
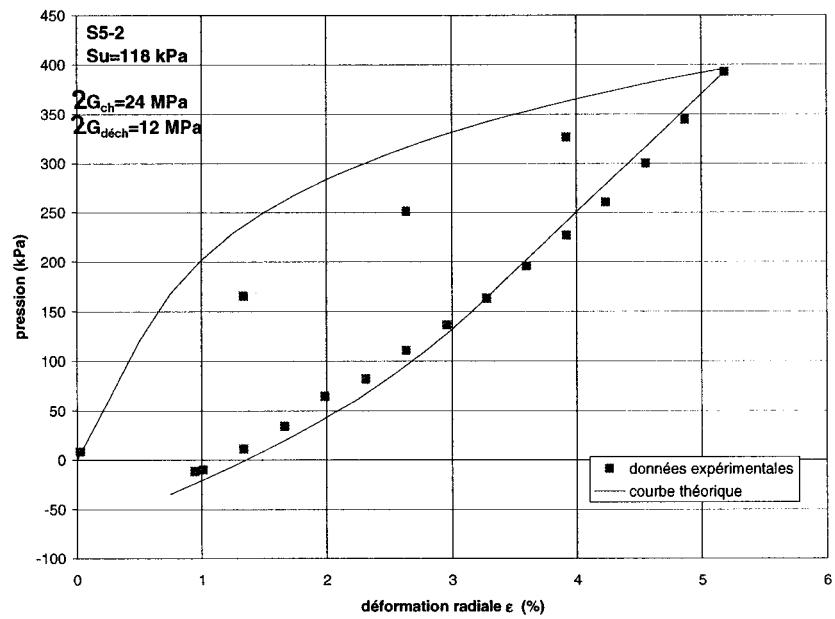
**S<sub>U</sub>-DÉCHARGEMENT**

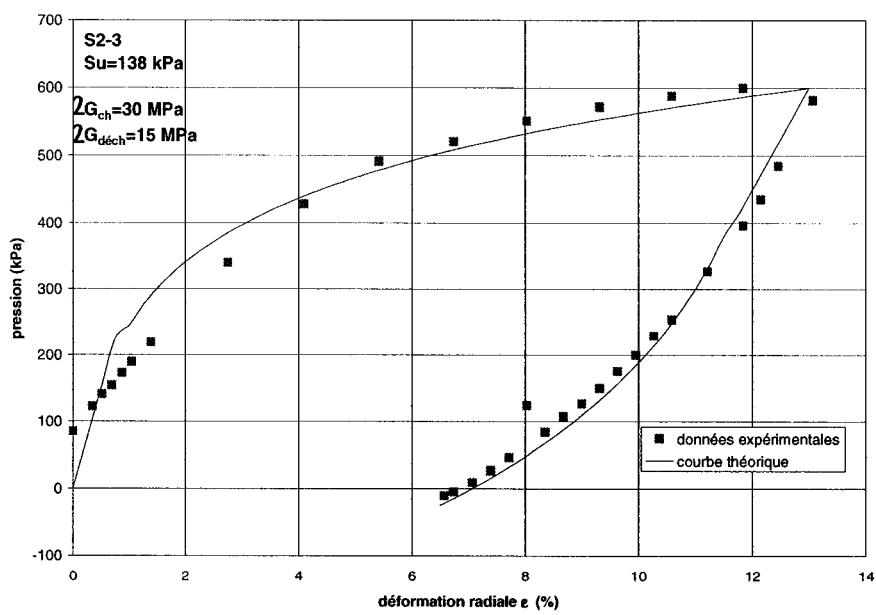
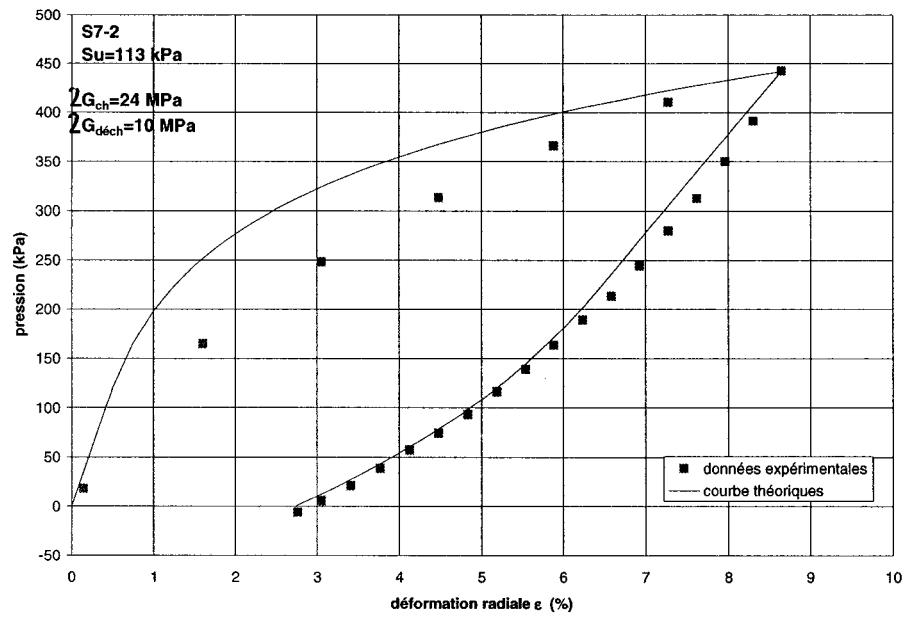


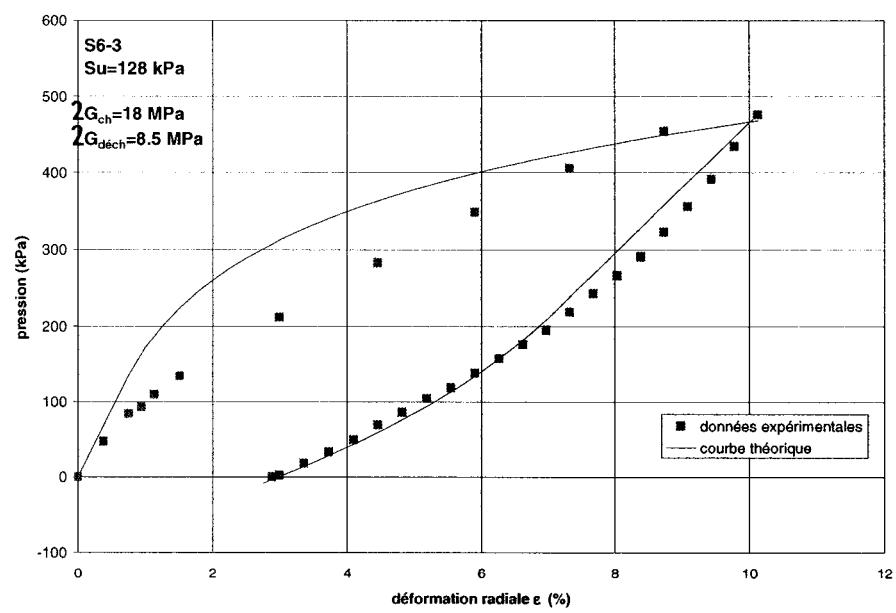
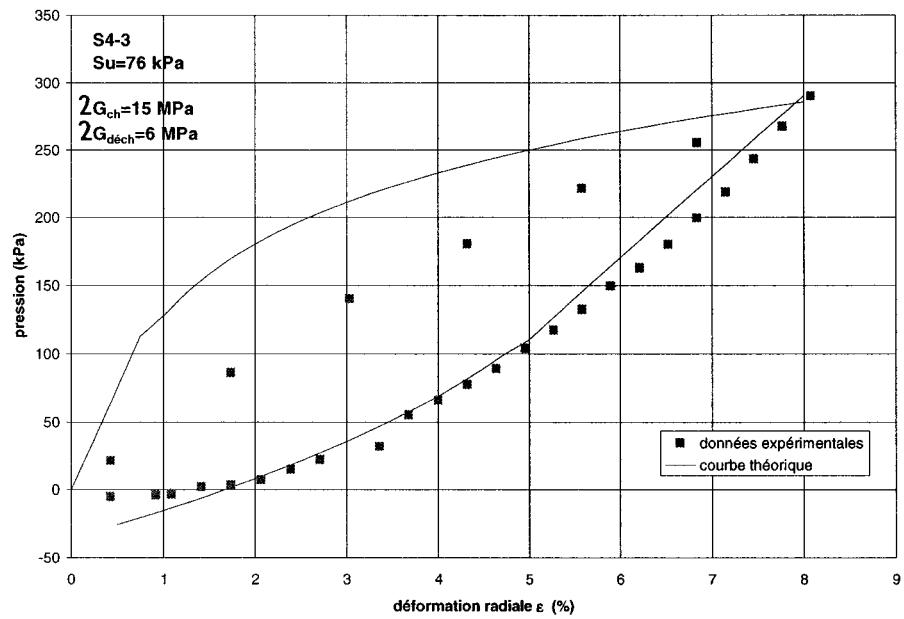


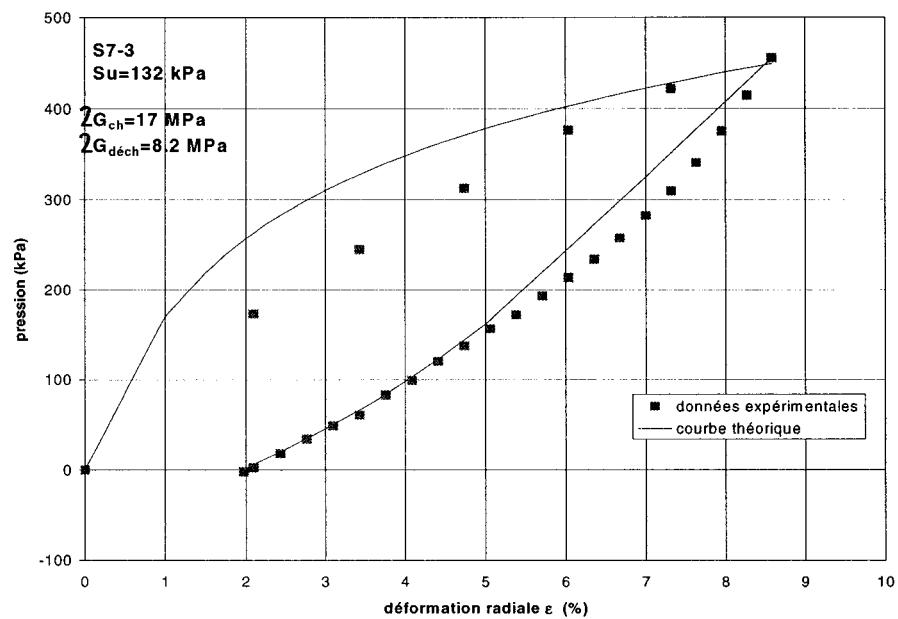












**ANNEXE F****MODÉLISATION DES COURBES PRESSIOMÉTRIQUES****S<sub>U-CHARGEMENT</sub>****2S<sub>U-DÉCHARGEMENT</sub>**

