

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou Bekr Belkaid
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme
De Master en Travaux Publics
Option : Voies et Ouvrages d'Art

Thème

Essai pressiométrique et son utilité en géotechnique

Présenté en juin 2022 par :

Mr. FARAJOU Mohamed Lebatt

Mr. Naimi Zouheyr

Devant le Jury composé de :

DR. BENCHOUK Assia

Présidente

DR. BENAHCHELIF Souad

Examinatrice

PR. ZADJAOUI Abdeldjalil

Encadrant

(2021-2022)

Dédicaces

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères et leurs enfants, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis

A vous cher lecteur

Faradjou M L

Remerciements

Nos remerciements les plus sincères vont à toute personne ayant eu la bonté et la patience de satisfaire notre curiosité et de nous aider dans notre travail par leurs précieux conseils, réponses et recommandations.

A notre encadrant interne, PR, ZADJAOUI Abdeldjalil nous adressons notre plus profonde reconnaissance pour son bon encadrement et pour les conseils fructueux qu'il n'a cessé de nous prodiguer.

Nous tenons à remercier DR, AISSAOUI Soufyane, pour les conseils fructueux qu'il n'a cessé de nous prodiguer. Une personne qui nous inspire le plus grand respect.

DR, BENCHOUK Assia et DR, BENAHCHELIF Souad les membres du jury trouvent ici l'expression de notre reconnaissance pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail, qu'elles voient en ces mots l'expression de notre gratitude pour leur présence, pour leur dévouement et pour l'aide inestimable qu'elles nous ont apportées tout au long de ce parcours. Un petit bout de chemin certes, mais un grand enrichissement.

RÉSUMÉ

Le pressiomètre est un essai en place très utile dans la pratique de l'ingénieur. Ce projet de fin d'étude vise d'approfondir nos connaissances dans ce domaine expérimental de la mise en œuvre et l'exploitation pratique de cet essai.

Il s'agit d'un essai pour le dimensionnement des fondations de bâtiments et d'ouvrages d'art. C'est un essai de chargement du sol qui mesure en place à la fois une caractéristique de déformabilité, le module pressiométrique, et une caractéristique de résistance du sol, la pression limite. Ces deux caractéristiques sont usuellement utilisées directement pour déterminer la contrainte admissible et le tassement des fondations en utilisant des abaques ou des règles empiriques.

Le manuscrit comporte deux parties une bibliographique et une partie expérimentale. La première partie a porté sur l'intérêt de sujet et son utilisation dans la pratique de l'ingénieur.

Dans la deuxième partie, une description générale concernant le site d'étude est donné, puis on présente la localisation des points d'essais et le choix de la technique de forage. Cette partie présente clairement l'exploitation, le dépouillement et l'interprétation des essais pressiométriques réalisés en vue d'une utilisation pratique.

Mots clés : Pressiomètre, Essai in situ, Pression limite, Module pressiométrique.

نبذة مختصرة

يعتبر مقياس الضغط اختبارًا موضوعيًا مفيدًا جدًا في ممارسة المهندس. يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى تعميق معرفتنا في هذا المجال التجريبي للتنفيذ والاستخدام العملي لهذه التجربة. هذا اختبار لتحجيم أسس المباني والهياكل. إنه اختبار تحميل التربة الذي يقيس كل من خاصية التشوه، ومعامل مقياس الضغط، وخاصية مقاومة التربة، والضغط المحدد. عادة ما يتم استخدام هاتين الخاصيتين مباشرة لتحديد الضغط المسموح به وتسوية الأساسات باستخدام الرسوم البيانية أو القواعد العامة. تتكون المخطوطة من جزأين، بليوغرافي وجزء اختبائي. تناول الجزء الأول مصلحة الموضوع واستخدامه في الممارسة الهندسية. في الجزء الثاني، يتم تقديم وصف عام لموقع الدراسة، ثم يتم تقديم موقع نقاط الاختبار واختيار تقنية الحفر. يعرض هذا الجزء بوضوح تشغيل وتحليل وتفسير اختبارات مقياس الضغط التي تم إجراؤها للاستخدام العملي.

الكلمات المفتاحية: مقياس الضغط، الاختبار في الموقع، الحد من الضغط، وحدة مقياس الضغط.

ABSTRACT

The pressuremeter is a very useful in-place test in engineer's practice. This end of-study project aims to deepen our knowledge in this experimental area of the implementation and practical use of this trial.

This is a test for the sizing of the foundations of buildings and structures. It is a soil loading test which measures in place both a deformability characteristic, the pressuremeter modulus, and a soil resistance characteristic, the limiting pressure. These two characteristics are usually used directly to determine the allowable stress and settlement of foundations using charts or rules of thumb.

The manuscript has two parts, a bibliography and an experimental part. The first part dealt with the interest of the subject and its use in engineering practice.

In the second part, a general description of the study site is given, then the location of the test points and the choice of drilling technique are presented. This part clearly presents the operation, analysis and interpretation of pressuremeter tests carried out for practical use.

Keywords: Pressuremeter, In situ test, Limit pressure, Pressuremeter module.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
TABLE DES MATIÈRES.....	ii
LISTE DES TABLEAUX.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	2

Chapitre 1 : Essai Pressiométrique : De la théorie à l'exploitation et interprétation

1.1	Introduction.....	5
1.2	Description de l'appareillage.....	7
1.2.1	La sonde cylindrique	7
1.2.2	Le Contrôleur Pression Volume (C.P.V.)	8
1.2.3	La tubulure de liaison.....	8
1.2.4	Les autres conceptions.....	9
1.3	Mode opératoire.....	9
1.3.1	Résistance propre de la sonde Ménard	10
1.3.2	Expansion propre du pressiomètre Ménard	10
1.3.3	Mise en place de la sonde du pressiomètre Ménard	10
1.4	Interprétation des mesures	14
1.4.1	Interprétation d'un essai pressiométrique Ménard	14
1.4.2	Calcul du module de déformation Ménard (E_M)	15
1.4.3	Détermination de la pression limite Ménard p_l	16
1.4.4	Utilisation de l'essai pressiométrique pour déterminer des paramètres intrinsèques.....	16
1.4.5	Calcul du module de cisaillement.....	16
1.4.6	Estimation des paramètres intrinsèques de résistance au cisaillement	17
1.4.7	Détermination du coefficient de pression des terres au repos	19
1.4.8	Utilisation du pressiomètre en capteur.....	20
1.4.9	Conclusion	20
1.5	Fondement des règlements de conception et dimensionnement basés sur le pressiomètre Ménard	20
1.5.1	Condition de stabilité générale verticale	20

1.5.2	Condition de tassements différentiels admissibles.....	24
1.5.3	Résolution d'autres problèmes.....	27
1.6	Conclusion générale.....	28

Chapitre 2 : Description du site et étude expérimentale

2.1.	Introduction.....	30
2.2.	Présentation de la zone d'étude.....	30
2.2.1.	Contexte géographique.....	30
2.2.2.	Aperçu géologique de la zone d'étude.....	31
2.2.3.	Contexte sismique.....	32
2.3.	Compagnes des reconnaissances mis en œuvre et planning expérimental.....	32
2.4.	Essais d'identification des sols étudiés.....	34
2.4.1.	Granulométrie selon la norme NF P 94-056 et NF P 94-057.....	34
2.4.2.	Détermination des limites d'Atterberg selon la norme NF P94-051.....	36
2.5.	Procédure de l'essai pressiométrique Ménard standard.....	39
2.5.1.	Développement de la norme pressiométrique.....	39
2.5.2.	Principe de l'essai PMT standard.....	39
2.5.3.	Équipement de l'essai PMT.....	41
2.5.4.	Préparation de la sonde pressiométrique.....	43
2.5.5.	Méthodes de réalisation des forages pressiométriques.....	45
2.5.6.	Interprétation de l'essai pressiométrique.....	46
2.6.	Analyse et interprétation des résultats d'essais pressiométriques obtenus.....	51
2.6.1.	Résultats de sondage SP1.....	51
2.6.2.	Résultats de sondage SP2.....	57
2.7.	Synthèse des résultats pressiométriques obtenus.....	57
2.8.	Conclusion.....	59
	CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES.....	61
	RÉFÉRENCES.....	62
	ANNEXES.....	63

LISTES DES FIGURES

Figure 1. 1 : Un pressiomètre Ménard.	9
Figure 1. 2: Courbe de résistance propre d'une sonde Ménard	10
Figure 1. 3: Courbe d'expansion propre d'une sonde Ménard [AFN 00]	11
Figure 1. 4: Programme d'un essai pressiométrique Ménard [AFN 00].....	12
Figure 1. 5: Courbe pressiométrique Ménard [AFN 00].....	12
Figure 1. 6 : Plages de mesure des modules sur la courbe contrainte-déformation	16
Figure 1. 7: Théorie élastoplastique de la force portante d'une fondation	22
Figure 1. 8: Résistance au frottement latéral unitaire limite le long du fût du pieu [MEL 93] en fonction du type de pieu, du type de sol et de sa pression limite.	23
Figure 1. 9: Facteur de portance pressiométrique pour les semelles s en fonction de leur profondeur relative D_e/B . Les catégories conventionnelles de sols sont également données dans [MEL 93].....	24
Figure 2. 1 a) Vue de la situation du terrain sur Google-Earth, b) photo réelle de la zone d'étude des talus entourent les blocs des 2000 places pédagogique.	30
Figure 2. 2 Situation géographique de la zone d'étude.	31
Figure 2. 3 Extrait de la carte géologique de Tlemcen (Doumergue, 1924).	31
Figure 2. 4 Carte de zonage sismique du territoire nationale (d'après RPA, 1999).....	32
Figure 2. 5 Photos des caisses à carottes pour la réalisation des essais de laboratoire.	32
Figure 2. 6 Fréquence de mesure dans chaque sondage pressiométrique.....	33
Figure 2. 7 Plan d'implantation des sondages carotté et pressiométriques.....	33
Figure 2. 8 Dispositif d'essai granulométrie par tamisage.....	34
Figure 2. 9 Dispositif de l'essai granulométrie par sédimentométrie.	35
Figure 2. 10 Courbes granulométriques des sols SC1.....	35
Figure 2. 11 Courbes granulométriques des sols SC2.....	36
Figure 2. 12 Courbes granulométriques des sols SC3.....	36
Figure 2. 13 a) Coupelle de Casagrande et b) limite de plasticité au rouleau.	37
Figure 2. 14 Programme de chargement selon la norme NF EN ISO 22476-4	40
Figure 2. 15 Courbe pressiométrique Ménard type - exemple pour calculer les paramètres pressiométriques (Aissaoui, 2021).....	40
Figure 2. 16 a) Sonde pressiométrique tri cellulaire b) types des gaines de protection.....	41
Figure 2. 17 Le contrôleur pression-volume CPV	42

Figure 2. 18 a) Tubulures et b) bouteille d'azote (gaz comprimé)	43
Figure 2. 19 Essai d'expansion propre de l'appareillage.....	44
Figure 2. 20 Résultats d'essai d'expansion propre de l'appareillage	44
Figure 2. 21 Repérage de la sonde et du conditionneur de pression lors de l'essai de résistance propre de la sonde pressiométrique	45
Figure 2. 22 Courbe de résistance propre de la membrane obtenue	45
Figure 2. 23 Courbe pressiométrique corrigée.....	47
Figure 2. 24 Courbe de fluage pressiométrique.....	49
Figure 2. 25 Courbes corrigées et brutes des essais réalisés dans le sondage SP1.	52
Figure 2. 26 Courbes corrigées et brutes des essais réalisés dans le sondage SP2.	56
Figure 2. 27 Evolution des paramètres pressiométriques en fonction de la profondeur	58

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 Exemple de pressiomètres existants [AMA 91]	7
Tableau 1. 2 Valeurs du facteur de portance k_p (MELT, 1933)	23
Tableau 1. 3 Valeur du coefficient de structure α selon les types de sol.....	26
Tableau 1. 4 Valeurs des coefficients	26
Tableau 2. 1 Synthèse des paramètres physiques obtenus pour les sols étudiés.....	38
Tableau 2. 2 Caractéristique géométrique de la sonde pressiométrique.....	42
Tableau 2. 3 Méthode de réalisation des forages pressiométrique	46
Tableau 2. 4 Synthèse des résultats pressiométriques obtenus	57

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'essai pressiométrique est un essai de chargement statique pratiqué dans le sol en place au cours duquel on mesure l'expansion de la paroi d'un forage à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable en fonction de la pression appliquée au sol par cette sonde.

L'interprétation de cet essai et l'exploitation des résultats est complexe. Deux grandes tendances sont apparues : dans l'une, on utilise les résultats primaires dans un système d'exploitation dérivé à la fois de la théorie et de l'observation [Ménard, 19, Ménard, 1963] pour dimensionner les fondations de différents types d'ouvrages, dans l'autre, à partir des mesures, on déduit les paramètres rhéologiques du sol soit analytiquement [Baguelin, 1972] soit par la technique des méthodes inverses [Cambin et al., 1989].

Une deuxième particularité concernant le pressiomètre est celle de l'influence de la mise en œuvre, même dans le cadre de l'essai normalisé. Les premières sondes pressiométriques ont été mises en place dans des forages réalisés à l'avance : le remaniement éventuel des parois de ce forage ainsi que le temps d'attente entre la réalisation du forage et celle de l'essai, qui tend à provoquer une légère relaxation des contraintes au bord de la cavité, peuvent modifier les résultats. Cette méthode reste toutefois majoritairement utilisée.

Pour réduire ces aléas est né le concept de pressiomètre autoforeur [Baguelin et al., 1973]. Il existe également des pressiomètres dont les sondes sont foncées dans le sol par battage [Amar, 1983] ou par véringage (à l'aide par exemple d'un bâti de pénétromètre statique). Enfin, il existe des appareils pressiométriques destinés au rocher, généralement appelés dilatomètres en forage, dont la mise en œuvre et le dépouillement des résultats peut se faire de la même manière que pour le pressiomètre Ménard. Ce dernier ne fait pas l'objet de ce projet de fin d'études.

Nous nous sommes intéressés dans cette étude à la pratique et la réalisation de l'essai pressiométrique standard pour une éventuelle exploitation pratique pour des projets réels. L'objectif est donc double : 1) faire des mesures fiables de l'essai pressiométrique et 2) dépouillement et exploitation pratique soit en déformabilité soit en résistance (rupture).

Après cette introduction le mémoire comporte deux chapitres complémentaires, une conclusion générale, des annexes et une liste de références bibliographique.

Le chapitre 1 : à caractère bibliographique, représente l'état de l'art de l'essai pressiométrique depuis sa mise en œuvre, mode de réalisation jusqu'à son exploitation et interprétation des résultats.

Le chapitre 2 : il s'agit d'une étude expérimentale de site 2000 places pédagogiques à Chétouane (école préparatoire) en vue de répondre scientifiquement à un problème de glissement des terrains. La campagne géotechnique comporte en plus des essais d'identification réalisés au niveau de LTPO (Tlemcen) plusieurs sondages dont deux destinés aux tests pressiométriques sujet de ce projet de fin d'études.

La conclusion générale regroupe les conclusions partielles et des pistes pratiques pour la mise en œuvre et utilité simple de l'essai pressiométriques.

Chapitre 1

Essai Pressiométrique : De la théorie à l'exploitation et interprétation

Chapitre 1 : Essai Pressiométrique : De la théorie à l'exploitation et interprétation

1.1 Introduction

C'est dans les années 30 que les premiers essais connus de mesure de la déformation du sol sur les parois d'un forage sollicité en pression eurent lieu [KOG 33] avec des sondes cylindriques, soit munies de 2 demi coquilles métalliques galbées rigides, soit constituées d'une enveloppe en caoutchouc.

Mais c'est Louis Ménard [MEN 55] qui fut le véritable pionnier de cette technique, ayant déposé un brevet tandis qu'il était encore élève ingénieur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. L'historique de la mise au point du pressiomètre Ménard et de son développement a déjà été donné ailleurs [GAM 90].

Ayant vite observé que l'obtention de ce qu'on appelle les paramètres intrinsèques du sol était impossible avec les outils de calcul de l'époque, Louis Ménard s'orienta vers l'utilisation des résultats primaires (module pressiométrique, pression limite pressiométrique) dans des schémas de modélisation du comportement du sol vis à vis d'une fondation comparé à celui de l'expansion de la sonde pressiométrique [MEN 62, MEN 63].

Par ailleurs, l'IFSTTAR ex Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris avait lancé dès la fin des années 60 une recherche en vue de s'affranchir des aléas provenant de la technique de mise en œuvre de la sonde. Il en résulta le pressiomètre autoforeur ou PAF [BAG 73] vite suivi en Grande-Bretagne par le Camkometer initialement destiné à mesurer K_0 (comme son nom l'indique) et devenu par la suite un « self-boring pressuremeter » ou SBP.

Les différents types de pressiomètres utilisés dans les sols et leur répartition géographique en Europe en 1990 ont été décrits dans un rapport sur l'état des connaissances par la Commission Technique Régionale Européenne n° 4 de la Société Internationale de Mécanique des Sols et Travaux de Fondation [AMA 91], à l'exception de ceux constitués de 2 demi-coquilles rigides et des sondes foncées. Le développement de l'usage du pressiomètre au Japon depuis les années 50 a été décrit par ailleurs [MOR 95].

Dans le but d'estimer l'évolution des déformations du sol en place sur le long terme, un pressiomètre pour mesurer le fluage du sol a également été mis au point, le Diflupress L.D. [BUF 90]. La tendance actuelle est orientée vers des appareils à acquisition électronique des mesures et à sorties informatisées permettant un traitement sur ordinateur de bureau [GAM 95].

Nous nous bornerons dans la suite de ce projet de fin d'études à ne traiter que le pressiomètre Ménard, le seul utilisé d'une manière quotidienne intensive, en indiquant les principales différences avec les autres pressiomètres, chaque fois qu'il en apparaîtra.

Le pressiomètre Ménard peut être utilisé pour caractériser la plupart des sols (de l'argile molle à la marne raide) et les roches tendres. Des essais à plus de cent mètres de profondeur sont couramment exécutés puisqu'il n'y a pas de risque de refus. Les essais peuvent être exécutés à terre ou en site marin ou aquatique, à partir d'une plateforme flottante. La conception du pressiomètre Ménard permet de mesurer des modules de déformation compris entre 2 et 500 MPa (pour des déformations relatives comprises entre 10^{-3} et 10^{-2}) et des pressions limites entre 300 kPa et 10 MPa.

Le chapitre suivant de cette étude montre l'application de cet appareillage pour des sites de la région de Tlemcen en détail. Malgré la durée courte pour la réalisation de ce travail pratique et expérimental, nous avons essayé de répondre correctement à ce qui est attendu de ce genre de projet de fin d'études.

1.2 Description de l'appareillage

Comme on l'a indiqué, il s'agit de déterminer une fonction contraintes - déformations du sol à la paroi d'un forage. On peut mesurer les déformations de la sonde, soit volumétriquement, soit à l'aide de capteurs de déformation radiale. Ces derniers ne permettent généralement qu'une expansion maximale mesurée sur le rayon beaucoup plus faible soit 5 à 20 % contre 54 % pour les mesures de volume (Tableau 1).

Tableau 1. 1 Exemple de pressiomètres existants [AMA 91]

Classe	Type (pays d'origine)	Pression maximale (MPa)	Elancement de la sonde	Système de mesure de l'expansion
Pressiomètres Avec Préforage	Ménard (France, Canada)	6	8 -16 *	Volumétrique
	Texam (Canada)	10	7	Volumétrique (imposé)
	LLT (Japon)	2,5	8 -10 *	Volumétrique
	Elastmeter (Japon)	10 ou 20	8	3 capteurs dans un plan
	HPD (Grande - Bretagne)	20	6	3x3 capteurs dans 3 plans
	Dilatomètre Mazier (France)	10 ou 20	11	3 capteurs dans un plan
	Tri-mod (Canada)	10	6	6 capteurs dans 2 plans
Probex (Canada)	30	6	Volumétrique	
Pressiomètres Autoforeurs	PAF (LCPC, France)	2,5	2	Volumétrique (imposé)
	SBP (Grande-Bretagne)	4	6	3 capteurs dans un plan
	Boremac (Canada)	4	5	Volumétrique
Pressiomètres Foncés	Minipressiomètre (France)	2,5	10	Volumétrique
	Pencel (Canada)	2,5	8	Volumétrique (imposé)
	Fugro (Pays - Bas)	10	10	3 capteurs dans un plan

* selon le diamètre de la sonde

Le pressiomètre Ménard [AFN 00] comprend essentiellement (fig.1.1) :

- Une sonde cylindrique entourée d'une enveloppe dilatable, cette sonde doit être d'assez grand élancement pour pouvoir simuler l'expansion d'une cavité de longueur; elle est descendue dans un forage réalisé au préalable, à une profondeur fixée à l'avance.

- Un contrôleur pression volume permettant d'appliquer la pression par paliers et de mesurer l'accroissement de volume de la cellule de mesure de la sonde en fonction du temps.

- Une tubulure reliant les 2 composants précédents.

1.2.1 La sonde cylindrique

De trois diamètres différents, elle est conçue pour être descendue dans des forages de diamètre AX, BX, ou NX (normalisation DCDMA) c'est à dire de 44, 60 et 76 mm de diamètre. Le rapport de la longueur de la portion déformable de la sonde à son diamètre est de l'ordre de

7 à 10 pour les sondes du pressiomètre Ménard. La sonde est constituée de 3 cellules : une cellule centrale remplie d'eau et 2 cellules de garde gonflées au gaz. Cette disposition permet de faire les mesures d'expansion dans un champ de contraintes strictement radial, d'éliminer les effets de bords et d'éviter aussi de trop grandes variations de volume à mesurer.

Selon le type de la sonde les enveloppes des cellules sont juxtaposées (sondes E) ou emboîtée (sondes G). On désigne l'enveloppe de chaque cellule sous le nom de membrane et l'enveloppe de la sonde sous le nom de gaine. Membranes et gaines sont en caoutchouc synthétique, les gaines des sondes G peuvent recevoir un renforcement en fibres textiles ou métalliques, ou bien encore une protection complémentaire en bandes métalliques souples qui se superposent partiellement. Si nécessaire, la sonde est protégée par un tube lanterné en métal épais fendu selon au moins 6 génératrices ou quart d'hélices. Les sondes E ne permettent les essais que jusqu'à 2,5 MPa par contre, les sondes G permettent d'atteindre 10 MPa.

Sur certaines sondes autres que celles du pressiomètre Ménard (dont les dilatomètres de forage) l'expansion peut être mesurée par des palpeurs électroniques ; la pression peut atteindre 20 MPa.

1.2.2 Le Contrôleur Pression Volume (C.P.V.)

Cet appareil permet de réguler la pression dans les 3 cellules et de mesurer les variations du volume de liquide dans la cellule centrale au niveau de la tête de forage grâce à un cylindre métallique servant de capacité graduée. Le C.P.V. est relié à l'amont à une source de gaz comprimé (azote généralement, l'oxygène étant à proscrire) et à l'aval à la tubulure de liaison avec la sonde.

Les mesures de pression dans la cellule centrale et dans les cellules de garde se font à l'aide de manomètres traditionnels ou de capteurs de pression électroniques plus précis qui peuvent couvrir toute la gamme des pressions utilisées (10 kPa à 10 MPa). Des manomètres supplémentaires peuvent être installés pour assurer une précision suffisante des résultats. Les variations de pression sont réglées par un détendeur principal (éventuellement « à fuite » pour assurer une meilleure stabilité de la pression pendant chaque palier) et un clapet de régulation destiné à assurer la différence de pression indispensable entre la cellule centrale et les cellules de garde pour tenir compte, entre autres, de l'existence d'une pression hydrostatique complémentaire dans la cellule centrale. Cette disposition peut être remplacée par un jeu d'électrovannes pilotées automatiquement.

Les mesures de volume se font soit à l'aide d'un voyant le long du volumètre soit, dans le cas de saisie numérique, à l'aide d'un système physique dans le volumètre.

1.2.3 La tubulure de liaison.

Celle-ci comprend soit 3 tubes plastiques (sonde E), soit 2 tubes plastiques plus rigides, éventuellement coaxiaux (sondes G). Ces tubes doivent avoir un coefficient d'expansion faible qui permette d'obtenir une bonne précision sur les résultats.

Sur la fig.1, on a représenté un CPV avec manomètres traditionnels et voyant de lecture. Cet appareil est souvent accompagné d'un enregistreur automatique des lectures obtenues à l'aide de capteurs de pression et de volume.

1.2.4 Les autres conceptions.

Le pressiomètre autoforeur P.A.F. du LCPC possède une sonde à une seule cellule précédée d'un module de forage. Le boîtier de régulation et de mesure est activé par le déplacement d'un piston dans le volumètre rempli d'eau [BAG 78]. Le pressiomètre de Cambridge (S.B.P.) est constitué lui aussi d'une sonde à une seule cellule dotée d'un système de préforage. Les déformations radiales de la membrane sont mesurées à l'aide de palpeurs métalliques. Le programme de mise en pression est asservi sur l'expansion de la sonde mesurée radialement [BEN 86].

Les dilatomètres en forage ont une sonde à manchette dilatable par un gaz ou une liquide. Les déformations radiales de la manchette sont mesurées à l'aide de trois capteurs en partie centrale [AFN 02].

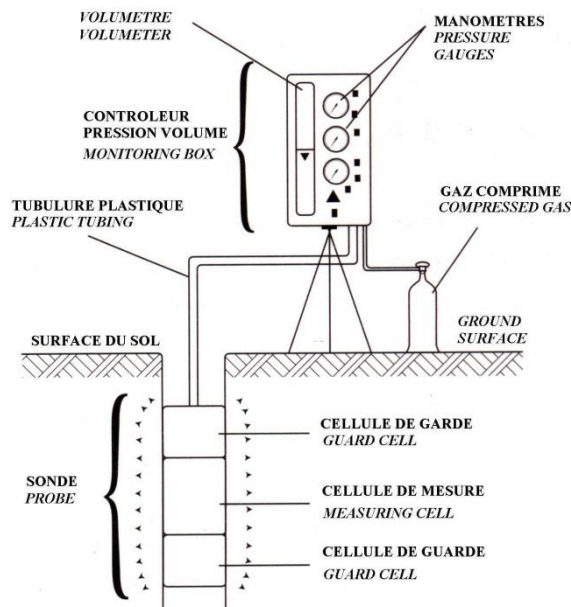


Figure 1. 1 : Un pressiomètre Ménard.

1.3 Mode opératoire

Les essais à l'aide d'un pressiomètre Ménard sont du type statique à contraintes imposées, tandis que les essais au pressiomètre autoforeur étaient, initialement, à déformations imposées, ils sont actuellement exécutés d'une manière mixte.

Avant toute nouvelle série d'essais, il est nécessaire de procéder à un double étalonnage relativement à la résistance propre des enveloppes (membrane + gaine) de la sonde et à l'expansion propre de l'ensemble de l'appareillage (contrôleur + tubulure + sonde). Dans le cas où des palpeurs sont utilisés, une mesure de l'amincissement de l'enveloppe de la sonde en fonction de l'expansion peut être nécessaire. La courbe de réponse brute du sol devra être corrigée des valeurs parasites ci-dessus comme indiqué plus loin [AFN 00, AST 00].

1.3.1 Résistance propre de la sonde Ménard

La détermination de la résistance propre de la sonde Ménard s'effectue avec la sonde placée au niveau du C.P.V. et consiste à effectuer un essai d'expansion à l'air libre. Pour chaque pression p appliquée par paliers jusqu'à la résistance limite propre de la sonde (fig.1.2), on mesure le volume V que prend la cellule centrale à stabilisation. On peut ainsi tracer la courbe de la résistance propre de la sonde en fonction du volume introduit $p = p_e(V)$.

1.3.2 Expansion propre du pressiomètre Ménard

L'expansion propre de l'appareillage se mesure sur la sonde montée avec la tubulure et le C.P.V. qui doivent être utilisés lors des essais envisagés. La sonde est placée dans un tube métallique épais d'un diamètre légèrement plus grand que cette sonde et qui est réputé de dilatation négligeable jusqu'à 10 MPa. Pour chaque pression p appliquée, on mesure le volume V de la sonde (fig.1.3). On peut ainsi déterminer le volume à vide conventionnel V_s de la sonde qui intervient dans le calcul des paramètres pressiométrique et le coefficient d'expansion volumétrique « a » de tout l'appareillage en cm^3 / MPa .

1.3.3 Mise en place de la sonde du pressiomètre Ménard

La sonde du pressiomètre Ménard est généralement mise en place dans un forage d'un diamètre à peine plus grand que celui de la sonde au repos. Dans le but de réduire au minimum le remaniement des parois du forage, et ainsi de réaliser l'essai sur un terrain aussi proche que possible de son état initial, des techniques de forages sont recommandées en fonction du type de sol étudié [AFN 00].

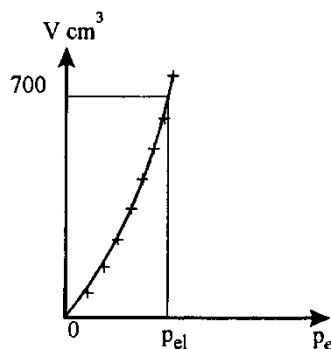


Figure 1. 2: Courbe de résistance propre d'une sonde Ménard

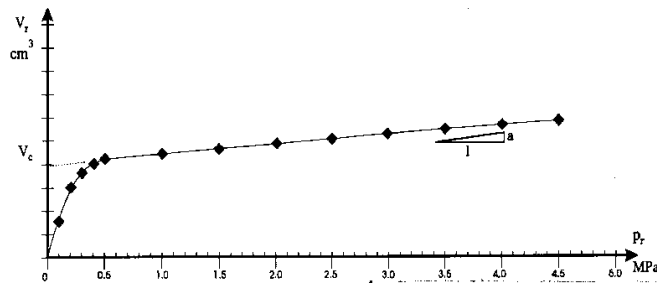


Figure 1. 3: Courbe d'expansion propre d'une sonde Ménard [AFN 00]

Le volume de la sonde à vide est $V_s = 0,25\pi d^2 \cdot V_c$ où d est le diamètre du tube d'étalonnage et V_c l'ordonnée à l'origine de la droite d'ajustement pour $P > 500$ KPa

Dans les sables et graviers noyés pour lesquels une boue de forage ne permet pas de tenir stables les parois du forage, il est possible de procéder au battage de l'ensemble constitué par la sonde et un tube en métal épais fendu selon plusieurs génératrices, qui l'enveloppe. Eventuellement, on procède d'abord à un forage d'un trou pilote en plus petit diamètre. L'expérience a montré que les résultats obtenus peuvent être dépouillés selon les mêmes règles.

Lorsqu'on utilise une sonde battue ou foncée dans un terrain autre que les sables et graviers noyés, les résultats ne se rapprochent des essais normalisés que si la pointe de battage est d'un diamètre supérieur à celui de la sonde de manière à permettre une relaxation minimale de la paroi du forage.

Dans le cas d'un essai au pressiomètre autoforeur, il est nécessaire de conserver intact le sol situé sur le cylindre virtuel vertical prolongeant la trousse coupante de la sonde. Ceci impose de positionner l'outil désagrégateur dans la cavité métallique du module de forage d'une manière très précise [WRO 82] :

- si l'outil est trop haut par rapport au bord de la trousse coupante, le sol fait bourrage et le cylindre virtuel se dilate,
- si l'outil est trop bas, le sol est décomprimé et le cylindre virtuel se contracte.

Dans les 2 cas, le sol a déjà subi un début d'essai avant l'heure.

2.3.1.1. Réalisation d'un essai pressiométrique Ménard

L'essai pressiométrique étant un véritable essai de chargement normalisé, il est nécessaire de respecter certaines règles.

2.3.1.2. Réglage de la pression différentielle

La sonde devant être descendue à une profondeur Z , il faut procéder au niveau du C.P.V au réglage de la pression différentielle en tenant compte :

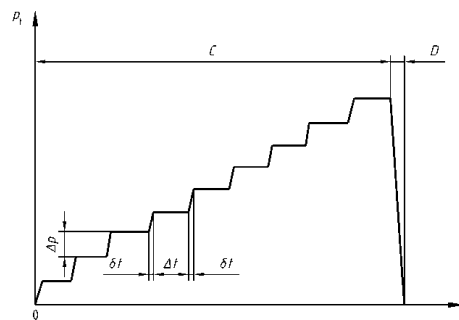
- de la compensation dans les cellules de garde de la pression hydrostatique $\gamma_w Z$ qui ne règne que dans la cellule centrale et qui ne peut être mesurée par C.P.V ;

– pour les sondes G (à cellules emboîtées) de la surpression qu'il faut appliquer à la cellule centrale comprimée entre les espaces matérialisant les cellules de garde pour qu'elle se dilate et conserve une longueur constante quand la pression croît.

Ce réglage se fait à l'aide du clapet de la pression différentielle (ou d'un jeu d'électrovannes), comme précisé dans la norme [AFN 00].

2.3.1.3. Essai proprement dit

Le programme d'un essai est conforme à la fonction $p(t)$ donnée à la fig.1.4 [AFN 00]. La courbe pression-déformation s'obtient en sollicitant le sol à des paliers de pression en progression arithmétique, chaque palier étant maintenu pendant 60 secondes. Pour chaque palier on mesure les déformations volumétriques V à 1 sec., 15 sec., 30 sec. et 1 minute après avoir obtenu la pression fixée en manipulant le détendeur principal ou en télécommandant le jeu d'électrovannes. La courbe pressiométrique brute est obtenue en reliant les points correspondant à chaque pression p et à chaque volume V_{60sec} (fig.1.5).



p pression
 t temps
 Δt durée d'un palier
 δt temps de montée en pression
 C phase de chargement
 D phase de déchargement

Figure 1. 4: Programme d'un essai pressiométrique Ménard [AFN 00]

$$\Delta p = 0,1 p_1 \quad \delta t < 20 \text{ secondes} \quad \Delta t = 60 \text{ secondes}$$

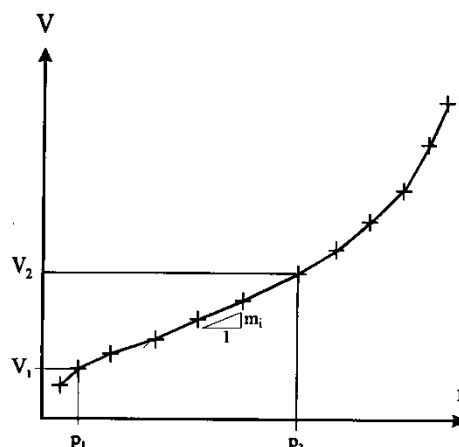


Figure 1. 5: Courbe pressiométrique Ménard [AFN 00]

La courbe pressiométrique corrigée s'obtient en déduisant de chaque pression p_r lue la résistance propre de la sonde pour le même volume et en déduisant de chaque volume V lu, l'expansion de l'appareillage égal à $a \times p_r$, a étant le coefficient d'expansion de l'appareillage :

$$- p_{\text{corrigé}} = p_r - p_e (V)$$

$$- V_{\text{corrigé}} = V - a p$$

L'essai pressiométrique étant réalisé en contraintes imposées, les pressions sont portées en abscisses et les volumes en ordonnées, à l'inverse de la plupart des essais mécaniques (lesquels sont à déformations imposées pour raison de commodité). Bien entendu lorsque les essais avec d'autres types de pressiomètre se font en déformations imposées les axes de coordonnées sont inversés. Sur le graphique de la courbe pressiométrique Ménard, on indique souvent la courbe de fluage, c'est à dire qu'on trace pour chaque palier de pression la tendance à la stabilisation des variations de volume représentée par la valeur $V_{60\text{sec.}} - V_{30\text{sec.}}$.

On définissait autrefois la plage de calcul du module pressiométrique, comme correspondant à la partie quasi – horizontale de la courbe de fluage, limitée supérieurement par la pression de fluage. Cette plage est maintenant définie autour du segment de moindre pente de la courbe pressiométrique.

Les essais au dilatomètre en forage à paroi souple s'effectuent toujours avec des cycles de chargement-déchargement [AFN 02]. Ces cycles sont également recommandés pour les essais au pressiomètre autoforeur [CLA 92].

2.3.1.4. Essai cyclique

Ce type d'essai permet de déterminer un module de déformation cyclique. Dans la norme française [AFN 99], on ne calcule que le module Ménard au rechargement. Il en est de même pour le dilatomètre en forage [AFN 02]. Pour d'autres appareils, on calcul un module moyen de déchargement-rechargement.

2.3.1.5. Essais non normalisés

Il s'agit essentiellement des essais au pressiomètre autoforeur. Les mesures se font le plus souvent en déformations imposées, toutefois pour obtenir une meilleure précision dans les faibles déformations, on procède souvent en contraintes imposées.

Sur le graphique d'une courbe au P.A.F. dans l'argile, on trace également la courbe de résistance au cisaillement estimée selon plusieurs méthodes [BAG 78]. Sur celui d'une courbe S.B.P, on remarque généralement 1 ou plusieurs cycles de déchargement et rechargement [WRO 82]. Ces essais sont en cours de normalisation au niveau européen de même que celui du dilatomètre en forage.

1.4 Interprétation des mesures

Le but d'un essai pressiométrique est de fournir des caractéristiques mécaniques permettant dans une phase ultérieure soit de dimensionner des ouvrages de Génie Civil, soit de procéder à des recherches dans le but d'affiner nos connaissances sur le comportement des sols sous sollicitations. Dans le premier cas on peut se contenter de paramètres simples, dans le deuxième il faut rechercher les paramètres du comportement rhéologique du sol.

La relation pression-déformation obtenue au cours d'un essai pressiométrique doit permettre de définir ces paramètres du sol à partir de théories variées selon les hypothèses retenues pour l'expansion d'une cavité cylindrique :

- dans un milieu élastique linéaire [LAM 52], sans chercher à interpréter la phase de rupture ;
 - dans un milieu élastoplastique
 - sans changement de volume
 - pour un sol cohérent [BIS 45],
 - pour les sols frottants et cohérents [MEN 55, MEN 56],
 - ou avec changement de volume, dans la phase élastique seule [HIL 50] ou également dans la phase plastique, [VES 72], [MON 94], [MON 95] ;
- dans un milieu cohérent non élastique sans changement de volume [BAG 72], [LAD 72], [PAL 72]) ;
- dans un milieu linéaire dilatant [FRA 74] ;
- dans le cas général, avec changement de volume, [WRO 75] et dilatance [HUG 77];
- dans un sol cohérent, avec un anneau remanié ([BAG 72, BAG 75].

1.4.1 Interprétation d'un essai pressiométrique Ménard

Cette interprétation se fait au niveau le plus simple [AFN 00]. Pour déterminer un module de déformation E_M , on suppose le sol régi par la loi de l'élasticité linéaire. Pour déterminer une caractéristique de rupture p_l sans faire intervenir d'hypothèses sur le comportement du sol en plasticité, on utilise un raisonnement semblable à celui qui est tenu pour déterminer la rupture du sol sous une plaque soumise à un essai de chargement.

Fabricants d'appareils et utilisateurs ont mis au point des logiciels de dépouillement des essais selon la norme. On note qu'il n'est pas possible de mesurer la pression du sol au repos p_0 au pressiomètre Ménard pendant un essai normalisé. On donne dans la section IV.2.3 une façon de procéder à cette mesure à l'aide d'une sonde de pressiomètre passive.

1.4.2 Calcul du module de déformation Ménard (E_M)

Ce module est mesuré au voisinage du segment ayant la pente la plus faible de la courbe pressiométrique : c'est en effet dans cette plage, dite plage du module pressiométrique, que la réponse du sol correspond à celle d'un sol quasiment intact, mais sollicité dans un domaine de déformations importantes [GAM 98].

A la mise en pression, la gaine de la sonde vient d'abord en contact de la paroi du forage puis éventuellement resserre le sol s'il y avait eu légère relaxation. Au cours de l'accroissement de la pression, un anneau de sol en cisaillement micro-plastique puis plastique se développe autour de la sonde. On ne doit pas perdre de vue que dans la plage retenue pour le calcul du module, le sol est déjà en comportement avant rupture. Il n'est plus en élasticité linéaire, le module est mesuré pour des déformations relatives de l'ordre de 10^{-2} et non pour les déformations élastiques de 10^{-6} [MEN 61, GAM 96].

Toutefois la formule utilisée pour le calcul du module est celle de l'expansion d'une cavité cylindrique sous déformations radiales, en élasticité linéaire. On démontre [BAG 78] qu'elle reste valable dans les matériaux dilatants.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2G} \Delta p \quad (1)$$

- G est le module de cisaillement pour la plage des sollicitations provoquées
- R est le rayon de la section droite du trou
- ΔR dénote l'accroissement de ce rayon en fonction d'un accroissement de pression Δp à la paroi de la cavité.

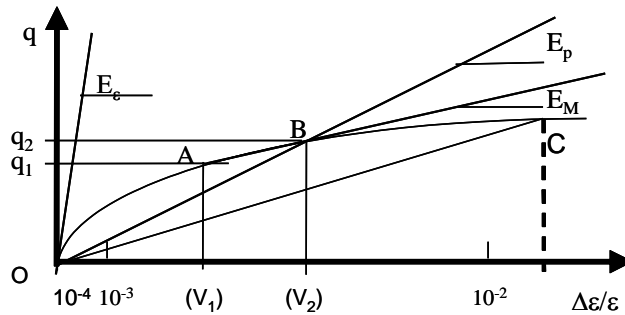
Pour obtenir un module E, on utilise la formule habituelle donnant le module d'Young :

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (2)$$

ν est le coefficient de Poisson du sol.

Par convention, on prend $\nu = 0,33$ pour calculer le module pressiométrique Ménard E_M . Ce module E_M ne peut donc être comparé ni avec un véritable module élastique du sol mesuré pour des déformations de 10^{-6} à 10^{-5} et utilisé dans le phénomène de propagation d'ondes, ni avec le module mesuré lors d'un essai de chargement du sol

à la plaque [GAM 02]. Ménard a souvent utilisé les termes de module pseudo-élastique ou de module en micro-plasticité pour distinguer E_M du module de micro-déformation E_ε [MEN 61, MEN 62], désigné aujourd'hui par E_o . La plage de mesure de ces différents modules est représentée sur la figure 1.6. Le module E_M mesuré entre les contraintes q_1 et q_2 (q_1 différent de zéro) est proportionnel à la pente de la droite AB sécante de la courbe contrainte-déformation entre 10^{-3} et 10^{-2} . Il est aussi faible que le module du sol mesuré sous une plaque chargée à l'apparition de la rupture (pente de OC au facteur géométrique près).



$\Delta\varepsilon/\varepsilon$: Déformation relative en échelle arithmétique
 q : contrainte appliquée
 E_ε : module élastique
 E_p : Module sécant à la plaque
 E_M : module pressiométrique

Figure 1. 6 : Plages de mesure des modules sur la courbe contrainte-déformation

1.4.3 Détermination de la pression limite Ménard p_l

De même que dans un essai de chargement d'une plaque, on détermine la pression moyenne de rupture pour un enfoncement de la plaque égal au $\frac{1}{10}$ de la dimension de la plaque, de même la pression limite Ménard p_l est définie conventionnellement comme la pression pour laquelle le volume de la cavité cylindrique initiale, au droit de la cellule centrale, est doublé. Cette expansion correspond donc à une déformation radiale relative de $\sqrt{2}$. On peut également définir une pression de fluage pressiométrique, comme indiqué dans la norme mais le rôle de celle-ci dans le dimensionnement des fondations est très réduit.

1.4.4 Utilisation de l'essai pressiométrique pour déterminer des paramètres intrinsèques

Cette interprétation ne peut se faire que sur les mesures obtenues au cours d'un essai pressiométrique idéal réalisé soit au pressiomètre autoforeur, soit dans une boîte à sable où le matériau est placé à une densité choisie autour de la sonde disposée au préalable au centre de cette boîte. Cette interprétation nécessite de faire un choix concernant les hypothèses relatives à la loi de comportement du sol.

1.4.5 Calcul du module de cisaillement

Dans la théorie de l'élasticité linéaire ce module étant indépendant des conditions de variations de volume du sol se calcule à l'aide de la formule (1). Lors du dépouillement des essais au pressiomètre autoforeur on pourra, en raison de la forme de la courbe pressiométrique, donner en plus du module tangent à l'origine, assimilé au module élastique, des modules sécants pour chaque plage de pressions et des modules cycliques sur les boucles de déchargement / rechargement. L'apparition d'un anneau de sol remanié modifie ces valeurs [BAG 72]. Toutefois, compte tenu des appareillages de mesure mis en jeu [FAH 90], il n'est pas

toujours possible d'assimiler le module tangent mesuré au véritable module de cisaillement élastique.

1.4.6 Estimation des paramètres intrinsèques de résistance au cisaillement

On peut utiliser deux techniques pour l'estimation des paramètres de résistance au cisaillement du sol :

- une formulation analytique de l'expansion de la cavité cylindrique qui permet de calculer c et φ ;
- une méthode inverse dans laquelle on ajuste numériquement une loi de comportement par comparaison des résultats théoriques avec ceux obtenus expérimentalement.

1.4.6.1.1 Formulation analytique

Si on considère une loi de comportement élastique linéaire / plastique sans changement de volume du sol (c'est à dire sans contractance ni dilatance), la relation entre la pression limite théorique p_L (c'est à dire l'abscisse de l'asymptote à la courbe pressiométrique parallèle à l'axe des expansions) et les paramètres c et φ peut s'écrire d'une manière analytique, rappelée dans [MEN 63] :

$$P_L = (1 + \sin \varphi)(p_o + c \cot \varphi) \left[\frac{E}{2(1 - \nu) \sin \varphi} \times \frac{1}{p_o + c \cot \varphi} \right]^a - c \cot \varphi \quad (3)$$

avec $a = \frac{\sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$ et ν le coefficient de Poisson. Cette formule est valable lorsque le

module de Young est constant et lorsque la contrainte verticale est la contrainte principale intermédiaire.

On notera que Salençon [SAL 66] avec des hypothèses de départ légèrement plus élaborées (volume variable en fonction de la contrainte moyenne dans les phases élastique et plastique) mais en supposant toujours que la contrainte verticale reste la contrainte principale intermédiaire et que le module E est constant, a donné l'expression suivante :

$$P_L = (1 + \sin \varphi)(p_o + c \cot \varphi) \left[\frac{E}{4(1 - \nu^2) \sin \varphi} \times \frac{1}{p_o + c \cot \varphi} \right]^a - c \cot \varphi \quad (4)$$

Pour le cas $\varphi = 0$, on trouve :

- avec Ménard $p_L = p_o + c_u \left[1 + \text{Log} \frac{E}{2(1 + \nu) c_u} \right]$;

– avec Salençon $p_L = p_o + c_u \left[1 + \text{Log} \frac{E}{4(1-\nu^2)c_u} \right]$

ce qui permet, connaissant E et p_L par le dépouillement de l'essai lui-même, et p_o par ailleurs, de résoudre ces équations pour obtenir c_u dans les argiles. De la même façon, lorsque c_u est égal à 0, on peut résoudre les équations (3) et (4) pour obtenir φ dans les sables propres. Dans le cas le plus général ($c \neq 0, \varphi \neq 0$), la résolution analytique n'est possible que si l'on a au moins une deuxième relation entre c et φ grâce à des essais de laboratoire.

Rappelons que dans ces formules, le module E à prendre en compte n'est pas E_M , la pression limite p_L n'est pas la pression limite conventionnelle p_f et la mesure de p_o s'obtient par un essai complémentaire.

En fait, dans toutes ces approches, le sol est considéré comme un milieu continu, monophasique. On peut adopter ce modèle, en y ajoutant ou non comme cela a été fait ci-dessus, l'hypothèse de non variation de volume, pour représenter le comportement d'une argile respectivement non drainée ou drainée. Par contre dans le cas d'un sol pulvérulent, on ne peut faire abstraction d'autres phénomènes tels que :

- la contractance/dilatance qui nécessite pour être simulée, la prise en compte des variations de volume dues au cisaillement,
- la sensibilité du sol, c'est à dire la réduction de sa résistance au cisaillement sous grandes déformations (valable aussi pour les argiles)

On trouvera une étude sur ces points ailleurs [BAG 78] ainsi que sur le rôle d'un anneau de sol remanié autour du forage.

D'autres auteurs ont poursuivi les recherches en supposant que la contrainte verticale pouvait intervenir dans le phénomène de plasticité [MON 90, MON 95]. La formule (3) peut être modifiée pour tenir compte de la dilatance : pour obtenir c, φ et ψ , il faut une troisième relation [MON 94].

Certains parmi ces mêmes auteurs ont cherché également à déduire ces paramètres à partir de la valeur de la pression limite conventionnelle Ménard [MON 95, COM 96], mais en maintenant toujours E constant dans la formule (3) modifiée pour tenir compte de la dilatance.

1.4.6.1.2 Méthode inverse

Puisque les conditions aux limites du massif de sol testé sont connues, l'essai pressiométrique devrait être idéal pour déterminer les paramètres mécaniques du sol dans le cas de modèles plus complexes à condition de s'orienter vers une méthode inverse de résolution. Dans cette méthode, on postule une loi de comportement et on compare la courbe d'expansion cylindrique théorique avec une courbe expérimentale d'essai pressiométrique, de préférence réalisée en autoforage.

Dès 1961 Gibson et Anderson [GIB 61] avaient proposé l'ajustement d'une droite sur la courbe pressiométrique en coordonnées logarithmiques pour obtenir la résistance au cisaillement non drainée par :

$$p = \sigma_h + c_u \ln \frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

ou σ_h désigne la contrainte horizontale au repos dans le sol. Plus récemment, de nombreux auteurs, avec Hugues ou Monnet ont proposé des ajustements de courbes dans différents systèmes de coordonnées soit à partir de l'état initial strictement connu [HUG 77] soit à partir d'un cycle de déchargement rechargement pour obtenir les paramètres intrinsèques du sol [MON 97].

De même Cambou et Boubanga [Cambou et Boubanga, 1989] ont proposé un algorithme d'optimisation des paramètres dans une étude aux éléments finis pour les lois de comportement de Duncan et Chang [Duncan et Chang, 1970] de Cambou et Jaffary [Cambou et Jaffary, 1988] et du Cam-Clay. Hicher et Michali [Hicher et Michali, 1995] ont utilisé la loi élastoplastique d'Hujeux [AUB 82] pour identifier des argiles molles.

Shahrour et al. [Shahrour et al., 1995] ont étudié la possibilité de déterminer les paramètres du modèle de Mohr – Coulomb non associé (E , ν , ϕ et ψ) pour un sable à partir de l'essai pressiométrique en utilisant la technique des méthodes inverses pour des solutions en grandes déformations. Ils ont montré les difficultés de cette méthode en raison d'un fort couplage entre les trois paramètres E , ν et ϕ . La détermination nécessite des données supplémentaires telles qu'un cycle de déchargement – rechargement ou la détermination de l'angle de frottement critique (peu sensible au remaniement) à partir d'essais de laboratoire.

1.4.7 Détermination du coefficient de pression des terres au repos

Dans la mesure où K_0 peut avoir une influence dans les calculs classiques de la Mécanique des Sols, il est intéressant de chercher à le mesurer in situ. C'était d'ailleurs le premier but du Cam K_0 meter [WRO 72].

Les sondes de pressiomètre introduites dans un forage préparé à l'avance ne permettent pas de mesurer K_0 en raison de la relaxation des contraintes à la paroi du forage dans l'intervalle de temps entre la fin du forage et le début de l'essai, ainsi que de la complexité du phénomène d'application de la gaine sur cette paroi. Cependant, en laissant dans le sol une sonde gonflée à un volume V (pour lequel p est initialement supérieure à la valeur de p_0 estimée), et ce, jusqu'à stabilisation, on peut avoir une valeur de p_0 fiable. Des sondes de ce type, appelées « Geocells » que l'on peut déconnecter du CPV pendant la phase de relaxation sont disponibles.

Par contre, on peut, avec beaucoup d'expérience mesurer K_0 à l'aide du pressiomètre autoforeur [BAG 72, BEN 95].

1.4.8 Utilisation du pressiomètre en capteur

On a vu qu'on peut envisager de laisser la sonde pressiométrique passive dans le terrain, gonflée à une faible pression. L'expérience montre que cette pression tend à se stabiliser, la sonde jouant le rôle de capteur.

Dans les sols peu sensibles aux phénomènes de gonflement – rétraction, il est possible avec ces sondes de suivre les variations de la contrainte moyenne en fonction d'opérations de Génie Civil telles que percement d'un tunnel.

1.4.9 Conclusion

Bien que, théoriquement, l'essai pressiométrique soit le seul essai in-situ qui puisse être l'objet d'une solution analytique exacte, la résolution du problème n'est pas aisée, car les champs de contraintes et de déformations ne sont pas uniformes. On comprend ainsi mieux que Ménard face à ce problème à la fin des années 50 ait opté pour la comparaison de la réponse du sol lors d'un essai pressiométrique avec celle sous une fondation, ce qui l'a conduit à un emploi direct des résultats de ses essais pour le dimensionnement des fondations, comme on va le voir ci-dessous.

Les appareils provoquant l'expansion d'un trou de forage sont les seuls à pouvoir donner directement une valeur de la raideur du sol pour une déformation relative qui correspond à celle que créent les fondations des ouvrages bien étudiés. Ces appareils sont donc bien adaptés à la mesure des modules de déformation qui intéressent les acteurs de la construction. Ceci explique pourquoi le pressiomètre Ménard est devenu l'outil de choix pour contrôler les densifications des sols sableux sur de grandes épaisseurs [GAM 95, DEB 98].

1.5 Fondement des règlements de conception et dimensionnement basés sur le pressiomètre Ménard

Ayant compris la difficulté qu'il y avait à obtenir les paramètres intrinsèques d'un sol (dans la mesure où ces paramètres existent) à partir d'un essai pressiométrique, même avec un cycle déchargement-rechargement, Ménard a préféré comparer la réaction du sol lors du chargement des parois d'un forage avec celle observée sous tous types de fondation, tant sur le plan de la rupture que des déformations.

1.5.1 Condition de stabilité générale verticale

Ménard n'a pas été le premier [SKE 53] ni le dernier [VES 77] à comparer la réaction du sol à la base d'un pieu avec celle autour d'une cavité sphérique en expansion, mais il a été le seul à disposer d'un appareil permettant d'effectuer les comparaisons in situ entre la réaction du sol, soit autour d'un pressiomètre sphérique, soit autour d'un pressiomètre cylindrique, soit

autour et sous une fondation. Théorie et expérimentation ont été présentées dans une série d'article [MEN 62 -75]. Les comparaisons expérimentales ont été continuées jusqu'à maintenant, en particulier par le groupe des Laboratoires des Ponts et Chaussées Français, ce qui a permis récemment d'affiner ces règles de conception [MEL 93].

L'idée part du fait (fig.1.7) que plus le pieu est profond plus la part prise par la compressibilité élastique du sol l'emporte sur la part prise par la résistance au cisaillement limite dans le phénomène de rupture sous et autour de la pointe du pieu. De la sorte, la formule dite de Terzaghi sur la force portante de la pointe d'un pieu basée sur un comportement du sol plastique rigide doit faire place à une théorie élasto-plastique, lorsque la base de la fondation est située à une profondeur supérieure à la profondeur critique.

Plutôt que de bâtir cette théorie, (alors que les outils manquaient encore) Ménard a préféré procéder par corrélations théoriques et expérimentations. A une profondeur supérieure à la profondeur critique, il y a une corrélation entre la pression limite mesurée au pressiomètre Ménard et la pression limite mesurée au cours de l'expansion d'une sphère dans le même sol. Donc il y a corrélation entre la contrainte ultime sous la pointe d'un pieu (fonction de l'expansion sphérique du volume plastifié autour de cette pointe) et la pression limite pressiométrique. Ce qui peut s'écrire sous forme mnémonique :

$$q_l - q_o = k (p_l - p_o) \quad (6)$$

- q_l est cette contrainte ultime sous la pointe du pieu ;
- q_o est la contrainte verticale due au poids des terres au même niveau ;
- k est le coefficient de portance de Ménard ;
- p_l est la pression limite pressiométrique ;
- p_o est la contrainte horizontale des terres au repos.

Ce sont les valeurs de k déduite de la base de données des Laboratoires des Ponts et Chaussées qui sont données dans le fascicule 62 titre V du CCTG [MEL 93] en fonction du type de sol, mais aussi du mode de réalisation du pieu, cette réalisation pouvant entraîner plus ou moins de remaniement au niveau de la pointe du pieu (Tableau 2).

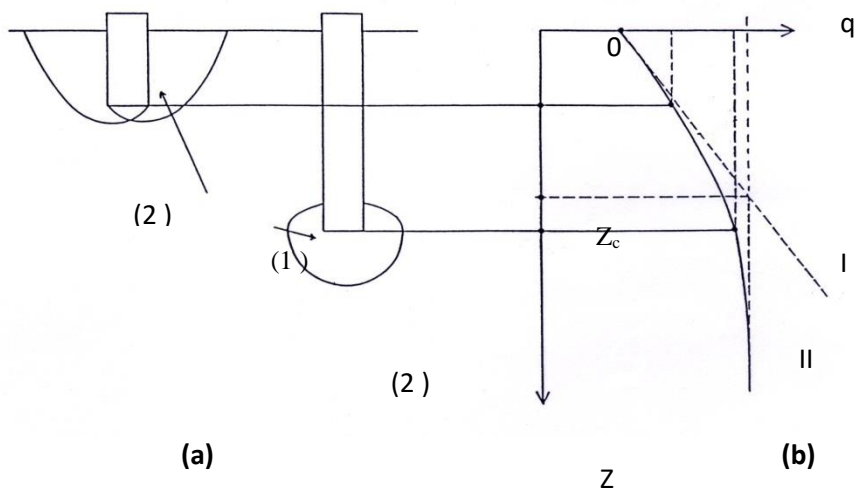


Figure 1. 7: Théorie élastoplastique de la force portante d'une fondation

- (a) Coupe verticale du sol autour des fondations
 (1) : volumes cisailés
 (2) : volumes de sol en réaction élastique autour de (1)
- (b) variation de la contrainte de rupture q en fonction de la profondeur Z
 I : théorie plastique rigide II : théorie élasto-plastique
 Z_c : profondeur critique

A noter que certains chercheurs ont voulu directement associer la pénétration d'un pieu à l'expansion d'une cavité cylindrique en se basant sur le champ des déformations induites par cette pénétration [SAL 97].

Les valeurs de la résistance au frottement latéral, connues pour être fonction de la résistance au cisaillement du sol, sont également données en fonction de la pression limite pressiométrique et aussi du type de sol et du type de pieu (Fig.1.8).

Lorsque la fondation est à une profondeur inférieure à la profondeur critique des valeurs plus faibles de k sont fournies dans des tableaux et graphiques (Fig.1.9). Les valeurs s'appliquent essentiellement à des semelles et aussi à des puits réalisés selon les mêmes techniques que des semelles, c'est pourquoi les valeurs de k (semelles) pour une profondeur voisine de la profondeur critique ne sont pas confondues avec les valeurs de k (pieux), la plupart des pieux étant réalisés par des techniques d'excavation plus destructurantes et ne permettant pas un nettoyage complet de la cavité.

Tableau 1. 2 Valeurs du facteur de portance k_p (MELT, 1933)

Nature des terrains		Eléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Eléments mis en œuvre avec refoulement du sol
Argiles Limons	A	1.1	1.4
	B	1.2	1.5
	C	1.3	1.6
Sables Graves	A	1	4.2
	B	1.1	3.7
	C	1.2	3.2
Craies	A	1.1	1.6
	B	1.4	2.2
	C	1.8	2.6
Marnes Marno-calcaires		1.8	2.6
Roches altérées		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2

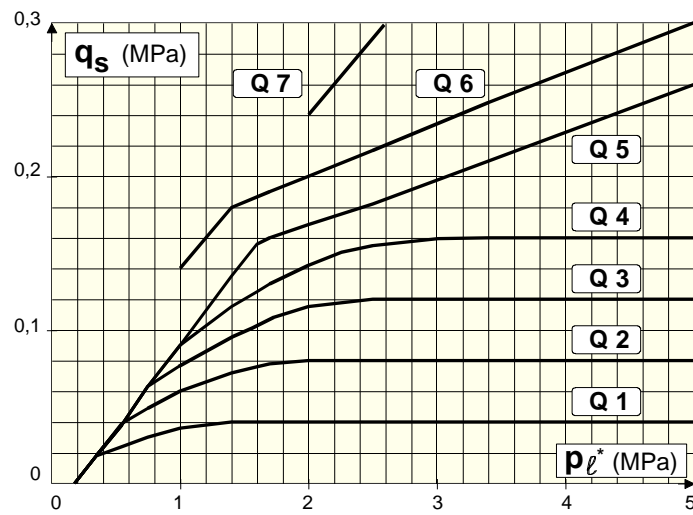
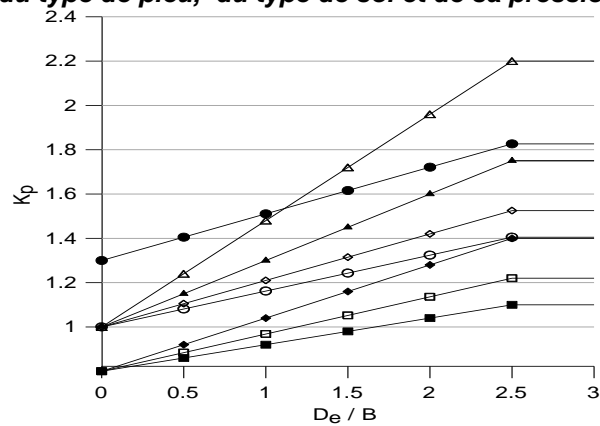
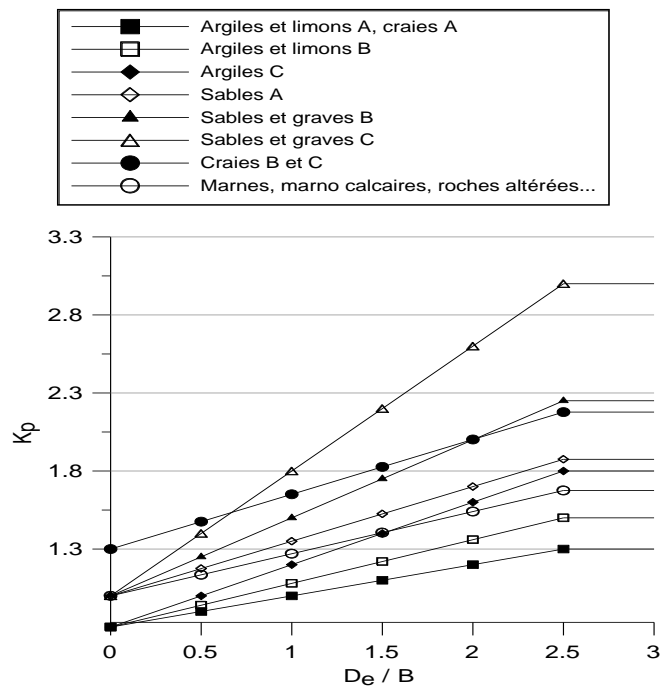


Figure 1. 8: Résistance au frottement latéral unitaire limite le long du fût du pieu [MEL 93] en fonction du type de pieu, du type de sol et de sa pression limite.



(a)



(b)

Figure 1. 9: Facteur de portance pressiométrique pour les semelles s en fonction de leur profondeur relative D_e/B . Les catégories conventionnelles de sols sont également données dans [MEL 93]

(a) - Semelle filante (b) - semelle carrée

1.5.2 Condition de tassements différentiels admissibles

On sait que Terzaghi a été parmi les premiers à insister sur la nécessité de concevoir les fondations de bâtiments sur semelles superficielles sur la base d'un critère de tassement différentiel admissible entre semelles voisines. Pour ces bâtiments, la règle de base était que le tassement de la semelle la plus chargée ne devait pas dépasser 25 mm. Pour les ouvrages d'art, les efforts secondaires dus aux dénivelées d'appui définissent les tassements acceptables. Pour faire l'estimation de ces tassements, Ménard disposait d'un module pressiométrique, qui comme nous l'avons vu, est obtenu à partir d'un module de cisaillement G selon la formule (2).

Ménard aurait pu utiliser soit la théorie de Boussinesq pour calculer les contraintes soit la théorie de la consolidation unidimensionnelle de Terzaghi (dont le chemin de contrainte est très différent de celui d'un essai pressiométrique) mais ces 2 théories ont des limitations :

- la première ne s'applique qu'à des chargements uniformes et l'utilisateur suppose que le module E est constant.

- la deuxième ne concerne que des sols sur lesquels il est rare que l'on construise directement des bâtiments.

Ménard a donc préféré proposer une nouvelle méthode en décomposant le tassement d'un sol sous une fondation rigide peu profonde en deux termes [MEN 61], en négligeant le tassement proprement élastique basé sur E_e (paragraphe IV.1.1. et la figure 6):

- un tassement provoqué par le tenseur sphérique (ou isotrope) du champ des contraintes induites dans le sol, c'est à dire une variation de volume,
- un tassement provoqué par les tenseurs déviatoires du même champ de contraintes, c'est à dire un ensemble de déformations angulaires.

Cette façon de faire lui permettait :

d'introduire un module de Young :

$$E = E_M/\alpha \quad (7)$$

où α est un coefficient de structure déterminé par l'expérience, variable entre $\frac{1}{4}$ et 1 selon le type de sol (Tableau 1.3).

d'utiliser directement le module G_M déduit directement de E_M avec $\nu = 0,33$ pour établir le terme déviatoire

- de tenir compte des variations de G et E en fonction de l'amplitude des déformations.

Là non plus, Ménard n'a pas été le seul à tenter cette démarche [SUK 63a-b], mais c'est le seul qui la systématisera. Pour Ménard, les formules proposées correspondent à un tassement à 10 ans, tant que les contraintes restent dans le domaine micro-plastique des déformations. Au-delà, un facteur hyperbolique correctif a été proposé comme on le verra plus loin. Enfin, ces formules ne sont qu'aléatoires lorsque le sol étudié n'a pas atteint son seuil d'auto-portance [MEN 75].

La formule générale du tassement w moyen pour une semelle rigide sur un sol relativement homogène en profondeur s'écrit [MEL 93] :

$$w = \frac{2}{9E_M} q B_o \left(\lambda_d \frac{B}{B_o} \right)^\alpha + \frac{\alpha}{9E_M} q \lambda_c B \quad (8)$$

E_M est le module pressiométrique éventuellement pondéré

q est le complément de contrainte verticale moyenne apportée par la semelle à la contrainte préexistante sur le sol, si celle-ci n'est pas annulée par les travaux

B_o est la largeur de référence (égale à 0,6m avec les sondes traditionnelles)

B est la largeur de la semelle

λ_d et λ_c sont des coefficients de forme de la semelle donnés dans le tableau 14

α est le coefficient de structure utilisé dans la formule (7)

Lorsque le sol est hétérogène, E_M est remplacé par une valeur équivalente, pondérée à partir des valeurs de E_M mesurées en fonction de la profondeur.

Il est à noter que le coefficient de Poisson n'est pas apparent, car dans le terme du tassement d'origine déviatoire fonction de G (1^{er} terme de la formule) il disparaît, et dans le terme de tassement d'origine sphérique la formule (7) intègre $\nu = 0.33$.

Des études critiques théoriques de la formule (8) ont déjà été faites [COR 81] puisqu'elle ne correspond pas à celle de la théorie de l'élasticité linéaire et de ses hypothèses. La stricte application de cette formule qui intègre la réponse non linéaire aux sollicitations (E variable) et le fait que la semelle est rigide conduit à un excellent accord entre les valeurs prévues et les valeurs observées des tassements [BAK 93].

Il est remarquable qu'à l'issue du concours organisé lors du colloque international Settlement' 94 à College Station (Texas) [BRI 94] sur la prévision du tassement de 4 semelles sur un sable en place, l'équipe gagnante fut celle qui avait utilisé la méthode pressiométrique décrite ici [TAN 94]. A la suite de cette constatation des études expérimentales ont été poursuivies dans le but de comparer directement la courbe pressiométrique Ménard et la courbe de tassement [BRI 99, BRI 03], y compris dans le cas de charges excentrées, de charges inclinées et de fondations en bord de talus, en utilisant, entre autres, la banque de données du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées.

Tableau 1. 3 Valeur du coefficient de structure α selon les types de sol

Type de matériau	Tourbe		Argile		Limon		Sable		Sable et graviers	
	E/p_f	α	E/p_f	α	E/p_f	α	E/p_f	α	E/p_f	α
Surconsolidé			> 16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalement Consolidé		1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Altéré et Remanié			7-9	1/2		1/2		1/3		1/4

Tableau 1. 4 Valeurs des coefficients α

L/B	1		2	3	5	20
	Cercle	Carré				
λ_c	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
λ_d	1	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

Lorsque le sol est constitué d'un bicouche (ou d'un multicouche) dont l'une des couches n'est pas surconsolidée, Ménard a recommandé d'utiliser une formule du type consolidation unidimensionnelle pour l'estimation du tassement de la couche non surconsolidée provoqué par une fondation flexible (contraintes uniformes)

$$w = D \int_z^{z+D} \frac{\alpha(z) \cdot \beta(F) \cdot p(z)}{E_M(z)} dz \quad (9)$$

D est l'épaisseur de la couche non surconsolidée,

z la cote du toit de la couche,

$E_M(z)$ est le module pressiométrique à la profondeur z

$\alpha(z)$ est le coefficient rhéologique du sol

$\beta(F)$ est un facteur correctif hyperbolique destiné à tenir compte de l'augmentation des déformations au voisinage de la rupture où F est le coefficient de sécurité de la fondation vis à vis de la rupture de la couche de sol non surconsolidé : $F = q_r/q$

$$-\beta = 0,66 \frac{F}{F-1} \quad \text{si } F \leq 3$$

$$(\beta \rightarrow \infty \text{ quand } F \rightarrow 1)$$

$$-\beta = 1 \quad \text{si } F \geq 3$$

Lorsque le sol est sous-consolidé, il est toujours susceptible de tasser sous son propre poids, et, à fortiori, sous des surcharges, en fonction des causes extérieures. Si ce phénomène est bien connu pour les argiles, il est moins connu pour les sables de faible indice de densité relative : sous l'effet d'ébranlements provoqués par une circulation lourde, le battage de pieux ou une seime, le tassement des sables lâches reprend [TER 48, GAM 97]. Ainsi Ménard a défini un seuil d'auto-portance en fonction de p_r pour chaque type de sol, en deçà duquel, le tassement calculé à l'aide des formules (8) et (9) n'est qu'une valeur par défaut. Pour une formation dont la profondeur est inférieure à 10m, la pression limite caractérisant le seuil d'auto-portance varie de 300 kPa pour les argiles à 600 kPa pour les sables.

A noter que pour évaluer l'évolution du tassement en fonction du temps, on peut utiliser les résultats des essais au Diflupress L.D. à l'aide d'un programme de calcul établi dans l'hypothèse de petites déformations planes sur la base de la méthode des éléments finis appliquée à un matériau visco-élastique non linéaire [BAH 95]. Les prévisions comparées aux observations ont été satisfaisantes.

1.5.3 Résolution d'autres problèmes

Ménard, avec ses collègues, a donné des règles sur les problèmes suivants :

Tassement des pieux : Gambin [GAM 63], Cassan [CAS 66] puis Frank et Zhao [FRA 82] ont successivement montré qu'une méthode basée sur les principes de Ménard permet d'estimer très correctement le tassement des pieux.

Dimensionnement des puits de fondation et des pieux sollicités horizontalement, pour lesquels on peut faire une certaine assimilation entre le champ de contraintes développé par ces pieux dans le sol et celui qui y est créé par le pressiomètre, [MEN 62, MEL 93].

Dimensionnement des ouvrages de soutènement pour lesquels on peut définir un coefficient de réaction en comparant la déformation du sol en butée devant l'écran et le tassement d'une fondation, par une rotation de 90° de la direction des efforts et des déplacements [MEN 64, LCP 85].

1.6 Conclusion générale

En France, le pressiomètre, sous l'impulsion de son inventeur Louis Ménard, a été à l'origine d'une conception nouvelle de la Géotechnique tant sur le plan scientifique [MEN 61] que sur le plan du Génie Civil [MEN 63].

L'appareil a l'énorme avantage de réaliser un essai de chargement sur le sol et de mesurer les déformations relatives depuis 10^{-3} jusqu'à la rupture. L'essai peut donc livrer au moins 2 paramètres, l'un de déformation, l'autre de rupture.

Par la promotion de règles de dimensionnement des fondations basées sur l'emploi direct des paramètres semi-empiriques obtenus par une exploitation simple des mesures obtenues, impliquant une comparaison entre le comportement du sol pendant l'essai et celui des fondations, Louis Ménard a ouvert une nouvelle voie dans laquelle les utilisateurs des autres appareils d'essai in-situ, tel le pénétromètre statique, ce sont ensuite engouffrés [ASC 93].

Enfin, le module de déformation mesuré correspondant aux déformations relatives que manifestent les ouvrages de Génie Civil, on peut ajouter foi à ce que Louis Ménard n'aurait pu mettre au point ses méthodes de densification profonde des sols sableux sans l'assistance du pressiomètre [GAM 95].

Chapitre 2

Description du site et étude expérimentale

2.1. Introduction

Ce chapitre présente d'abord la description de site d'étude ainsi que le positionnement des forages réalisés dans le cadre de ce projet de fin d'études. Dans un second temps une étude expérimentale concernant l'identification physique, chimique et géotechnique a été présentée.

Une grande partie de ce chapitre a été consacrée au déroulement de l'essai pressiométrique en détail suivant la norme en vigueur et le dépouillement et la présentation des résultats des essais effectuée. Le chapitre se termine par une conclusion relative aux différents points évoqués.

2.2. Présentation de la zone d'étude

2.2.1. Contexte géographique

La présente étude intéresse l'étude de stabilité des talus des blocs des 2000 places pédagogique de l'école préparatoire – pôle de Chetouane-Tlemcen.

Ces talus sont issus des terrassements en grande masse pour l'aplatissage de l'assiette des blocs selon leurs niveaux altimétriques sur lesquels réalisés. L'assiette affectée par le glissement de terrain et qui fait l'objet de la présente étude se trouve dans la partie Nord-Ouest de la nouvelle technopole d'université de Tlemcen-Chetouane (Figure 2. 1).



a)



b)

Figure 2. 1 a) Vue de la situation du terrain sur Google-Earth, b) photo réelle de la zone d'étude des talus entourent les blocs des 2000 places pédagogique.

Le territoire de la commune de Chetouane est situé au centre de la wilaya de Tlemcen, à environ 5 km au nord-est du centre-ville de Tlemcen. La commune représente la partie nord de l'agglomération de Tlemcen. La (Figure 2.2) montre la localisation géographique de la zone d'étude et site expérimental.

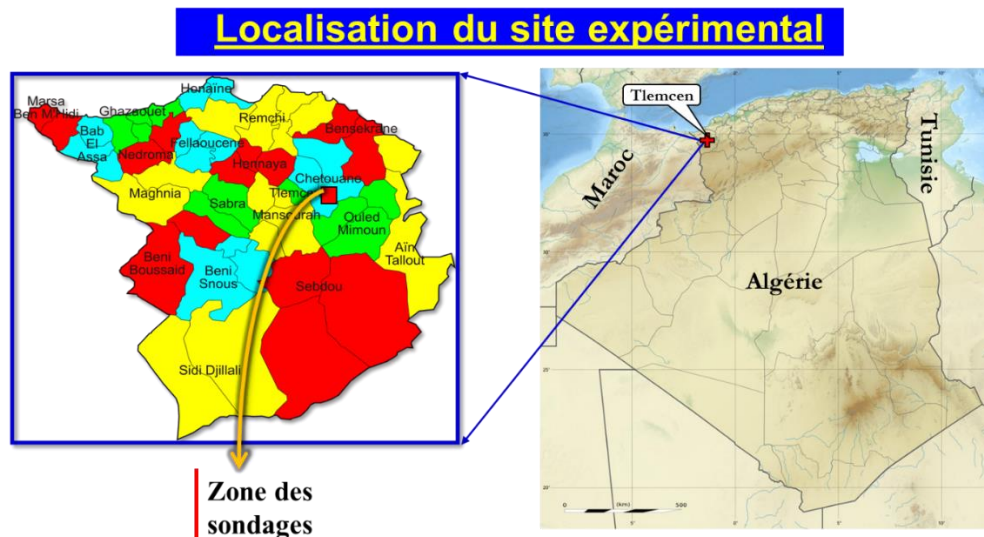


Figure 2. 2 Situation géographique de la zone d'étude.

2.2.2. Aperçu géologique de la zone d'étude

La région de Tlemcen fait partie de l'Atlas Tellien, comprise entre les monts des Traras au Nord et les monts de Tlemcen au Sud. Elle est marquée par des terrains sédimentaires allant du Jurassique de l'ère Mésozoïque (représenté par des calcaires et des dolomies jusqu'au Quaternaire, représenté par des alluvions).

Le présent site se trouve à la limite Nord-ouest de la commune de Chetouane qui fait partie d'une région à topographie en pente parcourue par des chaâbas et oueds (Oued Sekak) à sens d'écoulement le plus souvent vers le Nord. Ces cours d'eau ont entaillé un substratum meuble formé essentiellement de marne.

Sur le plan géologique, le site est constitué par une importante formation marneuse verdâtre à grisâtre schisteuse, attribuée stratigraphiquement au Miocène de l'ère Cénozoïque, repassant par endroit sur des calcaires du Jurassique, constituant ainsi une unité géologique entre les ères secondaires et tertiaires dans cette zone (Figure 2. 3).



Figure 2. 3 Extrait de la carte géologique de Tlemcen (Doumergue, 1924).

2.2.3. Contexte sismique

Selon la carte de zonage sismique de l'ALGERIE schématisée sur la (Figure 2. 4), établi par le centre national de recherches Appliquées en Génie Parasismique, la région de Tlemcen, s'intègre dans une zone d'activité sismique faible (zone I), ou les dégâts se résument le plus souvent à des fissures et lézardes. Jusqu'à l'heure actuelle, aucune secousse sismique de forte magnitude dans cette région n'a été enregistrée.

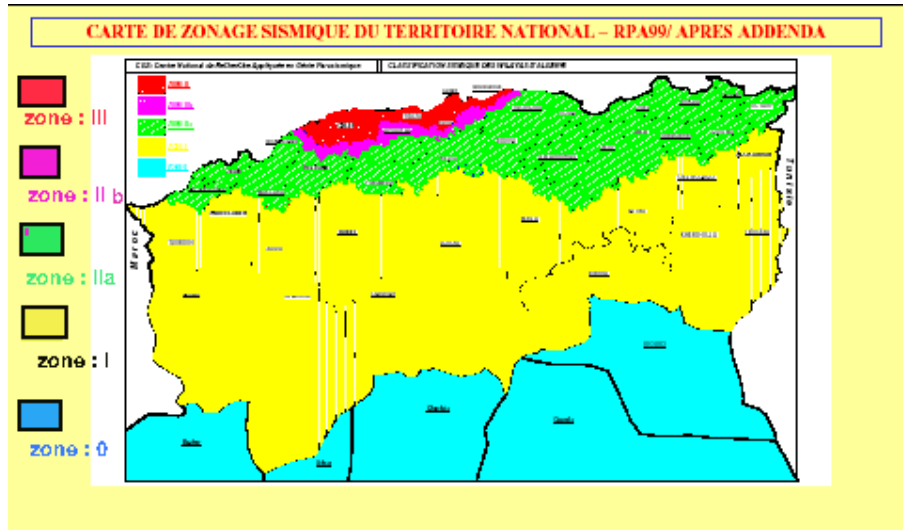


Figure 2. 4 Carte de zonage sismique du territoire nationale (d'après RPA, 1999)

2.3. Campagnes des reconnaissances mis en œuvre et planning expérimental

Le programme de reconnaissance géotechnique réalisé en place pour l'étude du glissement en question a comporté les investigations et essais de laboratoire suivants :

- a) La réalisation de trois sondages carottés implantés au niveau de la voie supérieure et inférieure en alignement parallèle au talus qui vient en bordure des blocs des 2000 places pédagogique, tels qu'ils suivent sondage noté SC1 de 15.0 mètres de profondeur, sondage noté SC2 de 20.0 mètres de profondeur et SC3 de 10 mètres de profondeur. Ces trois sondages ont été réalisés en forage rotatif avec carottier de diamètre de 101 mm y compris le prélèvement d'échantillons intacts et paraffinés pour les essais et analyses en laboratoire. (Figure 2. 5)



Figure 2. 5 Photos des caisses à carottes pour la réalisation des essais de laboratoire.

- b) La réalisation de deux sondages pressiométriques notés SP1 et SP2 implantés respectivement en niveau supérieur et inférieur du talus et parallèlement aux deux sondages SC2 et SC3. Ces deux sondages notés SP1 et SP2 ont été réalisés en forage rotatif de diamètre 76 mm pour la réalisation des essais pressiométriques prescrits pour la mesure des caractéristiques mécaniques des formations du terrain existantes en sous-sol. On note dans ce sens qu'il a été réalisé 04 essais pressiométriques en SP1 et 14 essais pressiométriques en SP2.

La fréquence de mesures dans le sondage SP1 égale 02 mètre jusqu'à atteindre la profondeur 9 m, par contre dans le sondage SP2 égale 01 mètre jusqu'à atteindre la profondeur 15 m (figure 2. 6).

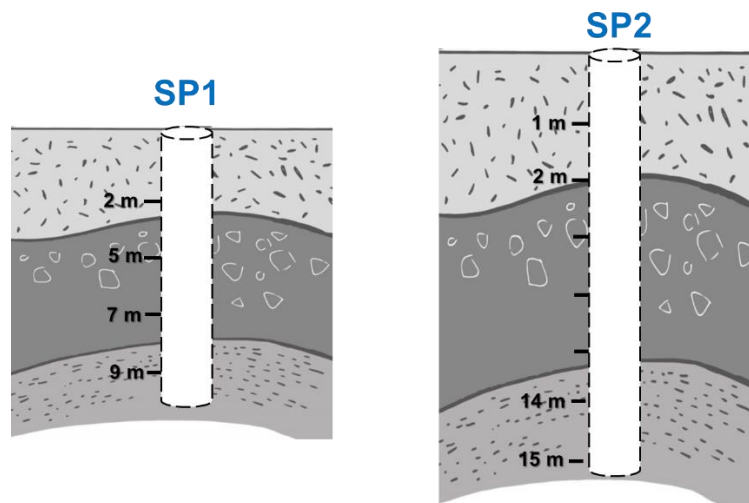


Figure 2. 6 Fréquence de mesure dans chaque sondage pressiométrique.

L'implantation des différents sondages pressiométriques et carottés est reportée sur la figure suivante.

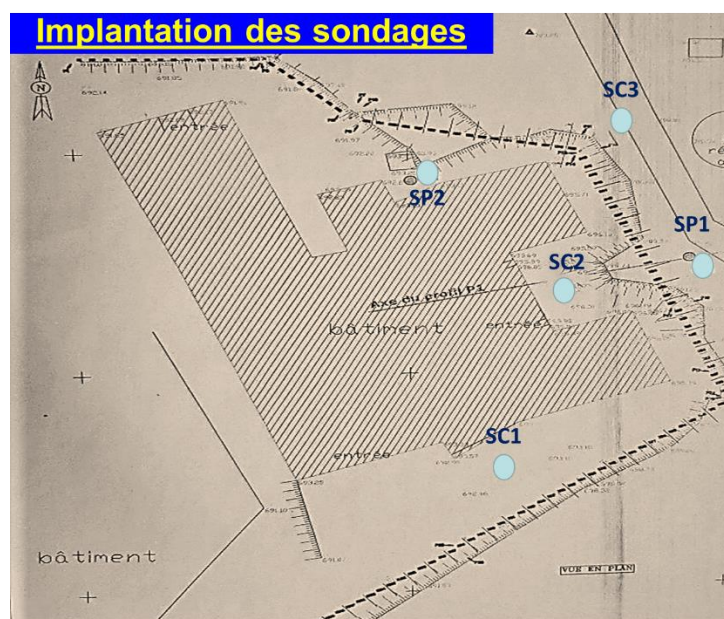


Figure 2. 7 Plan d'implantation des sondages carottés et pressiométriques.

2.4. Essais d'identification des sols étudiés

L'identification préliminaire des sols rencontrés sur le site a comporté les points suivants :

- ❖ Détermination des courbes granulométriques ;
- ❖ Détermination des teneurs en eau w , des masses volumiques ρ_s , ρ et ρ_d ;
- ❖ Limites de plasticité et de liquidité w_P et w_L , indice de plasticité I_P .

Nous avons réalisé l'ensemble des essais d'identification au niveau de laboratoire LTPO de Tlemcen. La teneur en eau pondérale des matériaux a été déterminée par la méthode de l'étuvage (NF P 94-050). Pour déterminer la masse volumique des particules solides des sols, nous avons utilisé la méthode du pycnomètre à eau (NF P 94-054). Par ailleurs, nous avons déterminé la masse volumique des sols par la méthode de l'immersion dans l'eau après paraffinage (NF P 94-053). La masse volumique sèche ρ_d , est obtenus à partir des formules classiques reliant les différents paramètres. Finalement, les limites d'Atterberg (limite de liquidité à la coupelle w_L et limite de plasticité au rouleau) sont déterminées selon la norme NF P 94-051. L'identification et la classification des sols rencontrés sera discutée dans les paragraphes suivantes.

2.4.1. Granulométrie selon la norme NF P 94-056 et NF P 94-057

L'analyse granulométrique permet de déterminer la répartition des grains suivant leur dimension. Les résultats sont reportés granulométriquement permettant d'obtenir les courbes granulométriques des matériaux, et qui se présentent par deux phénomènes :

- ❖ Analyse granulométrique par tamisage : pour les gains $> 0,08$ mm (Figure 3.8).
- ❖ Analyse granulométrique par sédimentométrie : pour les particules inférieures à $0,08$ mm et passants sont plus de 20% (Figure 2. 9).



Figure 2. 8 Dispositif d'essai granulométrie par tamisage

Lorsque la dimension des particules est inférieure à $80\mu\text{m}$ le tamisage n'est plus possible. On a recours alors à la sédimentométrie. Cette méthode est basée sur la loi de Stokes qui exprime la vitesse de décantation d'une particule sphérique dans un liquide visqueux en fonction du diamètre de la particule. La méthode consiste à mesurer à différentes époques, à l'aide d'un

densimètre, la densité d'une suspension de sol, on opère sur une suspension initialement homogène, la décantation détruit cette homogénéité et à un instant donné t après le début de l'expérience la densité de la suspension n'est plus constante, elle varie avec la profondeur, on mesure donc avec le densimètre une densité moyenne à la profondeur H du centre de gravité du bulbe du densimètre, les particules qui à l'instant initial étaient en surface et qui à l'instant t sont à la profondeur H .



Figure 2. 9 Dispositif de l'essai granulométrie par sédimentométrie.

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentométrie des échantillons prélevés des sondages carottés SC1, SC2 et SC3, sont représentés dans les graphes ci-dessous :

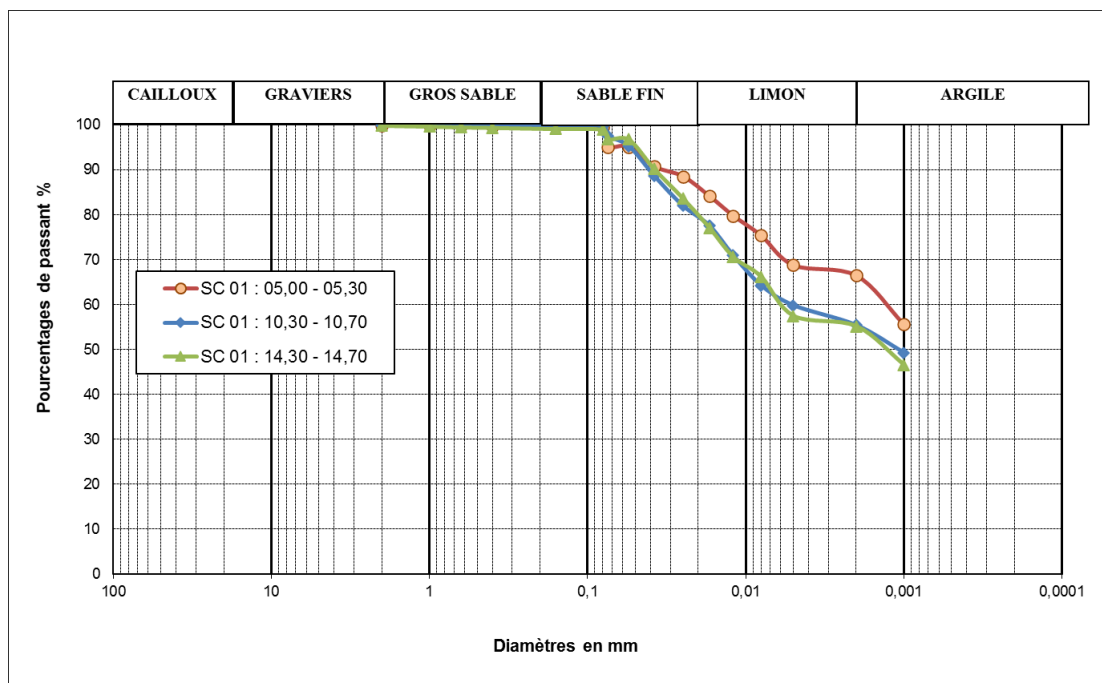


Figure 2. 10 Courbes granulométriques des sols SC1.

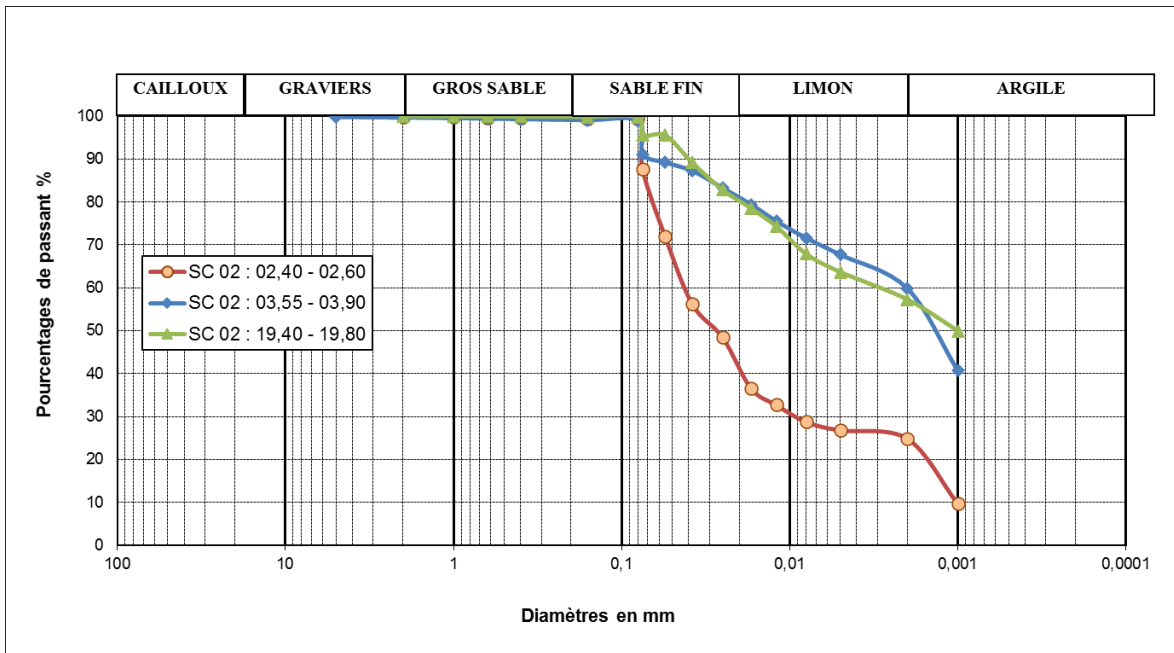


Figure 2. 11 Courbes granulométriques des sols SC2.

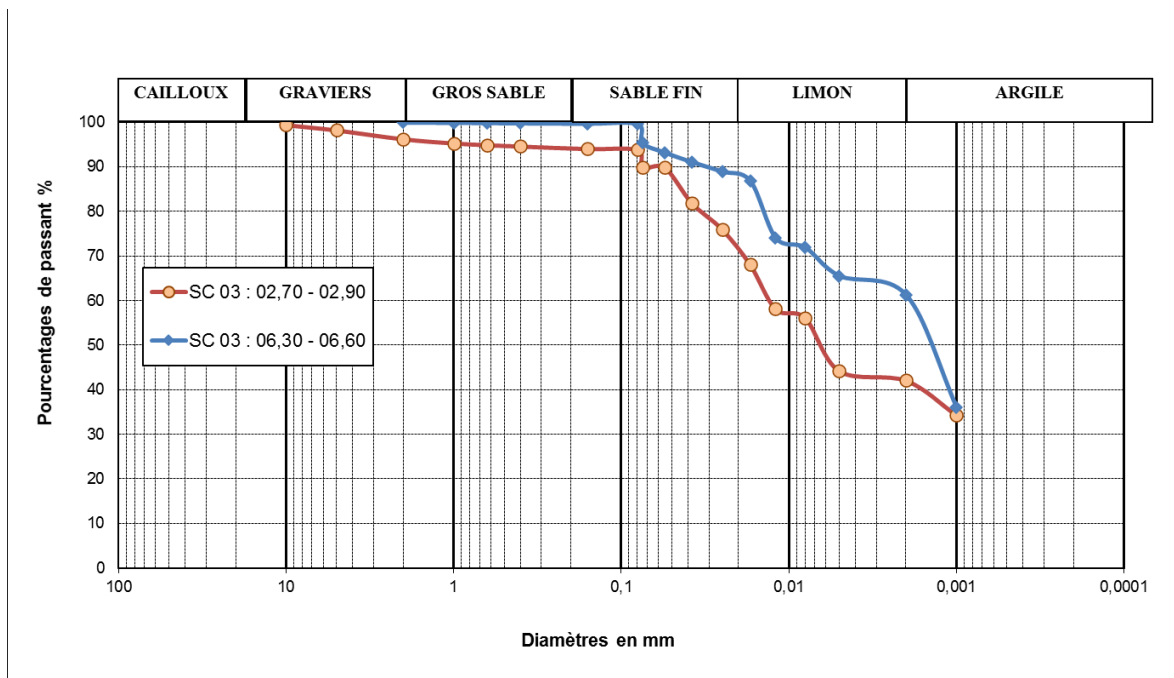


Figure 2. 12 Courbes granulométriques des sols SC3

A partir des courbes granulométriques obtenus et ci-avant reportées, des trois sondages carottés réalisés au sein de l'emprise du talus ont conclu que la granulométrie s'agit d'une formation à texture argileuse limono-sableuse faiblement graveleuse.

2.4.2. Détermination des limites d'Atterberg selon la norme NF P94-051

En fonction de la teneur en eau, un sol remanié se présente suivant des consistances variables pour lesquelles on peut distinguer quatre états : liquide, plastique, solide. En réalité le sol passe graduellement d'un état à l'autre et les frontières respectives ne sont définies que

conventionnellement par les limites d'Atterberg. Les limites d'Atterberg sont donc des teneurs en eau. Pour les obtenir, les essais sont effectués sur les fractions du matériau passant au tamis de 0,42 mm.

La limite de liquidité w_L entre l'état liquide et l'état plastique. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande (Figure 2. 13a), par contre la limite de plasticité w_P entre l'état plastique et l'état solide. Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau au-dessous de laquelle impossible de confectionner avec le sol des rouleaux de 3 mm de diamètre et de 10 mm de longueur sans qu'ils se rompent (Figure 2. 13b).



a)



b)

Figure 2. 13 a) Coupelle de Casagrande et b) limite de plasticité au rouleau.

L'ensemble des valeurs enregistrées aux terme des essais réalisés sur des échantillons prélevés sont récapitulés dans le (Tableau 2. 1).

Tableau 2. 1 Synthèse des paramètres physiques obtenus pour les sols étudiés

Référence Sondage	Profondeur (m)	Paramètres physiques				Limite d'Atterberg		Analyse granulométrique			Cisaillement à la boîte		Essai chimique		
		W (%)	γ_d (t/m ³)	γ_h (t/m ³)	S _r (%)	W _L (%)	I _p (%)	< 2mm	< 80 μ	< 2 μ (%)	Cu (bars)	ϕ_u (°)	CaCo3 (%)	SO4	CL (%)
SC 01	05,00- 05,30	29	1,38	1,79	85	69	32	99,97	99,53		0,08	13,20	24,00	Nul	0,21
SC 01	10,30- 10,70	23	1,53	1,88	84	72	52	99,98	99,71		0,04	11,70			
SC 01	14,30- 14,70	27	1,47	1,86	89	66	33	99,87	98,97		0,31	12,08	34,00	Nul	0,22
SC 02	02,40- 02,60	25	1,45	1,81	80	71	40	99,82	99,33		0,16	15,06			
SC 02	03,55- 03,90	26	1,38	1,74	75	71	41	99,60	98,90		0,06	13,20			
SC 02	19,40- 19,80	11	1,65	1,83	48	73	39	99,99	99,77		0,04	16,88			
SC 03	02,70- 02,90	21	1,43	1,72	64	56	32	96,26	93,82		0,61	11,31			
SC 03	06,30- 06,60	26	1,45	1,83	83	69	32	99,98	99,63		0,04	9,40	77,00	Nul	0,19

2.5. Procédure de l'essai pressiométrique Ménard standard

2.5.1. Développement de la norme pressiométrique

En 1971 le ministère de l'équipement française, après quelques adaptations de détail, les a codifiées dans un document intitulé « Modes opératoires des laboratoires des ponts et chaussées- essai pressiométrique Ménard ». Le document s'est imposé pour tous les projets de construction relevant de ce ministère puis, peu à peu s'est généralisé à l'ensemble des études géotechnique des secteurs public et privé, et cela jusqu'au mois de juillet 1991 date d'homologation de la norme AFNOR référencée NFP 94.110 – Essai pressiométrique Ménard.

A partir du 5 janvier 2000, elle a été annulée et remplacée par une nouvelle norme référencée : NF P94.110-1 : Essai pressiométrique Ménard partie 1 (sans cycle). Cette nouvelle norme impose un système d'enregistrement incorporé au contrôleur pression volume ou rapporté sur celui-ci et un dispositif de mesurage permettant la visualisation et l'enregistrement des paramètres mesurés.

Par ailleurs, en décembre 2000 l'AFNOR a publié une norme expérimentale référencée : NFP 94.110-2 : essai pressiométrique Ménard partie 2 (avec cycle). Cette norme définit le mode opératoire d'un essai qui comporte une phase de déchargement et une de rechargement et qui est ensuite poursuivi normalement jusqu'à la rupture.

Aujourd'hui c'est L'ISO 22476-4 qui répond aux exigences d'un essai au pressiomètre Ménard, en tant que partie de la reconnaissance et des essais géotechniques. Elle décrit la procédure pour conduire un essai au pressiomètre Ménard dans des sols naturels, dans des couches traitées ou non traitées et dans des roches fragiles, sur terre ou en milieu maritime. Les résultats des essais au pressiomètre de l'ISO 22476 permettent une détermination quantitative de la résistance du sol et des paramètres de déformation.

2.5.2. Principe de l'essai PMT standard

La sonde est fixée à la profondeur de l'essai en utilisant la méthode qui va produire le moins de perturbations au matériel d'essai. Une fois en place, la sonde est soumise à des incréments égaux de pression croissante. Les changements de volume de la sonde sont enregistrés à 15, 30 et 60 secondes à partir du moment où chaque étape de pression est atteinte. Le programme de chargement doit être du type de celui représenté sur la figure 3.14 en conformité de la norme Européenne en vigueur NF EN ISO 22476-4 (AFNOR, 2015).

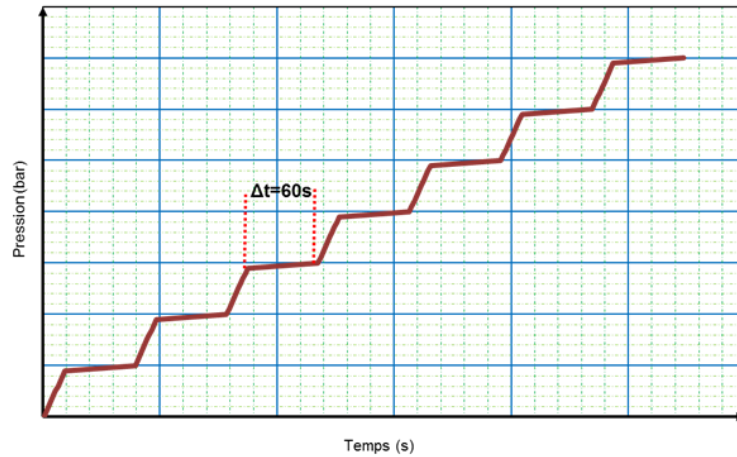


Figure 2. 14 Programme de chargement selon la norme NF EN ISO 22476-4

Pendant la réalisation de l'essai en augmentant la pression par paliers de pression égaux, les données de volume et de pression correspondant de la cellule de mesure sont notées pour construire la courbe pressiométrique ou courbe d'expansion (Figure 3.15). En abscisse est indiquée la pression et en ordonnée la variation de volume.

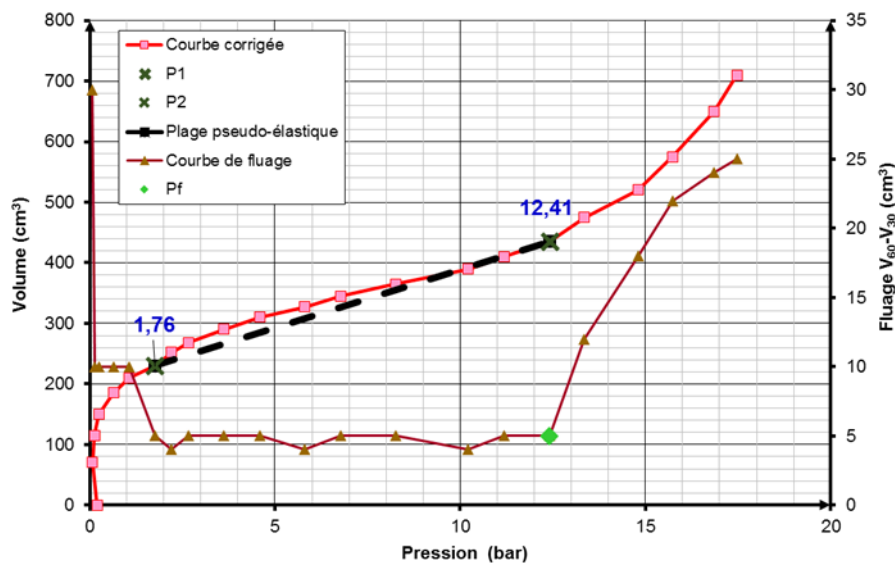


Figure 2. 15 Courbe pressiométrique Ménard type - exemple pour calculer les paramètres pressiométriques (Aissaoui, 2021).

L'analyse de la figure 2.15 permet de déterminer trois phases distinctes de l'essai. La première phase correspond à une remise en contact entre la sonde et la paroi du forage. La deuxième correspond à la déstructuration progressive du massif qui se rapproche d'une déformation linéaire qui permet de ce fait le calcul du module pressiométrique Ménard (E_M), dans un intervalle délimité par deux, valeurs particulières de pression (p_1 et p_2) correspondant sensiblement, pour la première, à la pression horizontale des terres au repos σ_{h0} et pour la seconde, à la pression de fluage pressiométrique p_f . Au-delà du point de fluage, la courbe tend rapidement vers une asymptote donnant la pression limite de rupture du sol (p).

2.5.3. Équipement de l'essai PMT

L'appareillage du pressiomètre se compose des éléments suivants :

2.5.3.1 La sonde pressiométrique

La sonde pressiométrique est un cylindre métallique creux fileté aux deux extrémités et destiné à recevoir et sceller la membrane en caoutchouc interne et la gaine en caoutchouc ou métallique externe. La gaine de protection extérieure se monte de manière concentrique sur la membrane en caoutchouc interne située au centre. La gaine de protection s'étend sur la longueur totale de la sonde. C'est cette enveloppe qui est en contact direct avec les parois des trous de forage lorsque la sonde est sous pression.

La gaine métallique (lanterné) présente des bandes (lames) d'acier longitudinales fixées à sa surface extérieure. Les bandes se chevauchent de telle sorte que lorsqu'elles sont gonflées, l'augmentation de la surface de la gaine reste protégée. La gaine métallique est la plus fréquemment utilisée. Dans certains sols, selon les conditions, les essais pressiométriques sont exécutés avec des gaines en caoutchouc, gaines toilées textiles, gaines toilées métalliques, gaines métalliques/ lanternées) comme est montré dans la figure suivante.

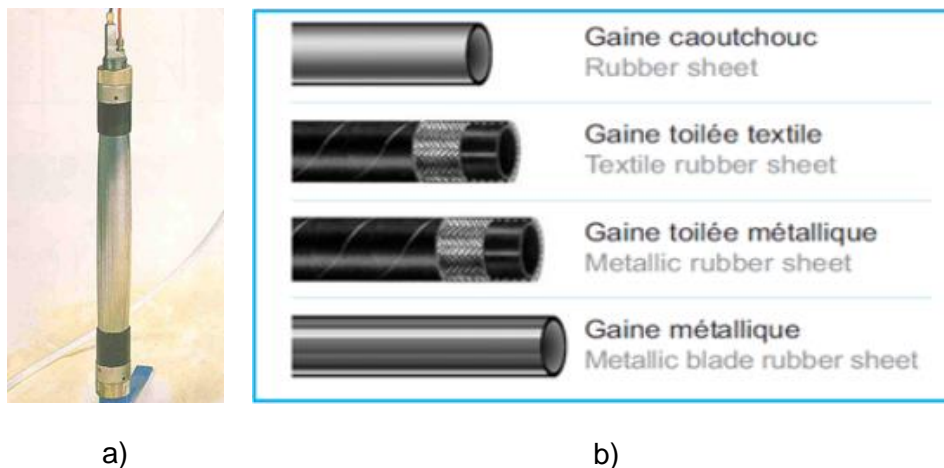


Figure 2. 16 a) Sonde pressiométrique tri cellulaire b) types des gaines de protection.

La sonde à gaine souple présente sous la forme de trois cellules cylindriques à section circulaire et de même axe, agissant simultanément sur la paroi du forage pendant l'essai elle comprend :

- ❖ Une cellule centrale de mesure, de diamètre extérieur d_s et de longueur l_s capable de se déformer radialement dans un forage de diamètre d_t et d'appliquer une pression uniforme sur le sol. Elle est dilatée par injection d'un liquide supposé incompressible (eau additionnée éventuellement d'un produit anti gel) ;
- ❖ Deux cellules de garde de diamètres extérieurs d_g et de longueur l_g situées de part et d'autre de la cellule centrale et destinées à transmettre au sol une pression voisine de celle de la cellule centrale. Elles sont remplies par un gaz (azote).

Le Tableau 2.2 montre les caractéristiques géométriques de la sonde pressiométrique.

Tableau 2. 2 Caractéristique géométrique de la sonde pressiométrique

			référence	unité	valeur	tolérance
Sonde à gaine souple	Cellule centrale	Longueur	l_s	mm	210	+5 0
		Diamètre extérieur	d_s	mm	58	+ 2 - 2
	Cellule de garde	Longueur	l_g	mm	120	+15 -15
		Diamètre extérieur	d_g	mm	58	+ 2 - 2

2.5.3.2 Contrôleur pression-volume CPV

L'unité de commande est l'interface de l'opérateur avec la sonde. Elle est utilisée pour régler et surveiller les pressions et les volumes pendant les calibrages et l'essai. La commande, manomètre et les vannes nécessaires pour exécuter l'essai sont situés sur le panneau. L'eau fournie à la cellule de mesure centrale est contenue dans un cylindre sous haute pression situé dans l'unité de commande. Variations de volume pendant l'essai sont lues sur un tube-apparent (volumètre).



Figure 2. 17 Le contrôleur pression-volume CPV

2.5.3.3 Tubulure

Les deux tubes de connexion de l'unité de commande à la sonde sont disposés coaxialement (Figure 2.18a). La tubulure est un tube à haute pression à gaine renforcée Tecalan

(haute pression dont la capacité de travail > 8 MPa). La tubulure (co-axial) interne livre de l'eau sous pression à la cellule de mesure central. Le gaz sous pression est délivré dans l'anneau de l'ensemble de tubulure co-axiale vers les cellules de garde. La pression différentielle maximale entre la tubulure d'eau et du gaz est de 100 kPa pour la basse pression et 400 kPa pour l'ensemble de tubulure à haute pression.



a)



b)

Figure 2. 18 a) Tubulures et b) bouteille d'azote (gaz comprimé)

2.5.3.4 Bouteille de gaz (Azote)

La bouteille d'air comprimé (Azote) permet de fournir du gaz à la sonde pressiométrique afin de dilater cette dernière pour le contact avec le sol (Figure 2.18b).

2.5.4. Préparation de la sonde pressiométrique

La préparation de la sonde pressiométrique commence par un essai pressiométrique à vide pour que l'eau stagné dans la sonde pressiométrique s'échappe jusqu'à s'assurer qu'il n'y a plus de bulles d'air ensuite on ferme le robinet de contrôle de pression.

2.5.4.1 Essai d'expansion propre de l'appareillage

Comme représenté dans la Figure 2.19, la sonde est introduite dans le tube destiné à l'essai d'expansion propre de l'appareillage, mise en pression par pas de 100 kPa (ou 1 bar) jusqu'à obtenir le contact avec le tube, puis par paliers de 500 kPa (ou 5 bar) pour les sondes pouvant atteindre au moins 5MPa (50 bar).

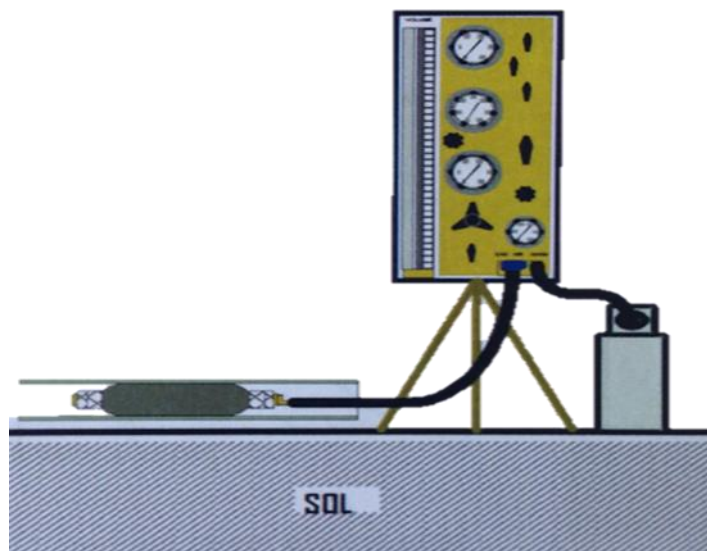


Figure 2. 19 Essai d'expansion propre de l'appareillage

Lors de cette procédure il est possible de trouver le volume de contact V_c par exploitation de la courbe d'expansion comme la (Figure 2-20) suivant. V_c est l'ordonnée à l'origine de la droite ajustée sur les points représentatifs de l'essai au-delà du contact entre la sonde et le tube. Avec cette valeur se détermine le volume de la cellule centrale de la sonde à partir de la formule suivante :

$$V_s = 0,25\pi l_s d_i^2 - V_c \quad (2.1)$$

Soit l_s la longueur de cellule centrale (210 mm), d_i le diamètre intérieur du tube utilisé pour l'essai (80 mm).

Le coefficient de compressibilité de l'appareillage ayant pour valeur la pente de la droite ajustée sur la partie linéaire de la courbe d'expansion :

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (2.2)$$

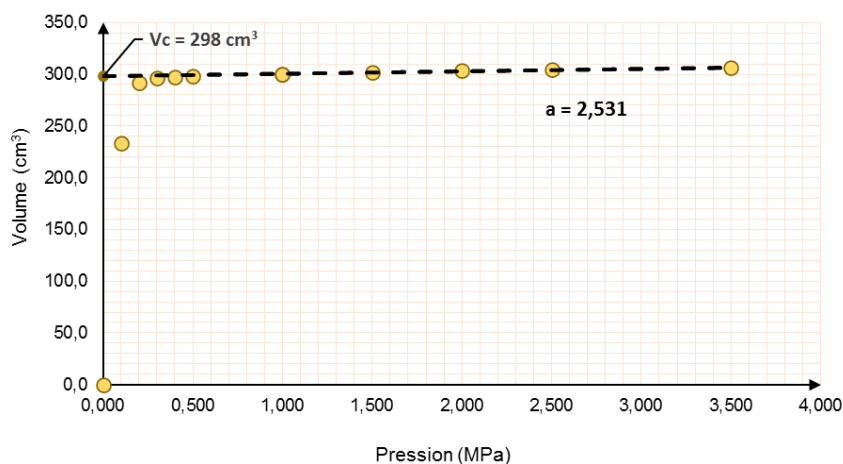


Figure 2. 20 Résultats d'essai d'expansion propre de l'appareillage

2.5.4.2 Résistance propre de la membrane

La sonde est placée à proximité du CPV (Figure 2.21), puis la membrane est mise en pression par pas de pression Δp de 10 kPa. Chaque pression est maintenue pendant une durée de 60 s. Le volume du liquide V_{60} injecté en fin de palier est mesuré afin de tracer la courbe $V_{60} = f(p)$.

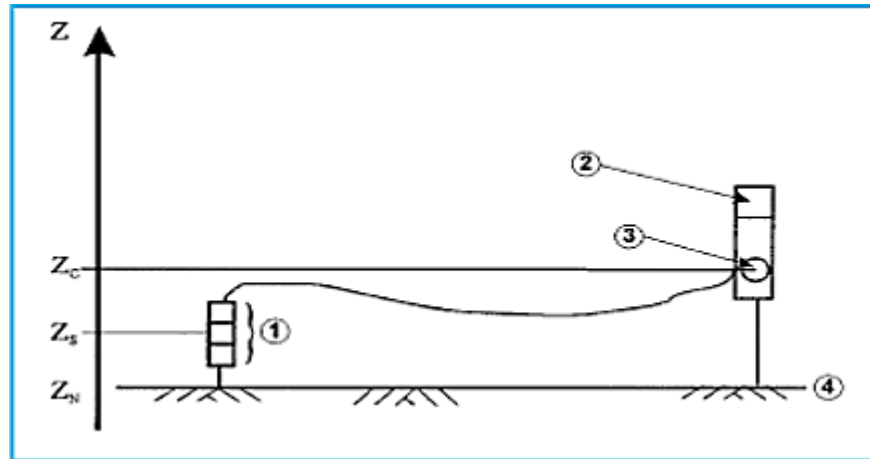


Figure 2. 21 Repérage de la sonde et du conditionneur de pression lors de l'essai de résistance propre de la sonde pressiométrique

La (Figure 2.22) représente la courbe de la résistance propre de la membrane obtenue, ainsi que l'équation d'étalonnage.

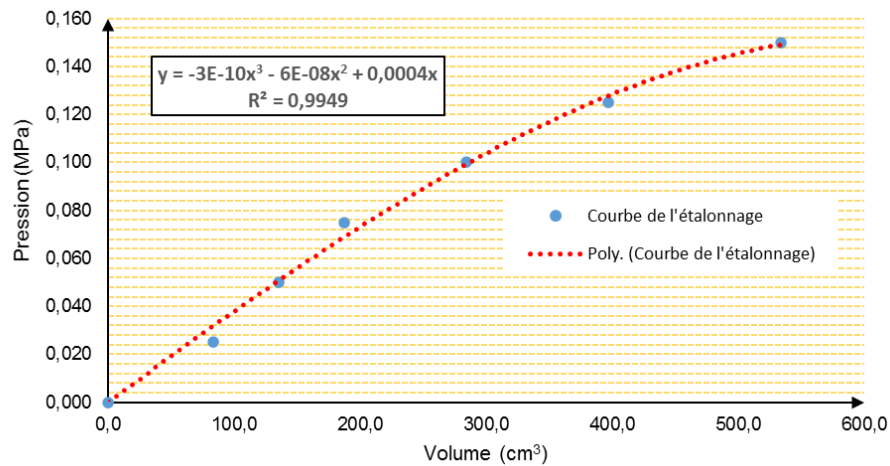


Figure 2. 22 Courbe de résistance propre de la membrane obtenue

2.5.5. Méthodes de réalisation des forages pressiométriques

Les méthodes de forage et leur adaptation au terrain sont récapitulées dans le Tableau suivant :

Tableau 2. 3 Méthode de réalisation des forages pressiométrique

Nature des terrains	Forage préalable									Refolement
	Rotation *					Battage et autres				
	TAM	TIN	THC	O DG IN	CAR	ROTOP	CAR BAT	CAR VBF	TF EM	
Vase et argiles molles	—	R *	—	O *	—	—	O CPMF	—	—	—
Argiles moyennement compactes	R	R *	R	R *	—	O *	—	—	O	—
Argiles compactes, marnes raides			R	R *	R *	O *	—	—	—	—
Limons :										
— au-dessus de la nappe	R	O *	R	O *	—	O *	O	O	O	—
— sous la nappe	—	R *	—	O *	O *	O *	—	—	O ▲	—
Sables lâches :										
— au-dessus de la nappe	R	R *	O	O *	—	O *	—	—	O	—
— sous la nappe	—	R *	—	O *	—	O *	—	—	—	O
Sables moyennement compacts et compacts	R	R *	R	R *	—	R *	O	O	O ▲	O *
Sols grossiers : graviers, galets argiles à silex, etc.			O	O *		R *	O	O	O	O *
Roches altérées			R	R	O	R *	O	O		O *
Roches tendres										O *

Légende :

R : Recommandé

O : Toléré

— : Non toléré

■ : Inadapté

* Vitesse de rotation < 60 tr/min, et diamètre de l'outil inférieur ou égal 1,15 d_p.

+ Éventuellement, forage préalable en petit diamètre (d_t < d_p).

* Injection avec boue (pression < 500 kPa ; débit < 15 l/min).

Dans le cas où le forage est fait par rotation, la pression (en tête du train de tiges) transmise sur l'outil doit être inférieure à 200 kPa.

▲ Avec dispositions particulières (par exemple imposer un gradient vertical descendant, réaliser les essais en descendant, prolonger le tube fendu par un tube de garde).

TAM Tarière à main (cuillère)

TIN Tarière avec injection de boue de forage

THC Tarière hélicoïdale continue à sec

O DG Outil désagrégateur

CAR Carottier

ROTOP Rotopercussion

IN Avec injection de boue

BAT Battage

CPMF Carottier à parois minces foncé

TF Tube fendu

TF EM Tube fendu avec enlèvement simultané des matériaux

VBF Vibrofonçage

2.5.6. Interprétation de l'essai pressiométrique

On se propose dans ce qui suit de présenter quelques méthodes d'interprétation de l'essai proprement dite, sans les décrire précisément.

2.5.6.1 Détermination des caractéristiques pressiométriques

Les valeurs des pressions et des volumes relevés au cours de l'essai doivent être corrigées afin de tenir compte de :

- ❖ La pression due à la charge hydraulique P_h ;
- ❖ La résistance propre de la membrane ;
- ❖ L'expansion propre de l'appareillage.

2.5.6.2 Courbe pressiométrique corrigée

Les valeurs corrigées de volume et de pression (mesurée à chaque palier au bout de 60 s) sont déterminées par les relations :

$$P = P_r + P_h - P_e \quad (2.3)$$

$$V = V_r - a P_r \quad (2.4)$$

Les volumes sont exprimés en centimètres cubes et les pressions en méga pascals ou bar. Les points de coordonnées (P, V) sont représentés sur un graphique avec en abscisses les pressions et en ordonnées les volumes.

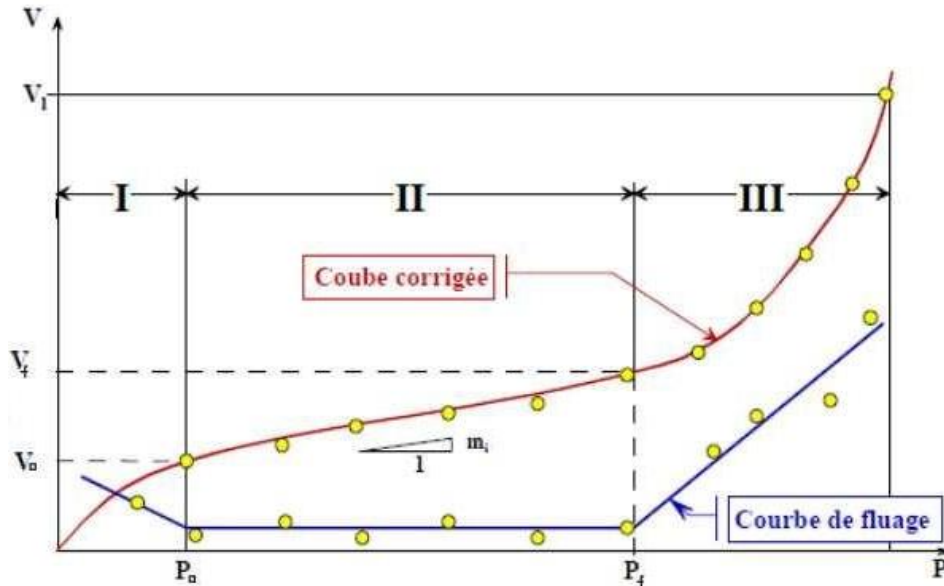


Figure 2. 23 Courbe pressiométrique corrigée

2.5.6.3 Détermination de la plage de calcul des modules pressiométrique

La courbe pressiométrique corrigée est constituée d'une succession de segments de pente m_i où :

$$m_i = \frac{(V_i - V_{i-1})}{(P_i - P_{i-1})} \quad (2.5)$$

Avec :

P_i, V_i les coordonnées de l'extrémité du segment i . ($i \geq 1$).

On désigne par m_E la valeur m_i strictement positive, la plus faible. Les coordonnées de l'origine de ce segment sont notées (P_E, V_E) et celles de son extrémité (P'_E, V'_E).

Par définition, la plage sur laquelle est déterminé le module pressiométrique est constituée de l'ensemble des segments consécutifs qui ont une pente inférieure ou égale à β fois la plus faible non nulle. Elle a pour origine, l'origine du premier segment, et pour extrémité, la fin du segment. La valeur conventionnelle de β est :

$$\beta = 1 + \frac{1}{100} * \frac{P'E + P_E}{P'E - P_E} + \frac{6}{V'E - V_E} \quad (3.6)$$

Où les volumes sont exprimés en centimètres cubes.

Par convention les coordonnées de l'origine de la plage du module pressiométrique sont notées (P_1, V_1) et celle de son extrémité (P_2, V_2) .

2.5.6.4 Détermination du module pressiométrique Ménard E_M et le module de cisaillement G

Partant de la formule fondamentale de l'expansion r d'une cavité cylindrique de diamètre r sous l'action d'un accroissement de pression P , on a :

$$\Delta V / V = \Delta P(1 + \nu) / E_M \quad (2.7)$$

A partir de pente de la droite pseudo-élastique (Figure 2.23). On calcule le module pressiométrique, noté E_M comme suit :

$$E_M = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (2.8)$$

ν : le coefficient de poisson de sol ; V_0 : le volume de la sonde initial.

V_m : la variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo – élastique, $\Delta p/\Delta V$: l'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe

La détermination du module E_M est l'opération la plus délicate dans l'essai pressiométrique. Du fait du remaniement du trou de forage, le module pressiométrique E_M sera toujours plus faible que le module réel du sol.

Le module de cisaillement est calculé à partir de la formule :

$$G = \frac{E_M}{2(1 + \nu)} \quad (2.9)$$

2.5.6.5 Détermination de la pression de fluage P_f

La pression de fluage P_f est obtenue par exploitation graphique du diagramme $(P, \Delta V_{60/30})$, (Figure 2.24).

$\Delta V_{60/30}$: est la variation de volume du liquide injecté dans la cellule centrale de mesure entre les temps $t = 30$ s et $t = 60$ s après le début du palier de pression P

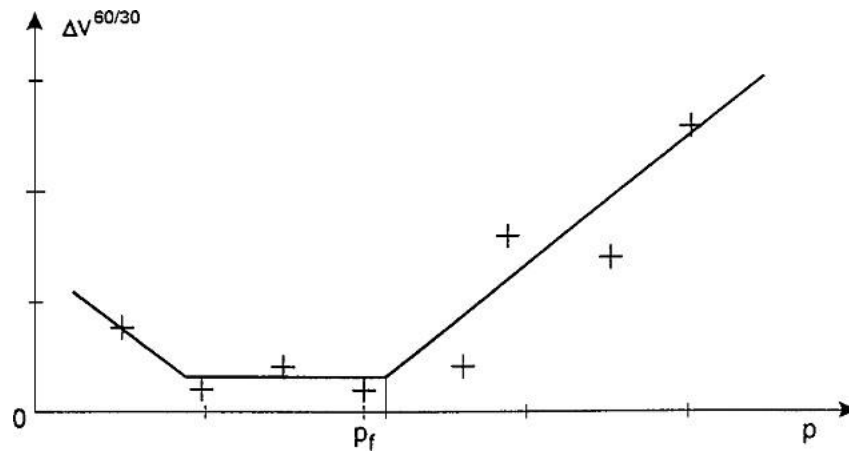


Figure 2. 24 Courbe de fluage pressiométrique

2.5.6.6 Détermination de la pression limite P_L

Lorsque la pression appliquée sur les parois du forage par la sonde dépasse la pression de fluage P_f le sol entre en plastification et par convention, la pression limite est la pression qui entraîne le doublement de la cellule centrale de mesure après la pression P_0 . Elle correspond à un volume injecté

$$V_l = V_s + 2V_1 \quad (2.10)$$

Lorsque le volume injecté au cours de l'essai est tel que le volume de la cavité a dépassé la valeur :

$$V_s + 2V_1 \quad (2.11)$$

La pression limite est déterminée par interpolation linéaire entre les valeurs des pressions des paliers qui encadrent ce volume.

Si la valeur du V_L dépasse la valeur du volume du dernier palier de la courbe corrigée on aura recours aux deux méthodes suivantes :

- **Méthode de la courbe « inverse »**

Elle consiste à transformer les couples de valeur (P, V) en $(P, 1/V)$ et à effectuer une régression linéaire pour toutes les valeurs telles que $P \geq P_2$.

L'extrapolation est faite par la transformation :

$$Y = Ap + B \quad (2.12)$$

Avec :

$$Y = V - 1 \quad (2.13)$$

Où :

A et B sont les coefficients obtenus par la méthode « des moindres carrés » par rapport aux pressions sur les valeurs expérimentales (Y, P) au-delà (P₂, V₂) inclus.

La pression limite obtenue à partir de l'équation suivante :

$$P_l = -\frac{B}{A} + \frac{1}{[A(V_s + 2V_E)]} \quad (2.14)$$

- **Méthode d'extrapolation « hyperbolique »**

L'extrapolation est faite avec toutes les valeurs mesurées telles que P > P_E par la transformation suivante :

$$Y = CX - D$$

Avec :

$$X = \frac{V^2 - V_E^2}{P - P_E} \quad (2.15)$$

$$Y = \frac{PV^2 - P_E V_E^2}{P - P_E} \quad (2.16)$$

Où :

C et D sont les coefficients obtenus par la méthode « des moindres carrés » par rapport à X sur les valeurs expérimentales (X, Y). La pression limite P_{lh} est obtenue par l'équation suivante :

$$P_{lh} = \left[P_E (V_E^2 + D) + C (V_l^2 + V_E^2) \right] / (V_l^2 + D) \quad (2.17)$$

Et puis on prend le P_l le plus petit des deux méthodes.

2.5.6.7 Cohésion non drainée C_u

Par définition C_u est la différence entre la pression limite P_l et la pression horizontale en place P₀ ou σ_{h0} le tout divisé par un coefficient varie d'un chercheur à un autre :

$$C_u = \frac{P_{LM} - P_0}{5,5} \quad \text{Pour} \quad \frac{E}{P_{LM} - P_0} = 10 \quad (2.18)$$

$$C_n = \frac{P_{LM} - P_0}{6,4} \quad \text{Pour} \quad \frac{E}{P_{LM} - P_0} = 15 \quad (2.19)$$

2.5.6.8 Contrainte horizontale en place σ_{h0}

Par définition c'est le premier contact de la sonde avec la paroi du sol et elle est égale à P₀ :

$$\sigma_{h0} = P_0 \quad (2.20)$$

2.5.6.9 Angle de frottement des sols pulvérulents φ

Pour le calcul de l'angle de frottement on peut utiliser que l'équation de Ménard suivante :

$$P_l^* = b * 2^{(\varphi-24)/4} \quad (2.21)$$

Après développement Mathématique de l'équation de Ménard nous avons tiré φ :

$$\varphi = \left(\frac{\ln P_{lim}^* - \ln b}{\ln 2} \right) * 4 + 24 \quad (2.22)$$

Avec $b = 1,8$ pour les sols humides à structure meuble, et $b = 3,5$ pour un sol sec et structuré.

2.5.6.10 Pression limite nette P_l^* et pression de fluage nette P_f^*

La pression nette P^* est la pression comptée par rapport à la contrainte totale horizontale régnant dans le terrain avant introduction de la sonde pressiométrique au même niveau :

Pression limite pressiométrique nette :

$$P_l^* = P_l - \sigma_{hs} \quad (2.23)$$

Pression de fluage pressiométrique nette :

$$P_f^* = P_f - \sigma_{hs} \quad (2.24)$$

2.6. Analyse et interprétation des résultats d'essais pressiométriques obtenus

2.6.1. Résultats de sondage SP1

Les résultats obtenus sont exposés ici suivant la profondeur de réalisation,

L'analyse de chacun des courbes de chargement (pression-déformation) permet de déterminer les caractéristiques pressiométriques suivantes :

- ❖ Module pressiométrique (E_M) définissant le comportement élastique du sol,
- ❖ Pression limite (P_L) définissant la résistance du sol à la rupture,
- ❖ La pression de fluage (P_F) définissant la limite entre la phase élastique et la phase plastique.

Les résultats sont récapitulés dans le (Tableau 2.4) joint ci-après.

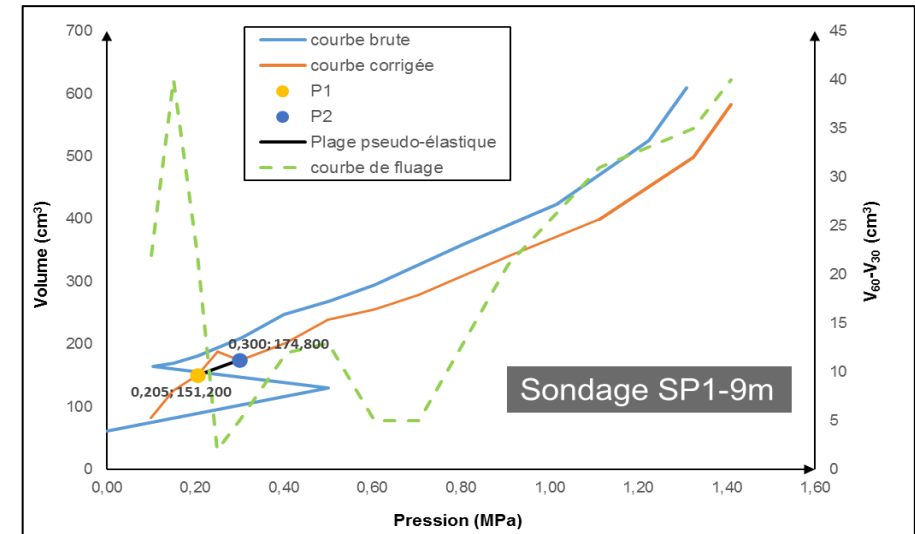
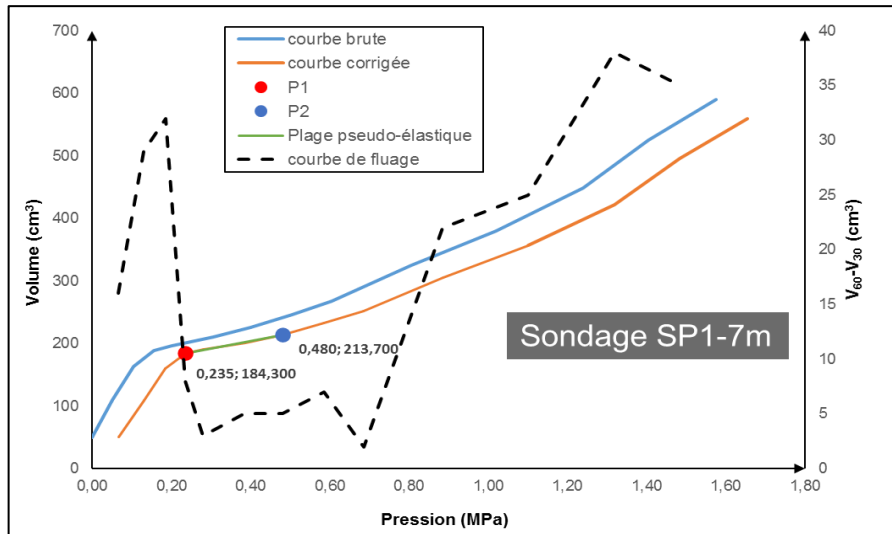
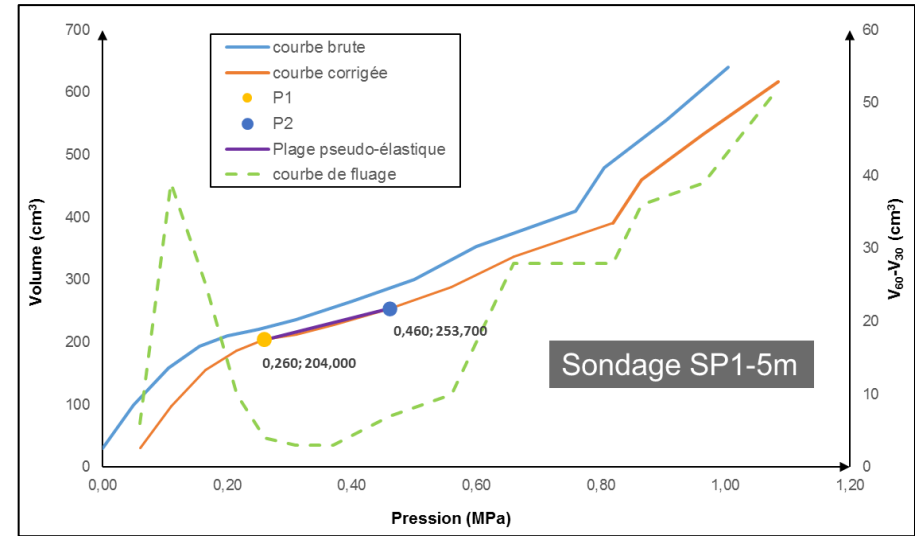
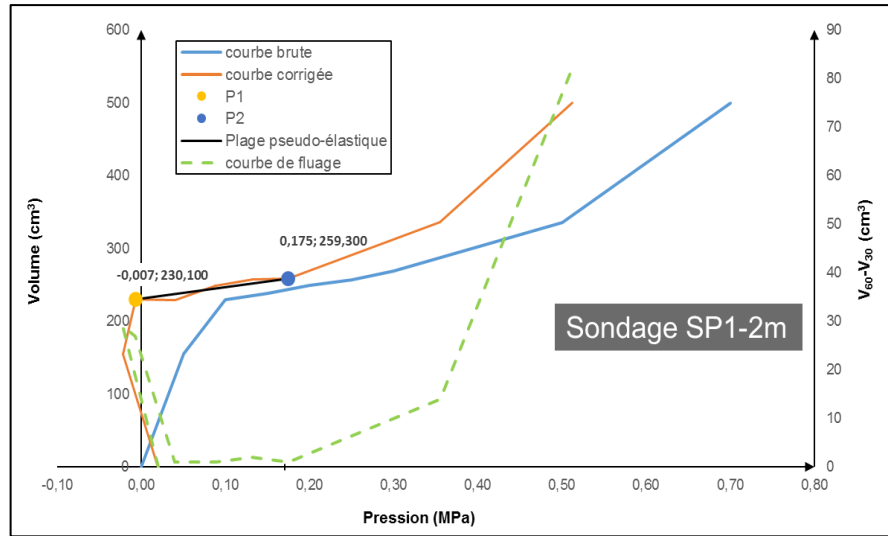
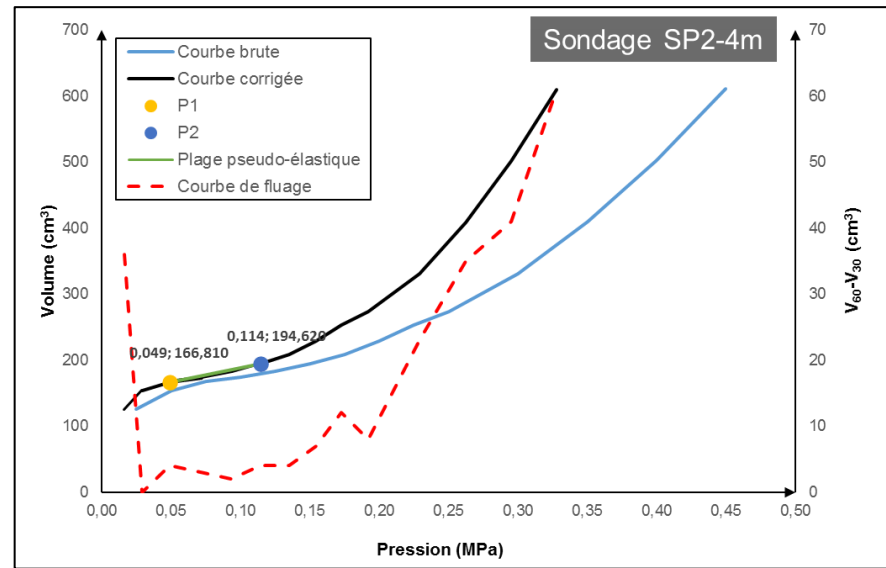
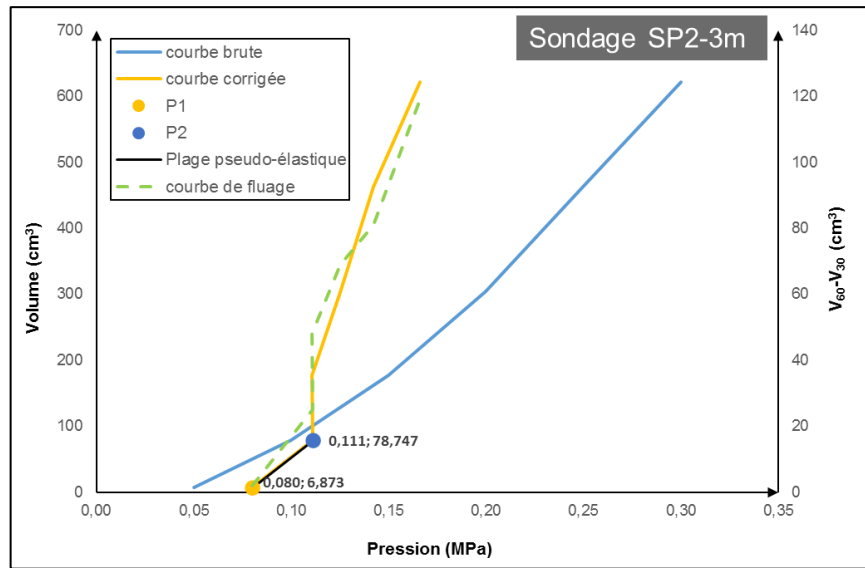
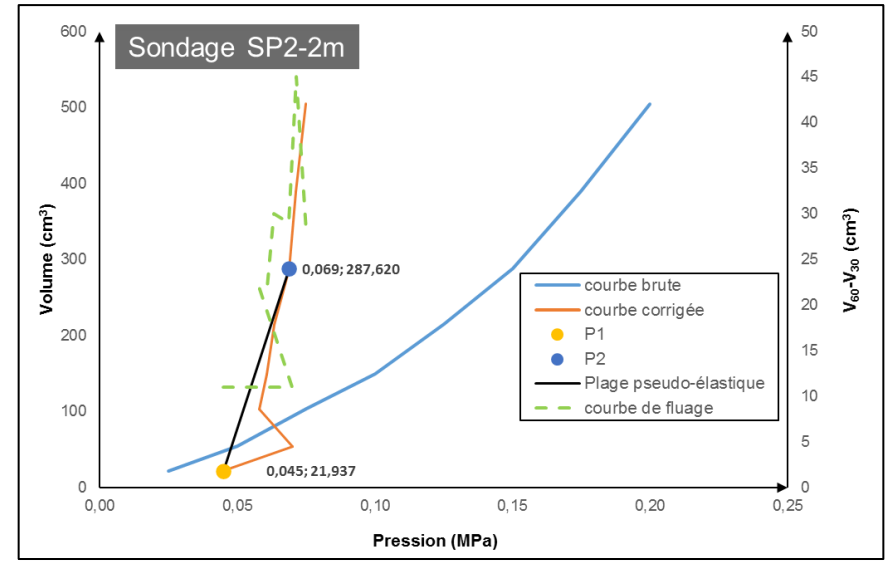
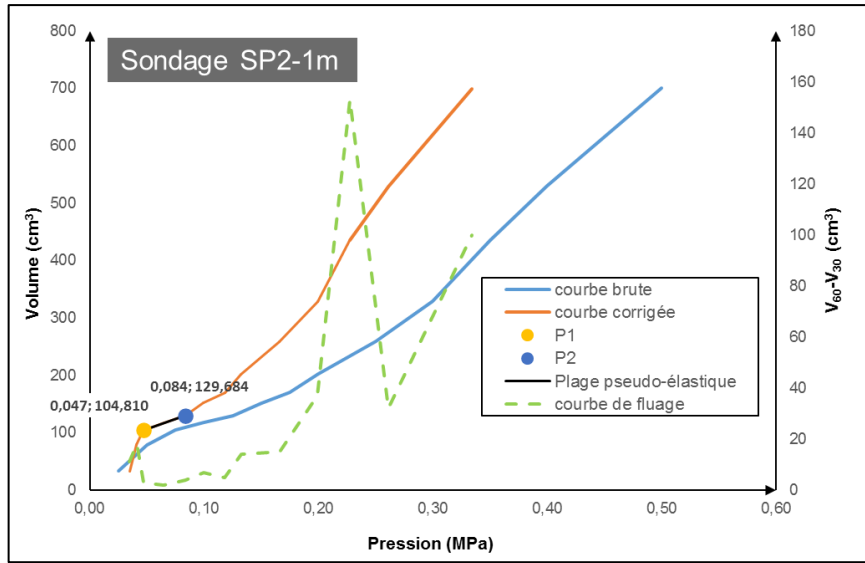
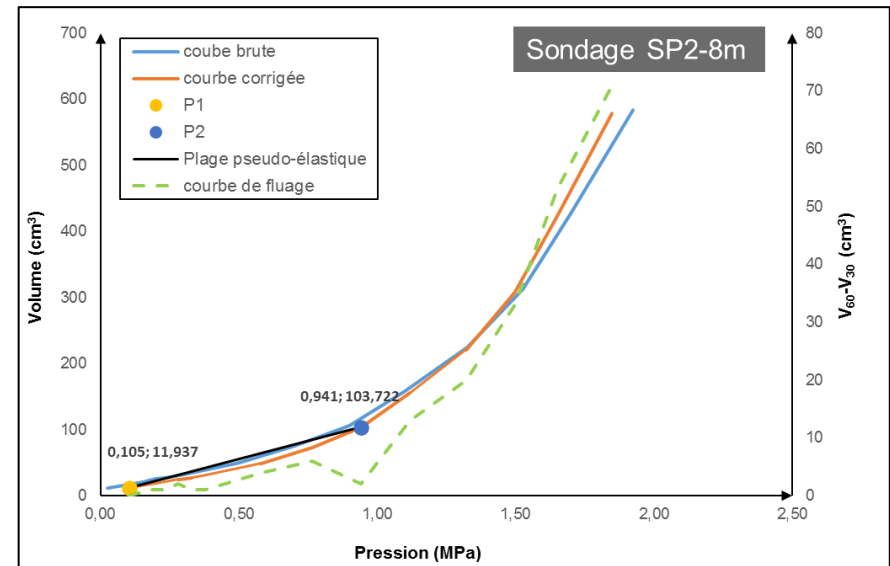
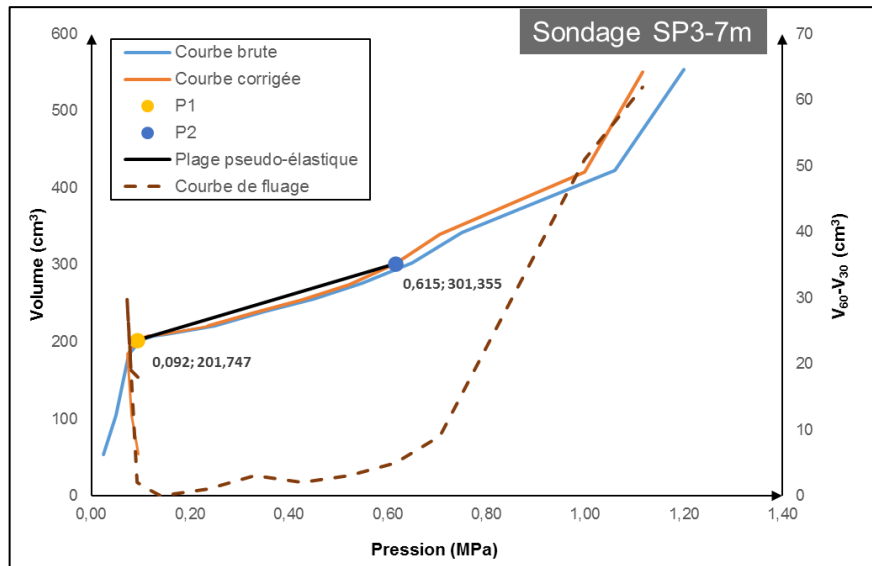
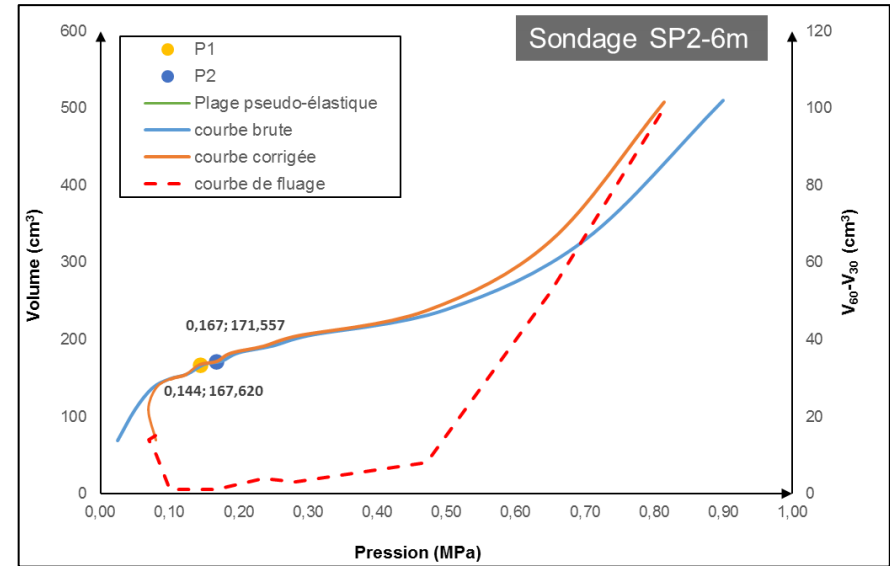
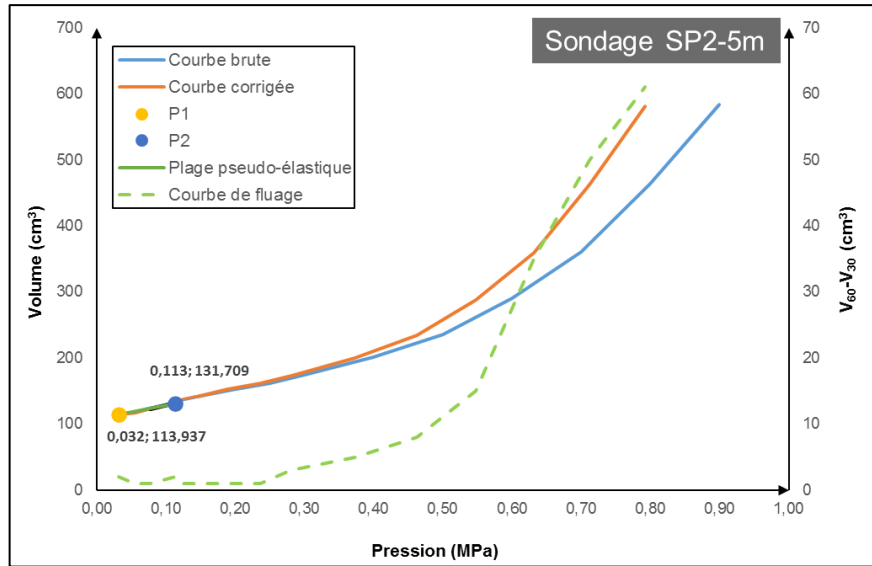
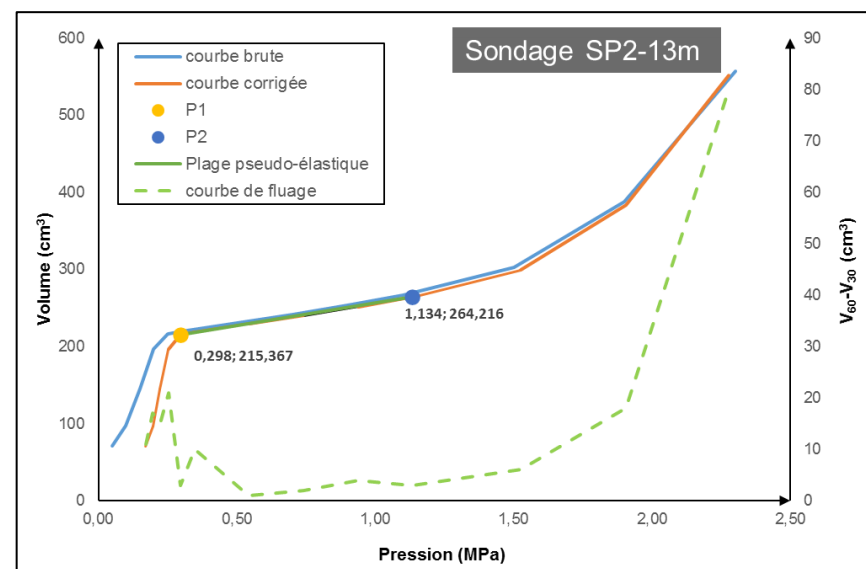
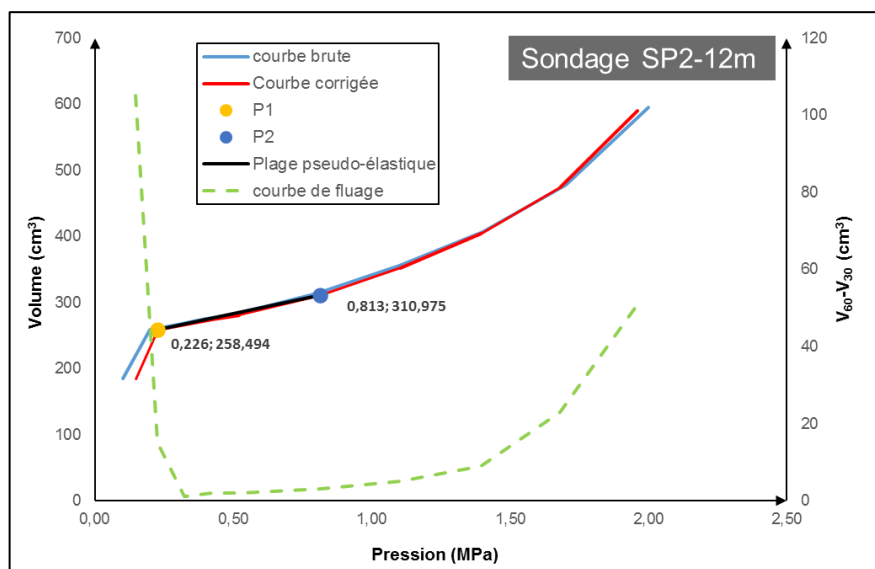
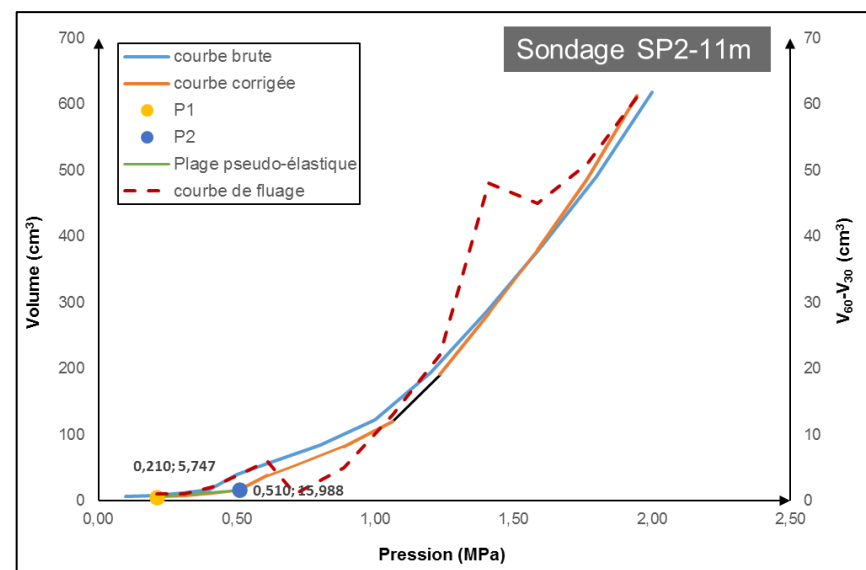
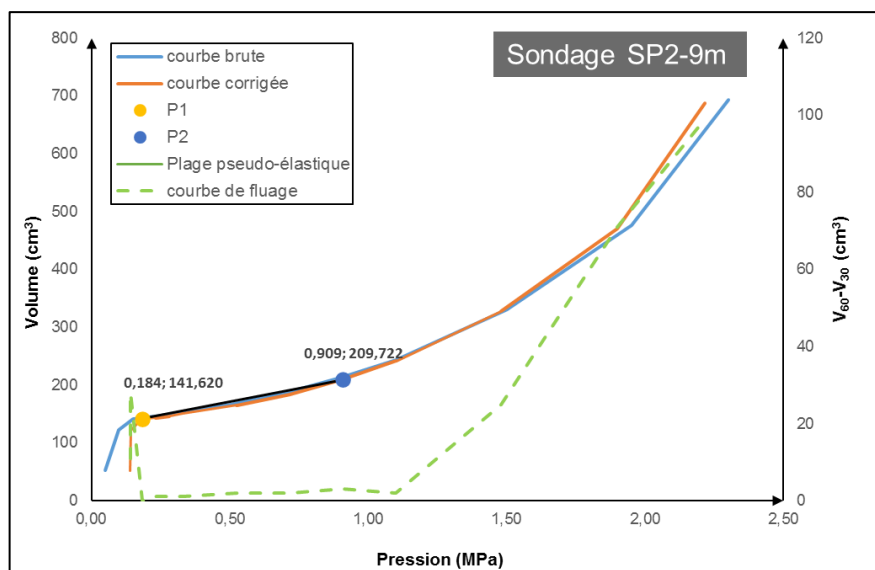


Figure 2. 25 Courbes corrigées et brutes des essais réalisés dans le sondage SP1.







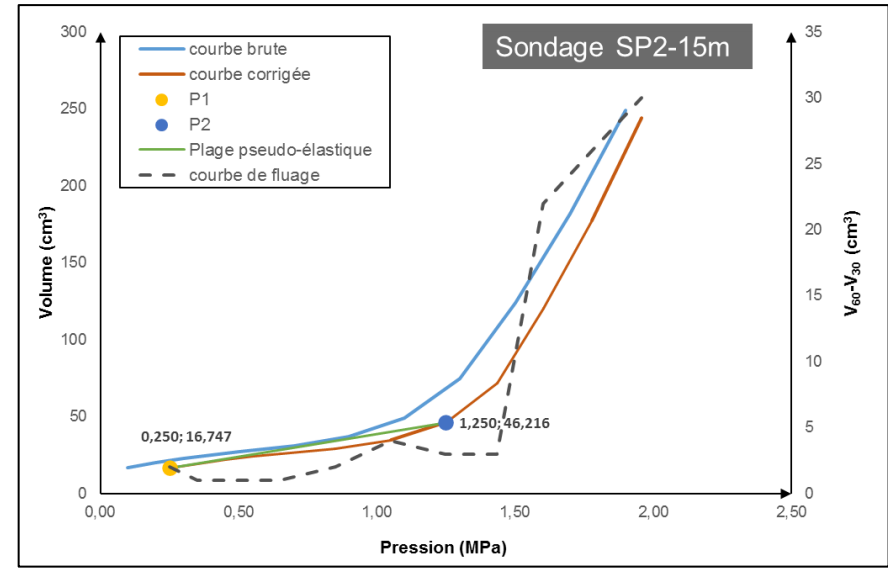
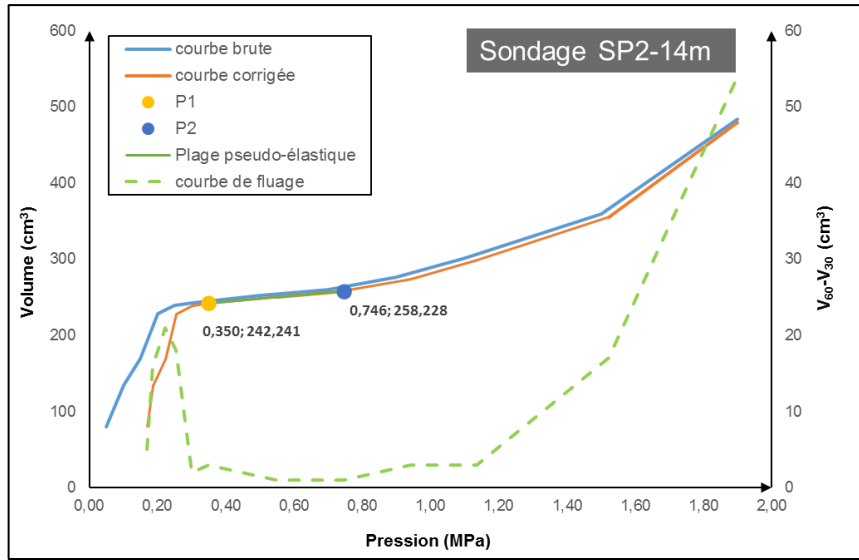


Figure 2. 26 Courbes corrigées et brutes des essais réalisés dans le sondage SP2.

2.6.2. Résultats de sondage SP2

Les résultats obtenus sont exposés dans les Figures 2.26. Les valeurs brutes des essais réalisés sont en annexe A de ce manuscrit.

2.7. Synthèse des résultats pressiométriques obtenus

L'ensemble des valeurs des paramètres déterminés pour les différents essais réalisés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 2. 4 Synthèse des résultats pressiométriques obtenus

Informations sur l'essai		Paramètres fondamentaux			Paramètres complémentaires				Paramètres annexes	
Forage	Profondeur (m)	ρ_f (MPa)	ρ_{lm} (MPa)	E_M (MPa)	σ_{hs} (MPa)	ρ^*_{lm} (MPa)	E/ρ_{lm}	E/ρ^*_{lm}	ρ_1 (Mpa)	ρ_2 (Mpa)
SP 01	2,00	0,18	0,51	12,5	0,018	0,49	24,4	25,3	-0,01	0,18
SP 01	5,00	0,56	1,28	7,00	0,045	1,21	5,60	5,80	0,25	0,48
SP 01	7,00	0,69	2,11	13,80	0,063	2,05	6,50	6,70	0,24	0,48
SP 01	9,00	0,30	1,48	12	0,081	1,40	8,20	8,60	0,20	0,30
SP 02	1,00	0,08	0,30	3,5	0,009	0,30	11,4	11,8	0,05	0,08
SP 02	2,00	0,07	0,07	1,7	0,018	0,06	22,1	29,1	0,04	0,07
SP 02	3,00	0,14	0,16	0,9	0,027	0,13	5,8	7,0	0,08	0,11
SP 02	4,00	0,15	0,34	5,9	0,036	0,30	17,4	19,5	0,05	0,11
SP 02	5,00	0,55	0,83	10,7	0,045	0,79	12,8	13,6	0,03	0,11
SP 02	6,00	0,17	0,94	14,8	0,054	0,89	15,7	16,7	0,14	0,17
SP 02	7,00	0,71	1,25	14,1	0,063	1,19	11,2	11,8	0,09	0,62
SP 02	8,00	0,94	1,80	19,8	0,072	1,72	11,0	11,5	0,10	0,94
SP 02	9,00	1,10	2,26	26,4	0,081	2,18	11,7	12,2	0,18	0,91
SP 02	11,00	1,06	1,63	59,9	0,099	1,53	36,8	39,2	0,21	0,51
SP 02	12,00	1,39	2,32	31,0	0,108	2,21	13,4	14,0	0,23	0,81
SP 02	13,00	1,13	2,52	45,4	0,117	2,40	18,0	18,9	0,30	1,13
SP 02	14,00	0,75	1,90	66,3	0,126	1,77	34,9	37,4	0,35	0,75
SP 02	15,00	1,44	1,94	71,2	0,135	1,81	36,7	39,4	0,25	1,25

L'évolution de chaque paramètre en fonction de la profondeur de chaque sondage est donnée dans la figure suivante :

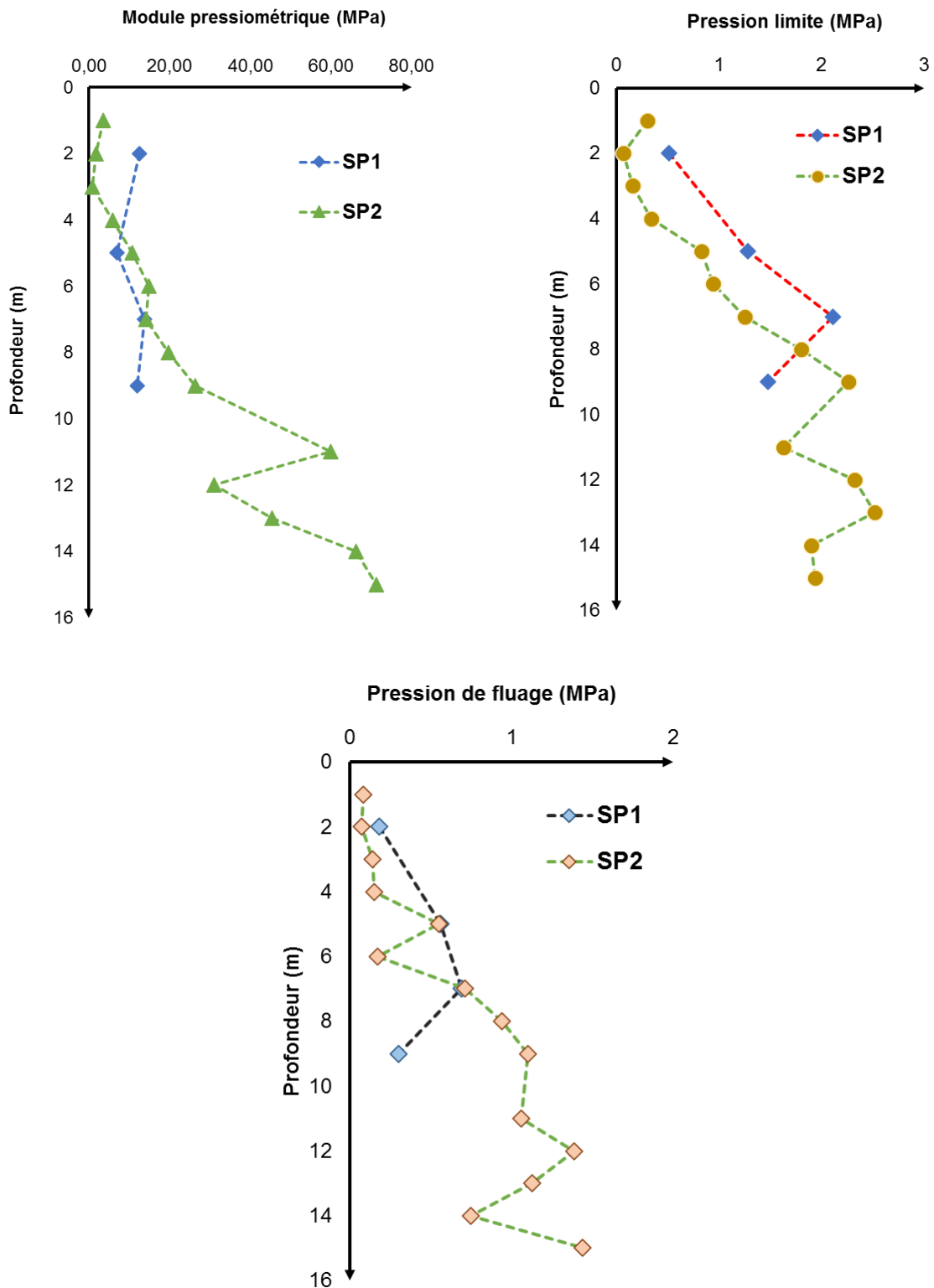


Figure 2. 27 Evolution des paramètres pressiométriques en fonction de la profondeur

Les résultats obtenus à partir des sondages pressiométriques donnent des valeurs de modules de déformation (E_M) et de pressions limites (P_L) relativement faibles en surface à moyennement élevées en profondeur.

Notant cependant que les résultats pressiométriques enregistrés au niveau de sondage SP1, sont plus faibles comparativement à ceux obtenus au droit du sondage SP2. Mais globalement les valeurs faibles que pour le module pressiométrique.

Lorsque la pression limite a pu être normalement évaluée, les valeurs du rapport $\frac{P_{lm}}{P_f}$ constituent un critère de qualité de l'essai car ce rapport doit rester compris entre 1 et 2.

Un critère de qualité très souvent utilisé par les géotechniciens est le rapport $\frac{E_M}{\rho_{LM}^*}$ qui permet une classification des sols :

$\frac{E_M}{\rho_{LM}^*} < 5$	Sols remaniés et triturés
$5 < \frac{E_M}{\rho_{LM}^*} \leq 8$	Argiles sous consolidées ou légèrement remaniées
$8 < \frac{E_M}{\rho_{LM}^*} \leq 12$	Argiles normalement consolidées
$12 < \frac{E_M}{\rho_{LM}^*} \leq 15$	Argiles légèrement surconsolidées
$\frac{E_M}{\rho_{LM}^*} > 15$	Argiles surconsolidées

Toute valeur de ce rapport très différente des valeurs ci-dessus peut être l'indice d'une qualité défectueuse de l'essai et mérite un examen plus approfondi des résultats.

2.8. Conclusion

L'exécution des différents essais, nous a permis au mieux de comprendre l'essai pressiométrique sur le plan pratique et théorique et ainsi d'être capable d'exploiter les résultats expérimentaux afin d'élaborer une interprétation, ce qui nous donnera la capacité de calculer les différents ouvrages de génie civil en se basant sur cet essai.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études nous a permis :

D'abord, de se rapprocher, de découvrir le travail dans le domaine pratique et nous initier avec les matériels d'essais géotechniques (pressiomètre, sondeuse, etc...).

Ensuite, grâce aux objectifs fixés au départ par rapport au problème de tassement, nous avons pu utiliser puis exploiter l'essai pressiométrique pour le calcul des ouvrages géotechniques en partant primo à un recensement des méthodes qui nous ont permis par la suite de comprendre l'évaluation des tassements, secundo nous nous sommes intéressées entièrement à la méthode du pressiomètre dont la théorie nous a aider à mieux exploiter l'essai par la détermination des paramètres pour le calcul des tassements, ce qui nous a conduit tertio à réaliser les forages puis l'exécution des essais pressiométriques proprement dits, et quarto les applications des essais pratiques.

Outre de cela, nous avons pu à travers cette étude nous familiariser avec les calculs géotechniques (calcul de tassement, capacité portante, pression de fluage, la pression limite, le module pressiométrique, etc...) et élargir nos connaissances dans les essais in situ notamment sur leur aspect technique et économique dans la réalisation d'un projet de construction.

Ce projet de fin d'études nous fut dans tous les cas un bénéfice aussi bien technique qu'expérimental.

Enfin, ce projet nous a permis d'approfondir et de compléter nos connaissances acquises tout au long de notre cycle de formation, ainsi que de bénéficier des connaissances et l'expérience des gens du domaine.

Références bibliographiques

Annexe A :

Fiches des essais pressiométriques réalisés



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

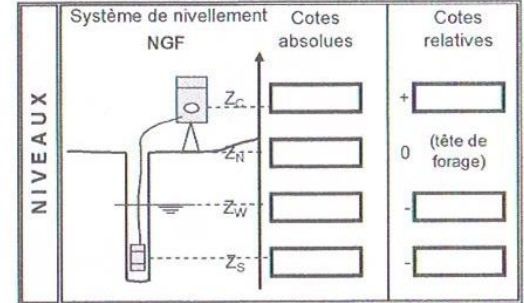
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP01 - 2m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE		TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63	Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine		Jumelée		Densité γ_l/γ_w	Pression d'étalonnage p_{el} (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc	Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
370 mm	Structure renforcée	Compressibilité λ_g (m ⁻¹)			Référence			
Type	Structure métallique	CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
E	Lamelles métalliques	Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)			
G	Tube fendu	Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)			

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0	0	0	0	14				
2	0.05	127	127	156	15				
3	0.1	203	203	230	16				
4	0.15	238	238	239	17				
5	0.2	248	248	249	18				
6	0.25	255	255	257	19				
7	0.3	268	268	269	20				
8	0.5	322	322	336					
9	0.7	418	418	500					
10									
11									
12									
13									



FORAGE	Système de localisation	X =		
		Y =		
	Atelier de forage			
	Méthode de forage			
		(abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type		
		diamètre (mm)		
Niveau pied de tubage (m)				
Fluide d'injection				
Passe de forage	de ... (m)			
	à ... (m)			
	Terminée à			

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

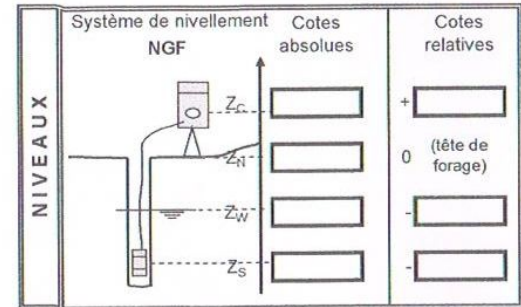
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	S P 01 - 5m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l/γ_w	Pression d'étalonnage p_a (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
	370 mm	Structure renforcée				Compressibilité λ_g (m ⁻¹)	Référence		
Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Diamètre intérieur du tube d_i (mm)			
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)			
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)			

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
Observations (temps, etc)		

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0	24	74	30	14	1.005	589	589	641
2	0.05	60	60	99	15				
3	0.105	134	134	159	16				
4	0.155	183	183	193	17				
5	0.2	206	206	210	18				
6	0.25	217	217	220	19				
7	0.31	233	233	236	20				
8	0.4	258	258	265					
9	0.5	290	290	300					
10	0.6 0.6	325	325	353					
11	0.76	382	382	410					
12	0.805	444	444	480					
13	0.905	516	516	555					



FORAGE	Système de localisation	X =	
		Y =	
	Atelier de forage		
	Méthode de forage		
	(abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type	
		diamètre (mm)	
Niveau pied de tubage (m)			
Fluide d'injection			
Passe de forage	de ... (m)		
	à ... (m)		
	Terminée à		

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسن - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

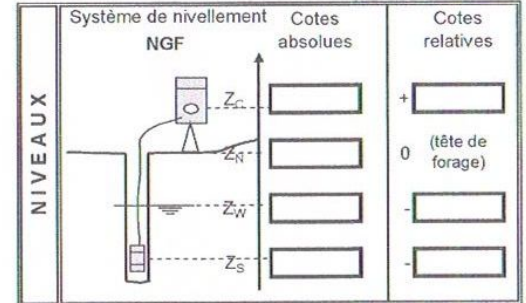
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SPO1-7m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l/γ_w	Pression d'étalonnage p_{el} (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE	
	370 mm	Structure renforcée				Compressibilité λ_g (m^{-1})	Référence	Diamètre intérieur du tube d_i (mm)
	Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Coefficient de calibrage a (cm^3/MPa)
	E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Volume de la sonde V_s (cm^3)	
	G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)				

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm^3)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm^3)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,000	34,0	34,0	50,0	14	1,575	558,0	588,0	596,0
2	0,050	81,0	81,0	110,0	15				
3	0,105	131,0	131,0	163,0	16				
4	0,155	181,0	181,0	189,0	17				
5	0,200	193,0	193,0	198,0	18				
6	0,305	205,0	205,0	210,0	19				
7	0,400	220,0	220,0	225,0	20				
8	0,505	239,0	239,0	246,0					
9	0,605	266,0	266,0	268,0					
10	0,805	303,0	303,0	325,0					
11	1,020	355,0	355,0	380,0					
12	1,240	411,0	411,0	449,0					
13	1,405	490,0	490,0	525,0					



FORAGE	Système de localisation	X =		
		Y =		
	Atelier de forage			
	Méthode de forage			
	(abréviations du tableau C)			
	Outil de forage	type		
		diamètre (mm)		
Niveau pied de tubage (m)				
Fluide d'injection				
Passe de forage	de ... (m)			
	à ... (m)			
	Terminée à			

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm^3
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسن - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

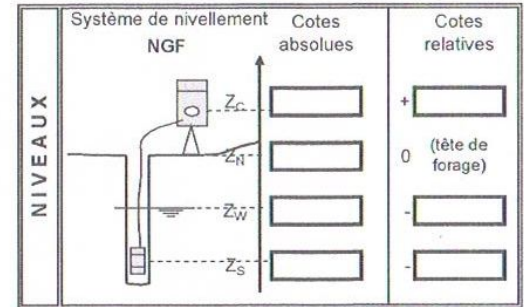
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
Forage	SP01 - 9m	

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE		TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63	Type	Coaxiale Jumelée	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine				Densité γ_l/γ_w	Pression d'étalonnage p_{et} (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc	Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
370 mm	Structure renforcée	Compressibilité λ_g (m ⁻¹)			Référence			
Type	Structure métallique	CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
E	Lamelles métalliques	Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)			
G	Tube fendu	Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)			

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,000	40,0	40,0	62,0	14				
2	0,050	90,0	90,0	130,0	15				
3	0,105	143,0	143,0	165,0	16				
4	0,150	168,0	168,0	170,0	17				
5	0,205	176,0	176,0	181,0	18				
6	0,305	199,0	199,0	211,0	19				
7	0,400	235,0	235,0	248,0	20				
8	0,505	264,0	264,0	269,0					
9	0,605	290,0	290,0	295,0					
10	0,805	339,0	339,0	360,0					
11	1,015	392,0	392,0	423,0					
12	1,225	490,0	490,0	525,0					
13	1,310	570,0	570,0	610,0					



FORAGE	Système de localisation	X =		
		Y =		
	Atelier de forage			
	Méthode de forage			
	(abréviations du tableau C)			
	Outil de forage	type		
		diamètre (mm)		
Niveau pied de tubage (m)				
Fluide d'injection				
Passe de forage	de ... (m)			
	à ... (m)			
	Terminée à			

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا - Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

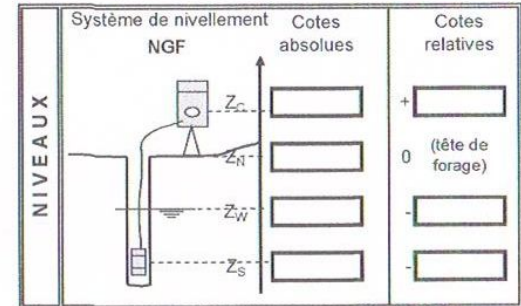
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP2 - 1m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE				TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63			Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine				Jumelée		Densité γ_l/γ_w		Pression d'étalonnage p_{04} (MPa)
	210 mm	Caoutchouc			Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
	370 mm	Structure renforcée					Compressibilité λ_g (m ⁻¹)	Référence		
	Type	Structure métallique			CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Diamètre intérieur du tube d_i (mm)	
	E	Lamelles métalliques			Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
	G	Tube fendu			Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)		

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,25	22,0	22,0	33,0	14				
2	0,050	61,0	61,0	71,0	15				
3	0,075	102,0	102,0	105,0	16				
4	0,100	116,0	116,0	118,0	17				
5	0,125	126,0	126,0	130,0	18				
6	0,150	145,0	145,0	152,0	19				
7	0,175	165,0	165,0	170,0	20				
8	0,200	188,0	188,0	202,0					
9	0,250	244,0	244,0	259,0					
10	0,300	292,0	292,0	329,0					
11	0,350	283,0	283,0	436,0					
12	0,400	498,0	498,0	570,0					
13	0,500	600,0	600,0	700,0					



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type
		diamètre (mm)
Niveau pied de tubage (m)		
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m)	
	à ... (m)	
	Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

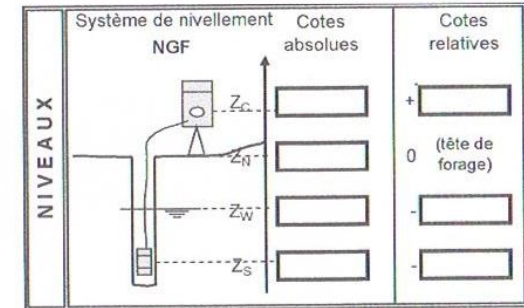
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP2-2m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l/γ_w	Pression d'étalonnage p_d (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
370 mm	Structure renforcée		Compressibilité λ_g (m ⁻¹)			Référence			
Type	Structure métallique			CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
E	Lamelles métalliques			Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
G	Tube fendu			Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)		

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,025	11,0	11,0	22,0	14				
2	0,050	43,0	43,0	54,0	15				
3	0,075	81,0	81,0	103,0	16				
4	0,100	127,0	127,0	149,0	17				
5	0,125	185,0	185,0	215,0	18				
6	0,150	259,0	259,0	288,0	19				
7	0,175	345,0	345,0	390,0	20				
8	0,200	477,0	477,0	509,0					
9									
10									
11									
12									
13									



FORAGE	Système de localisation	X =	
		Y =	
	Atelier de forage		
	Méthode de forage (abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type	
		diamètre (mm)	
	Niveau pied de tubage (m)		
Fluide d'injection			
Passe de forage	de ... (m)		
	à ... (m)		
	Terminée à		

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

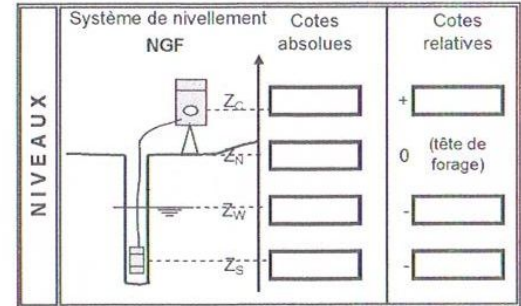
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP 2-3m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l/γ_w	Pression d'étalonnage p_{et} (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
	370 mm	Structure renforcée				Compressibilité λ_g (m ⁻¹)	Référence		
	Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE					
	E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
	G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
							Volume de la sonde V_s (cm ³)		

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,050	5,0	5,0	7,0	14				
2	0,100	56,0	54,0	79,0	15				
3	0,150	129,0	129,0	177,0	16				
4	0,200	235,0	235,0	304,0	17				
5	0,250	383,0	383,0	464,0	18				
6	0,300	503,0	503,0	622,0	19				
7					20				
8									
9									
10									
11									
12									
13									



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type diamètre (mm)
	Niveau pied de tubage (m)	
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m) à ... (m) Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

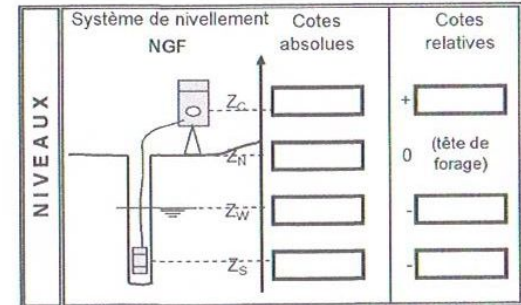
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP2 - 4 m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE				TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63			Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence		
	Longueur	Gaine				Jumelée		Densité γ/γ_w		Pression d'étalonnage p_{et} (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc			Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE			
	370 mm	Structure renforcée							Référence		
	Type	Structure métallique							Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
	E	Lamelles métalliques			CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
	G	Tube fendu			Référence fournisseur			Volume de la sonde V_s (cm ³)			
					Etalonnage p_m (MPa)						

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,025	89,0	89,0	125,0	14	0,450	550,0	550,0	611,0
2	0,050	152,0	156,0	166,0	15				
3	0,075	163,0	163,0	167,0	16				
4	0,100	171,0	171,0	174,0	17				
5	0,125	181,0	181,0	183,0	18				
6	0,150	192,0	191,0	195,0	19				
7	0,175	205,0	205,0	209,0	20				
8	0,200	222,0	222,0	229,0					
9	0,225	241,0	242,0	253,0					
10	0,250	266,0	266,0	274,0					
11	0,300	308,0	308,0	321,0					
12	0,350	375,0	375,0	402,0					
13	0,400	462,0	462,0	503,0					



FORAGE	Système de localisation	X =		
		Y =		
	Atelier de forage			
	Méthode de forage			
	(abréviations du tableau C)			
	Outil de forage	type		
		diamètre (mm)		
Niveau pied de tubage (m)				
Fluide d'injection				
Passe de forage	de ... (m)			
	à ... (m)			
	Terminée à			

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

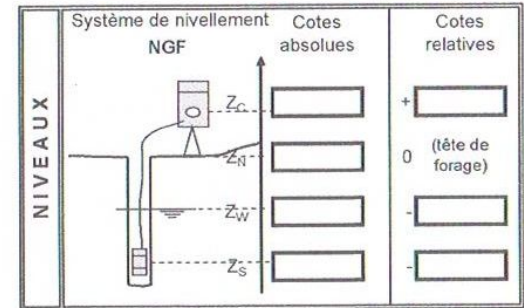
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP2-5m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l/γ_w		Pression d'étalonnage p_d (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
370 mm	Structure renforcée		Compressibilité λ_g (m ⁻¹)				Référence		
Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Diamètre intérieur du tube d_i (mm)			
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)			
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)			

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,125	112,0	112,0	114,0	14	0,800	614,0	614,0	614,0
2	0,150	116,0	116,0	117,0	15	0,800	522,0	522,0	583,0
3	0,175	122,0	122,0	123,0	16	0,900			
4	0,145	130,0	130,0	131,0	17				
5	0,125	136,0	136,0	137,0	18				
6	0,150	141,0	141,0	142,0	19				
7	0,200	152,0	152,0	153,0	20				
8	0,250	161,0	161,0	162,0					
9	0,300	171,0	171,0	174,0					
10	0,300	186,0	196,0	201,0					
11	0,500	227,0	227,0	235,0					
12	0,600	275,0	275,0	29,0					
13	0,700	326,0	326,0	369,0					



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type
		diamètre (mm)
Niveau pied de tubage (m)		
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m)	
	à ... (m)	
	Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

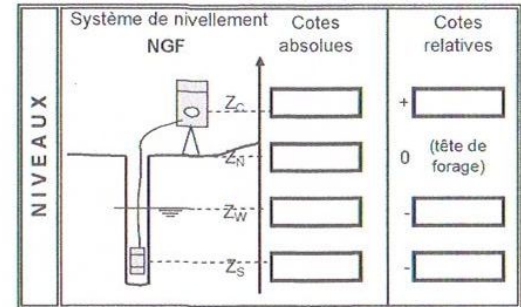
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
Forage	SP2 - 6 m	

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ/γ_w		Pression d'étalonnage p_{et} (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
	370 mm	Structure renforcée				Compressibilité λ_g (m ⁻¹)		Référence	
	Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Diamètre intérieur du tube d_i (mm)	
	E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
	G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)		

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,25	54,0	54,0	69,0	14				
2	0,050	95,0	95,0	101,0	15				
3	0,075	127,0	127,0	132,0	16				
4	0,100	148,0	148,0	149,0	17				
5	0,125	154,0	154,0	155,0	18				
6	0,150	167,0	167,0	168,0	19				
7	0,175	171,0	171,0	172,0	20				
8	0,200	181,0	181,0	183,0					
9	0,250	188,0	188,0	192,0					
10	0,300	202,0	202,0	205,0					
11	0,500	231,0	231,0	239,0					
12	0,700	277,0	277,0	319,0					
13	0,900	410,0	410,0	510,0					



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type
		diamètre (mm)
Niveau pied de tubage (m)		
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m)	
	à ... (m)	
	Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

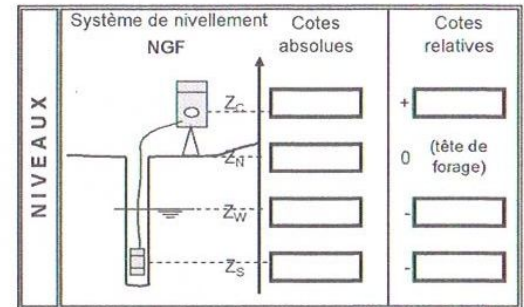
Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
Forage	SP2 - 7a -	

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	Pression d'étalonnage p_{et} (MPa)
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_w		
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
	370 mm	Structure renforcée				Compressibilité λ_g (m ⁻¹)	Référence	Diamètre intérieur du tube d_i (mm)	
	Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Volume de la sonde V_s (cm ³)			
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)						

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,025	36,0	36,0	54,0	14	1,200	492,0	492,0	554,0
2	0,050	86,0	86,0	105,0	15				
3	0,075	154,0	154,0	186,0	16				
4	0,100	200,0	200,0	242,0	17				
5	0,125	227,0	227,0	268,0	18				
6	0,150	210,0	210,0	210,0	19				
7	0,250	220,0	220,0	221,0	20				
8	0,350	236,0	236,0	239,0					
9	0,450	254,0	254,0	256,0					
10	0,550	273,0	273,0	276,0					
11	0,650	298,0	298,0	303,0					
12	0,750	333,0	333,0	342,0					
13	1,060	372,0	372,0	423,0					



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type diamètre (mm)
	Niveau pied de tubage (m)	
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m)	
	à ... (m)	
	Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

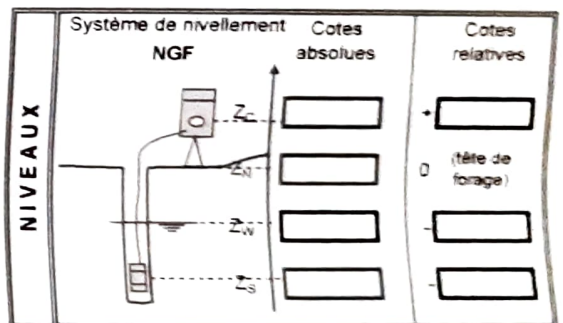
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf Plan	
	Forage	SP2 - 8m

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l / γ_w	Pression d'étalonnage p_m (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
370 mm	Structure renforcée		Compressibilité λ_g (m ⁻¹)			Référence			
Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur				Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)				Volume de la sonde V_s (cm ³)		

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,025	12,0	12,0	12,0	14	1,925	513,0	513,0	584,0
2	0,100	16,0	16,0	17,0	15				
3	0,150	20,0	20,0	21,0	16				
4	0,200	23,0	23,0	25,0	17				
5	0,250	27,0	27,0	28,0	18				
6	0,300	31,0	31,0	32,0	19				
7	0,500	46,0	46,0	50,0	20				
8	0,700	69,0	69,0	75,0					
9	0,900	104,0	104,0	106,0					
10	1,100	145,0	145,0	158,0					
11	1,325	204,0	204,0	224,0					
12	1,525	279,0	279,0	312,0					
13	1,700	374,0	374,0	427,0					



FORAGE	Système de localisation	X =	
		Y =	
	Atelier de forage		
	Méthode de forage		
	(abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type	
		diamètre (mm)	
Niveau pied de tubage (m)			
Fluide d'injection			
Passe de forage	de (m)		
	à (m)		
	Terminée à		

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Megapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
 كلية التكنولوجيا
 Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

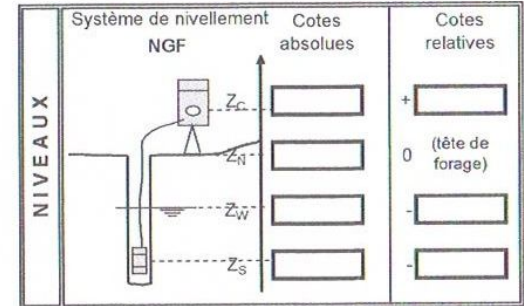
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	2P2 - 9 m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ_l / γ_w		Pression d'étalonnage p_d (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
370 mm	Structure renforcée		Compressibilité λ_g (m ⁻¹)				Référence		
Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Diamètre intérieur du tube d_i (mm)			
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)			
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)			

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,050	430	442	520	14				
2	0,100	940	940	1120	15				
3	0,150	142	142	1420	16				
4	0,200	1430	1430	1440	17				
5	0,250	1460	1460	1470	18				
6	0,300	1510	1510	1520	19				
7	0,500	1640	1640	1660	20				
8	0,700	1840	1840	1860					
9	0,900	2090	2030	2120					
10	1,100	2420	2420	2440					
11	1,500	3060	3060	3310					
12	1,950	4050	4050	4760					
13	2,300	5950	5950	6340					



FORAGE	Système de localisation	X =	
		Y =	
	Atelier de forage		
	Méthode de forage		
	(abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type	
		diamètre (mm)	
Niveau pied de tubage (m)			
Fluide d'injection			
Passe de forage	de ... (m)		
	à ... (m)		
	Terminée à		

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

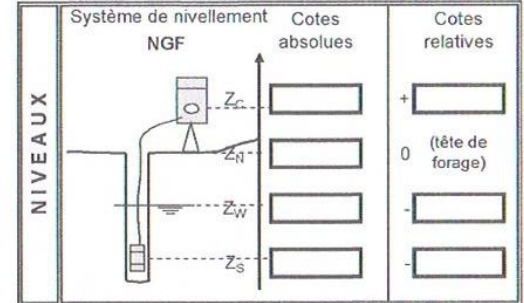
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SRL 110

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE				TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63			Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence		
	Longueur	Gaine				Jumelée		Densité γ_l/γ_w		Pression d'étalonnage p_{et} (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc			Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE			
	370 mm	Structure renforcée					Compressibilité λ_g (m ⁻¹)		Référence		
	Type	Structure métallique					CARACTERISTIQUES MEMBRANE				
	E	Lamelles métalliques			Référence fournisseur		Diamètre intérieur du tube d_i (mm)				
	G	Tube fendu			Etalonnage p_m (MPa)		Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)				
							Volume de la sonde V_s (cm ³)				

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,100	5,6	5,0	6,0	14				
2	0,200	7,0	7,0	8,0	15				
3	0,300	9,0	9,0	11,0	16				
4	0,400	13,0	13,0	17,0	17				
5	0,500	33,0	33,0	39,0	18				
6	0,600	54,0	54,0	55,0	19				
7	0,800	79,0	79,0	84,0	20				
8	0,1000	109,0	109,0	122,0					
9	1,200	172,0	172,0	194,0					
10	1,400	435,0	438,0	486,0					
11	1,600	399,0	399,0	384,0					
12	1,800	440,0	440,0	491,0					
13	2,000	557,0	557,0	616,0					



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type diamètre (mm)
	Niveau pied de tubage (m)	
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m) à ... (m) Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

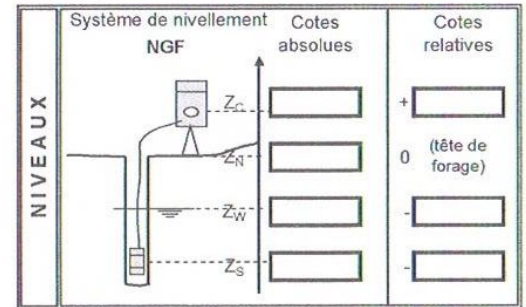
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
Forage		sl 2-12 m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ/γ_w	Pression d'étalonnage p_d (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE	
370 mm	Structure renforcée		Compressibilité λ_g (m ⁻¹)			Référence	Diamètre intérieur du tube d_i (mm)	
Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Volume de la sonde V_s (cm ³)		
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)					

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,100	80,0	70,0	185,0	14				
2	0,200	144,0	144,0	259,0	15				
3	0,300	269,0	269,0	266,0	16				
4	0,400	273,0	273,0	275,0	17				
5	0,500	280,0	280,0	282,0	18				
6	0,800	310,0	310,0	313,0	19				
7	1,100	390,0	350,0	355,0	20				
8	1,400	396,0	396,0	407,0					
9	1,700	495,0	495,0	478,0					
10	2,000	544,0	544,0	595,0					
11									
12									
13									



FORAGE	Système de localisation	X =	
		Y =	
	Atelier de forage		
	Méthode de forage		
	(abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type	
	diamètre (mm)		
Niveau pied de tubage (m)			
Fluide d'injection			
Passe de forage	de ... (m)		
	à ... (m)		
	Terminée à		

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - تلمسان
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**

Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4

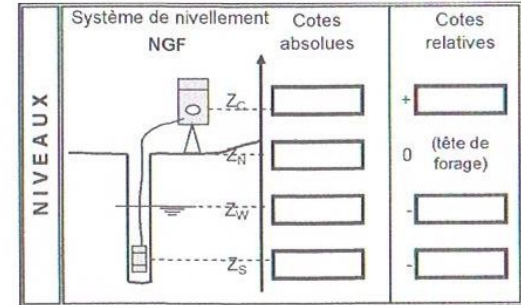
- DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
Forage	SP2 - 13 m	

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES			ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ/γ_w	Pression d'étalonnage p_{01} (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE	
370 mm	Structure renforcée		Compressibilité λ_g (m ⁻¹)			Référence	Diamètre intérieur du tube d_i (mm)	
Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)	Volume de la sonde V_s (cm ³)	
E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur					
G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)					

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,050	60,0	60,0	71,0	14				
2	0,100	80,0	80,0	97,0	15				
3	0,150	130,0	130,0	145,0	16				
4	0,200	176,0	176,0	197,0	17				
5	0,250	213,0	213,0	216,0	18				
6	0,300	210,0	210,0	220,0	19				
7	0,500	230,0	230,0	231,0	20				
8	0,700	240	240	242,0					
9	0,900	250,0	250,0	254,0					
10	1,100	264,0	264,0	267,0					
11	1,500	297,0	297,0	302,0					
12	1,900	370,0	370,0	386,0					
13	2,300	477,0	477,0	557,0					



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type diamètre (mm)
	Niveau pied de tubage (m)	
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m) à ... (m) Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا - Faculté de Technologie
 Département de Génie Civil

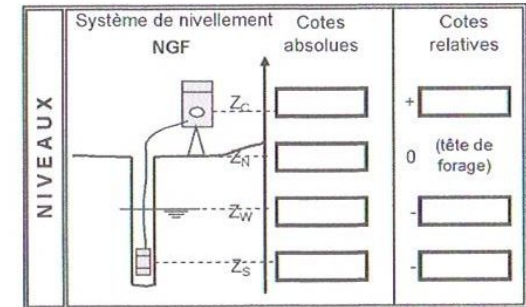
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP02 - 14m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE			TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE	
	Référence	44-gc3-c-63		Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence	
	Longueur	Gaine			Jumelée		Densité γ/γ_w		Pression d'étalonnage p_d (MPa)
	210 mm	Caoutchouc		Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE		
	370 mm	Structure renforcée				Compressibilité λ_g (m ⁻¹)		Référence	
	Type	Structure métallique		CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Diamètre intérieur du tube d_i (mm)	
	E	Lamelles métalliques		Référence fournisseur			Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
	G	Tube fendu		Etalonnage p_m (MPa)			Volume de la sonde V_s (cm ³)		

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,050	75,0	75,0	80,0	14				
2	0,100	118,0	118,0	131,0	15				
3	0,150	148,0	148,0	169,0	16				
4	0,200	210,0	210,0	229,0	17				
5	0,250	237,0	237,0	239,0	18				
6	0,300	240,0	240,0	243,0	19				
7	0,500	251,0	251,0	252,0	20				
8	0,700	259,0	259,0	260,0					
9	0,900	273,0	273,0	276,0					
10	1,100	299,0	299,0	301,0					
11	1,500	342,0	341,0	359,0					
12	1,900	430,0	430,0	486,0					
13									



FORAGE	Système de localisation	X =	
		Y =	
	Atelier de forage		
	Méthode de forage		
	(abréviations du tableau C)		
	Outil de forage	type	
		diamètre (mm)	
Niveau pied de tubage (m)			
Fluide d'injection			
Passe de forage	de ... (m)		
	à ... (m)		
	Terminée à		

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان - Tlemcen
 كلية التكنولوجيا
 Département de Génie Civil

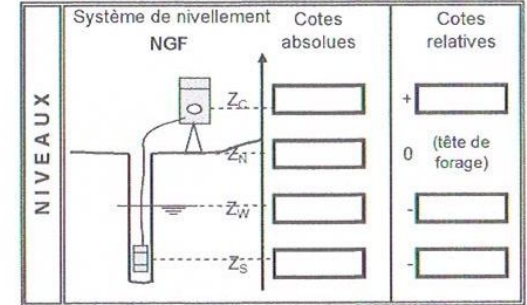
**PROCES VERBAL - ESSAI
 PRESSIOMETRIQUE MENARD**
 Essai d'expansion en forage conforme à la norme NF
 EN ISO 22476-4
 - DONNEES -

SITE	Dossier	PFE Master 2 VOA
	Client	Département GC
	Nom du chantier	Chetouane - Tlemcen
	Localisation / réf. Plan	
	Forage	SP2-15m

SONDE	CARACTERISTIQUES SONDE				TUBULURES ET FLUIDES				ETALONNAGE		
	Référence	44-gc3-c-63			Type	Coaxiale	Liquide	Nature	Référence		
	Longueur	Gaine				Jumelée		Densité γ_l/γ_w		Pression d'étalonnage p_d (MPa)	
	210 mm	Caoutchouc			Longueur totale (m)	Gaz	Nature	CALIBRAGE			
	370 mm	Structure renforcée					Nature		Référence		
		Structure métallique					Compressibilité λ_g (m ⁻¹)		Diamètre intérieur du tube d_i (mm)		
	Type	Lamelles métalliques			CARACTERISTIQUES MEMBRANE				Coefficient de calibrage a (cm ³ /MPa)		
	E	Tube fendu			Référence fournisseur					Volume de la sonde V_s (cm ³)	
	G				Etalonnage p_m (MPa)						

ESSAI	Référence de l'essai	
	Date et heure	
	Unité de contrôle (CPV)	
	Enregistreur	
	Opérateur(s)	
	Pression différentielle	
	Observations (temps, etc)	

DONNEES BRUTES									
Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)			Palier	PRESSIONS p_r (MPa)	VOLUMES V_r (cm ³)		
		15 s	30 s	60 s			15 s	30 s	60 s
1	0,100	15,0	15,0	17,0	14				
2	0,200	19,0	19,0	20,0	15				
3	0,300	22,0	22,0	23,0	16				
4	0,400	24,0	24,0	25,0	17				
5	0,500	26,0	26,0	27,0	18				
6	0,700	29,0	29,0	31,0	19				
7	0,900	33,0	33,0	37,0	20				
8	1,100	46,0	46,0	49,0					
9	1,300	72,0	72,0	75,0					
10	1,500	102,0	102,0	124,0					
11	1,700	156,0	156,0	182,0					
12	1,900	219,0	219,0	249,0					
13									



FORAGE	Système de localisation	X =
		Y =
	Atelier de forage	
	Méthode de forage	
	(abréviations du tableau C)	
	Outil de forage	type diamètre (mm)
	Niveau pied de tubage (m)	
Fluide d'injection		
Passe de forage	de ... (m) à ... (m) Terminée à	

UNITES	Hauteurs	mètre	m
	Temps	seconde	s
	Volumes	centimètre cube	cm ³
	Pressions	Mégapascal	MPa

Références bibliographiques

- [AFN 99] AFNOR, Essai Pressiométrique Ménard, Partie 2 : essai avec cycle, Norme NF P.94-110-2, Paris La Défense, 1999.
- [AFN 00] AFNOR Essai Pressiométrique Ménard, Partie 1 : essai sans cycle, Norme NF P.94-110-2, Paris La Défense, 2000.
- [AFN 02] AFNOR, Essai dilatométrique en forage, Normes Expérimentales, XP P 94-443-1(essai avec cycle) et P 94-443-2 (essai de fluage après le premier cycle), Saint Denis La Plaine, 2002
- [AIJ 98] Ajjaloeian R. & H.S. Yu, Effects of pressuremeter geometry on the results of tests in sand, Geotechnical Site Characterisation, Robertson and Mayne eds, Balkema, Rotterdam, 1998.
- [AMA 83] Amar S., F. Baguelin, J. Jezequel & A. Le Méhauté, A new seabed soil survey device : the LPC pressiopenetrometer, Actes du VIII^e Congrès Régional Asiatique de la SIMSTF, Balkema, Rotterdam, 1983.
- [AMA 91] Amar S., B. Clarke, M. Gambin & T. Orr), Utilisation des résultats des essais pressiométriques pour le dimensionnement des fondations en Europe, Etat des connaissances par la CTRE N°4, Société Internationale de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Balkema, Rotterdam, 1991.
- [ASC 93] ASCE Bearing Capacity of Soils, Technical Engineering and Design Guides, ASCE Press, New-York, 1993.
- [AST 00] ASTM, Standard test method for pressuremeter testing of soil D4719, Vol. 04-08, Annual book of ASTM Standards, W. Conshohocken, Pennsylvania, 2000.
- [AUB 82] Aubry D., J.C. Hujeux, F. Lassoudière & Y. Meimon, A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour, Int. Symp. Num. Mod. Geomech., Balkema, 1982.
- [BAG 72] Baguelin F., J. Jezequel, E. Lemée & A. Le Mehauté, L'essai d'expansion cylindrique et la loi effort / déformation des sols purement cohérents, VI^e Congrès International de Rhéologie, Lyon 4-8 Sept., tome VI, p.239, 1972.
- [BAG 73] Baguelin F. & J. Jezequel, Le pressiomètre autoforeur, Annales de l' ITBTP, N°307-308,

Juillet – Août (Série Sols et Fondations N°97, p.133-160), 1973.

[BAG 75] Baguelin F., R. Frank & J. Jezequel, Quelques résultats théoriques sur l'essai d'expansion dans les sols et sur le frottement latéral des pieux, Bull. Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées N° 78, 1975.

[BAG 78] Baguelin F., J. Jezequel & D. Shields, The Pressuremeter and foundation engineering, Transtech Publications, Clausthal, Allemagne, 1978.

[BAH 95] Bahar R. & B. Cambou, Forecast of creep settlements on heavy structures using pressuremeter tests, Computers and Geotechnique, Vol. 17, 1995

[BAK 93] Baker C., Use of pressuremeter in mixed high rise Foundation Design, dans Design and Performance of Deep Foundations, ASCE Geot. Sp. Publ. N° 38, New-York, 1993.

[BAL 95] Balivy G., coordonnateur, Le pressiomètre et ses nouvelles orientations, CIP4, A. A. Balkema, 1995

[BEN 86] Benoît J. & G. Wayne Clough, Principal stresses derived from self boring pressuremeter tests in soft clay, IInd International Symposium on the Pressuremeter, ASTM, STP N°950, Philadelphia, 1986.

[BEN 95] Benoît J., Advances in pressuremeter technology with specific reference to clays, The pressuremeter and its new avenues (4CIP), A.A. Balkema, Rotterdam, 1995.

[BGS 90] Pressuremeters (ISP3), Thomas Telford, London, 1990.

[BIS 45] Bishop R.F., Hill R.& Mott N.F., The theory of indentation and hardness test, Proc. Physical Society, London N°57, 1945

[BRI 94] Briaud J.L. & R.M. Gibbons, Predicted and Measured Behavior of Five Spread Footings on Sand, ASCE Geotech. Special Publication No.41, 1994.

[BRI 99] Briaud J.-L. & R. M. Gibbens, Behavior of Five Large Spread Footings in Sand, Journ. of Geotechn. and Geoenviron. Engineering, Vol 125, No. 9, Sept 1999

[BRI 03] Briaud J.-L. , K. Hossain, J. Barfknecht, Méthode de détermination de la courbe charge-tassement pour les fondations superficielles dans les sables, Revue Française de Géotechnique, N°105, 4ème trimestre 2003.

- [BUF 90] Buffi G., Craie pâtreuse, comparaison d'essais de fluage, Mémoire Soc. Géol. France N.S., N° 157, 1990.
- [CAM 88] Cambou B. & K. Jafari, Modèle de comportement des sols non cohérents, Revue Française de Géotechnique N°44, 1998.
- [CAM 89] Cambou B. & A. Boubanga, Press'ident, un logiciel d'aide à la caractérisation des sols à partir de l'essai pressiométrique, Actes des Journées Universitaires de Génie Civil, Rennes, 1989.
- [CAM 93] Cambou B. & R. Bahar, Utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification des paramètres intrinsèques du comportement d'un sol, Revue Française de Géotechnique N°62, Paris, 1993.
- [CAS 66] Cassan M., Le tassement des pieux, synthèses des recherches récentes, Sols Soils N° 19-20 et 21, Paris, 1966.
- [CLA 92] Clarke B.G. & A. Smith, A model specification for radial displacement measuring pressuremeters, Ground Engng, Vol. 25, N°2, p.28-38, 1992.
- [COM 96] Combarieu O., A propos de la détermination de l'angle de frottement des sols pulvérulents au pressiomètre, Revue Française de Géotechnique n°77, 1996.
- [COR 81] Cordary D., M. Gambin & A. Van Wambeke, Prévision des tassements à l'aide du pressiomètre, Actes du X^e CIMSTF, Vol N°1, A.A. Balkema, 1981.
- [DEB 98] Debats J. M., R. Frank, M. Gambin, P. Savasta, The Menard Pressuremeter for Quality Control of Soil Densification, Geotechnical Site Characterisation (ISC'98), A. A. Balkema, Rotterdam, 1998.
- [DUN 70] Duncan J.M. & C.V. Chang, Non Linear Analysis of Stress and Strain in Soils, ASCE J. of Soil Mech., Vol. 96, SM5, 1970.
- [FAH 90] Fahey M. & R.J. Jewell, Effect of pressuremeter compliance on measurement of shear modulus, Pressuremeters (ISP3), Thomas Telford, London, 1990.
- [FRA 74] Frank R., Etude théorique du comportement des pieux sous charge verticale, introduction de la dilatance, Rapport de recherche N°46, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1974.
- [FRA 82] Frank R. & S.R. Zhao, Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement

sous charge axiale des pieux forés dans les sols fins, Bull. Liaison LPC, N° 119, Paris, 1982.

[FHW 89] FHWA The Pressuremeter Test for Highway Applications, US Dept. of Transportation, McLean, VA, 1989 (+ cassette vidéo).

[GAM 63] Gambin M., Calcul du tassement d'une fondation profonde en fonction des résultats pressiométriques, Sols Soils N° 7, Paris, 1963.

[GAM 90] Gambin M., The history of pressuremeter practice in France, « Pressuremeters » (ISP3), Thomas Telford, Londres, 1990.

[GAM 95a] Gambin M. & O. Plot, L'enregistrement des données au pressiomètre Ménard : un outil puissant de contrôle qualité et de formation du personnel, Le pressiomètre et ses nouvelles orientations (CIP4) A. A. Balkema, Rotterdam, 1995.

[GAM 95b] Gambin M., Le pressiomètre Ménard , un excellent outil de contrôle de l'amélioration des sols, Première Journée Louis Ménard, CFMS , 22 Novembre 1995.

[GAM 96] Gambin M., E. Flavigny & M. Boulon, Le module pressiométrique : Historique et modélisation, CR 11^e Colloque Franco-Polonais en Mécanique des Sols et des Roches Appliquée, Gdansk, Pologne, 1996

[GAM 97] Gambin M. Le compactage profond des sables, idées de base, Ground Improvement Geosystems, M. C. R. Davies & F. Schlosser E ditors, Thomas Telford, London 1997

[GAM 98] Gambin. M & J. Jezequel , A new approach to the Ménard PMT parameters, Geotechnical Site Characterisation (ISC'98), A.A. Balkema, Rotterdam, 1998.

[GAM 02] Gambin M., A. Correia, A. Antaõ, Validité de la mesure du module dans le domaine de petites aux moyennes déformations par essai de chargement in situ. PARAM 2002, Presses des Ponts, Paris, 2002.

[GIB 61] Gibson R.E. & W.F. Anderson, In situ measurement of soil properties with the pressuremeter, Civil Engineering, London, May, 1961.

[HAB 97] Haberfield C.M., Pressuremeter testing in weak rock and cemented sands, Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng., Vol. 125, p.168-178, 1997.

[HAR 74] Hartman J.P., Finite Element Parametric Study of Vertical Strain Influence Factors and the Pressuremeter Test to Estimate the Settlement of Footings in Sand, Ph. D. Dissertation, University

of Florida, 1974.

[HIC 95] Hicher P.Y. & A. Michali, Utilisation du pressiomètre pour l'identification des paramètres d'un modèle élasto-plastique, Le Pressiomètre et ses nouvelles orientations (CIP4), A.A. Balkema, Rotterdam, 1995.

[HIL 50] Hill R., The mathematical theory of plasticity, Oxford University Press, New-York, 1995.

[HOL 88] Houlsby G.T. & N.J. Withers, Analysis of the cone pressuremeter in clay, Geotechnique, London Vol. 38/4, 1988.

[HOL 93] Houlsby G.T. & J.P. Carter, the effects of pressuremeter geometry on the results of tests in clay, Geotechnique Vol. 43, N°4, 1993.

[HUG 77] Hughes J.M.O., Wroth C.P., Windle D., Pressuremeter tests in sands, Geotechnique, London, Vol. 27/4, 1977.

[HUG 85] Hughes J.M.O. & P.K. Robertson, Full displacement pressuremeter testing in sand, Can. Geotechnical Journal Vol. 22 p.298-307, 1985.

[KOG 33] Kögler F., Baugrundprüfung in Bohrloch, Bauingenieur, Cahier 19/20, Berlin., 1933.

[LAD 61] Ladanyi B., Etude théorique et expérimentale de l'expansion dans un sol pulvérulent d'une cavité présentant une symétrie cylindrique ou sphérique, Annales des Travaux Publics de Belgique, Bruxelles, N° 2 et 4, 1961.

[LAI 73] Laier J., Effects of Pressuremeter Probe Length / Diameter Ratio and Borehole Disturbance on Pressuremeter Tests Results in Dry Sand, Ph. D. Dissertation, University of Florida, 1973.

[LAM 52] Lamé G., Leçons sur la théorie mathématique de l'élasticité des corps solides, Bachelier, Paris, 1852.

[LCP 72] LCPC-SETRA, Fondations courantes d'ouvrages d'art « FOND 72 », 1972.

[LCP 85] LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Recommandations pour le choix des paramètres de calcul des écrans de soutènement par la méthode aux modules de réactions, LCPC Paris, 1985.

[LCP 94] LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Les logiciels du réseau des LPC, LCPC Paris, 1994.

- [LIV 71] Livneh M., M. Gellert & S. Uzan, Determination of the Elastic Modulus of Soil, by the Pressuremeter Test, Theoretical Background, Journal of Materials, Vol. 6, N°2, p.348-355, 1971.
- [MAI 87] Mair R.J. & D.M. Wood, Pressuremeter Testing, methods and interpretation, A CIRIA Ground Engineering Report, Butterworths, London, 1987.
- [MAN 89] Mannassero M., Stress strain relationships from drained self boring pressuremeter tests in sand, Geotechnique Vol. 39, N°2, p.293-308, 1989.
- [MEL 71] M.E.L. Ministère de l'Équipement et du Logement, Essai Pressiométrique Normal, Série des Modes Opératoires du LCPC, Dunod, Paris, 1971.
- [MEL 93] MELT, Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Fascicule 62, titre V du CCTG, Imprimerie des Journaux Officiels (il existe une version plus maniable du document, au format B5 chez Eyrolles Editeur à Paris), 1993.
- [MEN 55] Ménard L., Le Pressiomètre, (en coopération avec H. Gonin et A. Gauthiez) Travail de fin d'étude, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1955.
- [MEN 61] Ménard L., Influence de l'amplitude et de l'histoire d'un champ de contraintes sur le tassement d'un sol de fondation, Actes du Ve Congrès International de la SIMSTF, Balkema, Rotterdam, 19961.
- [MEN 62] Ménard L., Comportement d'une fondation profonde soumise à des efforts de renversement, Sols Soils N°3, 1962.
- [MEN 62] Ménard L. & J. Rousseau, L'évaluation des tassements, tendances nouvelles, Sols Soils N°1, Paris, 1962.
- [MEN 63] Ménard L., Calcul de la force portante des fondations sur la base des résultats des essais pressiométriques, Sols Soils N°5 & 6, Paris, 1963.
- [MEN 64] Ménard L., G. Bourdon & A. Houy, Etude expérimentale d'un rideau en fonction des caractéristiques du sol de fondation, Sols Soils N°9, 1964.
- [MEN 75] Ménard L, Interpretation and Application of Pressuremeter Tests Results to Foundation Design, Sols Soils N°26, Paris (connu en français sous le nom de brochure D60), 1975.
- [MON 90] Monnet J., Theorical study of elasto – plastic equilibrium around pressuremeters in sand, Pressuremeters (ISP3), Thomas Telford, Londres, 1990.

[MON 95] Monnet J, Analyse théorique et expérimentale de l'équilibre élastoplastique d'un sol cohérent autour du pressiomètre, Le Pressiomètre et ses nouvelles orientations (CIP4), AA Balkema, 1995.

[MON 94] Monnet J. & J. Khlif, ,Etude théorique de l'équilibre élasto-plastique d'un sol pulvérulent autour du pressiomètre, Revue Française de Géotechnique N°67, Paris, 1994.

[MON 95] Monnet J. & T. Chemaï, Etude théorique et expérimentale de l'équilibre élastoplastique d'un sol cohérent autour du pressiomètre, Revue Française de Géotechnique, N°73, 1995.

[MON 97] Monnet J.& C. Biard, l'essai pressiométrique et la détermination des caractéristiques d'élasticité et de cisaillement, Actes du XIV^e Congrès International SIMSG, A. A. Balkema, Rotterdam, Tome I, 1997.

[MOR 55] Mori H. & Y. Toyooka, New self contained, computer controlled pressuremeter, "The Pressuremeter and its new avenues" (ISP4), A.A. Balkema, 1955.

[MOR 99] Mori K. Communication personnelle 1999

[SAL 66] Salençon J., Expansion quasi statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu élastoplastique, Annales des Ponts et Chaussées, Paris vol.163, n°III, Mai-Juin, 1966.

[SAL 97] Salgado R., J.K. Mitchell & M. Jamiolkowski, Cavity expansion and penetration resistance in sand, ASCE J. of Geotech. Eng., Vol. 123, N° 4, 1997.

[SHA 95] Shahrour I., A. Kasdi & N. Abriak, Utilisation de l'essai pressiométrique pour la détermination des propriétés mécaniques des sables obéissant au critère de Mohr-Coulomb avec une règle d'écoulement non associée, Revue Française de Géotechnique, N°73, 1995.

[SIM 87] SIMR, Suggested Method for deformability determination, using a flexible dilatometer, International Journal Rock Mechanics and Mining Science Vol. 24, N°2, 1987.

[SKE 53] Skempton A.W., A.A. Yassin & R.E. Gibson , Théorie de la force portante des pieux dans le sable, Annales de l' ITBTP, N°63-64, Paris, 1953.

[SUK 63a] Suklje L., I. Sovinc, An Applied Analysis of Distortional Displacement of Normally Consolidated Clays, ECSMFE, Wiesbaden, 1963.

[SUK 63b] Suklje L. & I. Sovinc, Fondations de réservoirs cylindriques métalliques sur un terrain

compressible (en serbo-croate) Gradevinar, Vol XV, N°5-6, 1963.

[TAN 94] Tand K. E., E. Funegard, P Warden, Footing Load Tests on Sand, Settlement '94, ASCE Geotechnical Specialty Publication No. 40, Vol 1, 1994.

[TER 48] Terzaghi K. & R. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley New York, 1948 (traduction en français chez Eyrolles, 1961)

[TRA 46] Tranter C., On the elastic distortion of a cylindrical hole by localised hydrostatic pressure, Quarterly of Applied mathematics (QAMA) Vol. 4, N°3, p.298-302, 1946.

[VEI 77] Vesi A.S., Design of Pile Foundations, U.S. Transportation Research Board, NCRP Synthesis N°42, Washington D.C, 1977.

[WAS 76] Waschkowski. E, Contribution à l'étude du comportement du sol autour d'une sonde pressiométrique et d'un pieu chargé verticalement, Mémoire pour le diplôme d'Ingénieur CNAM, Paris, 1976.

[WRO 72] Wroth C.P. & J.M.O. Hughes, An instrument for the in situ measurement of the properties of soft clays, CUED/C, University of Cambridge, 1972.

[WRO 75] Wroth C.P. & D. Windle, Analysis of the pressuremeter test allowing for volume change, Geotechnique, London, Vol. 25/3, 1975.

[WRO 82] Wroth C.P., British experience with the self boring pressuremeter, Symposium on the pressuremeter and its marine applications, Editions Technip, Paris, 1982.

[Yu 74] Yu H.S., State parameter from self boring pressuremeter tests in sand, Journal Geotechnique Engng (ASCE) Vol. 120/12, 1974.

BORNAREL B. (1999). Fondations superficielles sur pente et essai pressiométrique. Thèse de doctorat. Insa Lyon.

BOUBANGA A. (1990). Identification de paramètres de comportement à partir de l'essai pressiométrique.

CASSAN M. (1988). Les essais in situ en mécanique des sols. Tome 1. Edition Eyrolles.

FRANCK R., ZHAO S.R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans les sols fins.

GAMBIN M. (1963). Calcul du tassement d'une fondation profonde en fonction des résultats des essais pressiométriques.

HADDAOUDOU HAKIMA ET HADDAR LYNDIA, (1997), Etude Des Propriétés Des Argiles Au Pressiomètre Menard Et Calcul Des Fondations Superficielles.

HARDIN B.O. (1978). The nature of stress strain behavior for soils, in earthquake engineering and soil dynamics (vol 1).

TERZAGHI K. (1955). Evaluation of coefficients of subgrade reaction, geo technique, vol. 5.

VAN WAMBEKE A., D'HEMRICOURT J. (1982), Correlation between the results of static and dynamic probings and pressuremeter tests, Pro. 2nd eur.

ZENTAR R. (1999). Analyse inverse des essais pressiométriques application à l'argile de saint herblain.