

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE POPULAIRE ET DÉMOCRATIQUE

Ministère De l'Enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

Faculté Du Génie De La Construction

Département De Génie Civil



Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme MASTER

Option : Géotechnique et Environnement.

Spécialité : Génie civil

Présenté par :

M^{elle} IBRAÏNE Kahina

Thème

**Analyse numérique de l'essai pressiométrique
«Application à l'identification des paramètres des sols»**

Devant le jury :

M^{me} HAMMOUM Karima

Professeur

UMMTO

Présidente

M^{elle} BELAHASSANI Ouarda

Maitre assistante

UMMTO

Promotrice

M^{elle} BOUBRIT Hassiba

Maitre assistante

UMMTO

Examinatrice

Soutenu le 01/07/2015

REMERCIEMENTS

A travers cette page, je présente mes sincères remerciements à M^{elle}. BELHASSANI Ouarda, enseignante à l'université de Mouloud MAMMARI de TIZI OUOU d'avoir acceptée de m'encadrer, d'orienter mes pas dans l'élaboration de cette étude, d'avoir mis à ma disposition toute son attention et les documents nécessaires à l'élaboration de ce modeste travail. De n'avoir pas lésiné sur son temps de travail pour prodiguer ses précieux conseils.

Je suis honoré par la présence de Mme HAMMOUM Karima et Melle BOUBRIT Hassiba, enseignantes à l'université de MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, qu'elles trouvent l'expression de mes remerciements pour avoir accepté d'honorer de leurs présences le jury et d'accepter d'examiner ce modeste travail.

Je tiens enfin à remercier toutes les personnes qui ont contribué de prêt ou de loin à la réussite de ce mémoire.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 Diamètres des forages pour le pressiomètre

Tableau I.2 : valeur de σ_{vm} suivant la nature du sol (Baguelin et al ,1978)

Tableau I.3 : Classification selon le rapport (E_M/ P_L)

Tableau I.4 : Classification Des Sols Suivant PL

Chapitre IV

Tableau IV.1 : paramètres de sol

Chapitre V

Tableau V.1 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 4 m.

Tableau V.2 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

Tableau V.3 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 6 m

Tableau V.4 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 7 m

Tableau V.5 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8m

Tableau V.6 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

Tableau V.7 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 4 m

Tableau V.8 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

Tableau V.9 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 6 m

Tableau V.10 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 7 m

Tableau V.11 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8 m

Tableau V.12 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

Tableau V.13 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 1 m

Tableau V.14 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 2 m

Tableau V.15 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 3 m

Tableau V.16 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

Tableau V.17 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8 m

Tableau V.18 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

Tableau V.19 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 12 m

Tableau V.20 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 13 m

Tableau V.21 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 1 m

Tableau V.22 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 3 m

Tableau V.23 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 4 m

Tableau V.24 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

Tableau V.25 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 6 m

Tableau V.26 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 7 m

Tableau V.27 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8 m

Tableau V.28 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

Tableau V.29 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 10 m

Tableau V.30 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 11 m

Tableau V.31 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 12 m

Tableau V.32 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 13 m

Tableau IV.33 : Classification de sol, point1, (Norme Ménard)

Tableau IV.34 : classification de sol, point2, (Norme Ménard)

Tableau IV.35: Classification de sol, point1, (Norme Ménard)

Tableau IV.36 : Classification de sol, point2, (Norme Ménard)

Chapitre VI

Tableau VI.1 : Paramètres de courbes simulées à 4m, Tizi Ouzou

Tableau VI.2 : Paramètres de courbes simulées à 5m, Tizi Ouzou

Tableau VI.3 : Paramètres de courbes simulées à 6m, Tizi Ouzou

Tableau VI.4 : Paramètres de courbes simulées à 7m, Tizi Ouzou

Tableau VI.5 : Paramètres de courbes simulées à 9m, Tizi Ouzou

Tableau VI.6 : Paramètres de courbes simulées à 4 m, point 2, Tizi Ouzou

Tableau VI.7 : Paramètres de courbes simulées à 5m, point 2, Tizi Ouzou

Tableau VI.8 : Paramètres de courbes simulées à 6m, point 2, Tizi Ouzou

Tableau VI.9 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point 2, Tizi Ouzou

Tableau VI.10 : Paramètres de courbes simulées à 8m, point 2, Tizi Ouzou

Tableau VI.11 : Paramètres de courbes simulées à 9m, point 2, Tizi Ouzou

Tableau VI.12 : Paramètres de courbes simulées à 1m, point 1, Bejaia

Tableau VI.13 : Paramètres de courbes simulées à 2m, point 1, Bejaia

Tableau VI.14 : Paramètres de courbes simulées à 3m, point 1, Bejaia

Tableau VI.15 : Paramètres de courbes simulées à 6m, point 1, Bejaia

Tableau VI.16 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point 1, Bejaia

Tableau VI.17 : Paramètres de courbes simulées à 8m, point 1, Bejaia

Tableau VI.18 : Paramètres de courbes simulées à 9m, point 1, Bejaia

Tableau VI.19 : Paramètres de courbes simulées à 10m, point 1, Bejaia

Tableau VI.20 : Paramètres de courbes simulées à 11m, point 1, Bejaia

Tableau VI.21 : Paramètres de courbes simulées à 12m, point 1, Bejaia

Tableau VI.22 : Paramètres de courbes simulées à 13m, point 1, Bejaia

Tableau VI.23 : Paramètres de courbes simulées à 1m, point2, Bejaia

Tableau VI.24 : Paramètres de courbes simulées à 2m, point2, Bejaia

Tableau VI.25 : Paramètres de courbes simulées à 3m, point2, Bejaia

Tableau VI.26 : Paramètres de courbes simulées à 4m, point2, Bejaia

Tableau VI.27 : Paramètres de courbes simulées à 5m, point2, Bejaia

Tableau V.28 : Paramètres de courbes simulées à 6m, point2, Bejaia

Tableau VI.29 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point2, Bejaia

Tableau VI.29 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point2, Bejaia

Tableau VI.31 : Paramètres de courbes simulées à 13m, point2, Bejaia

Tableau VI.32 : identification de Cu à différentes profondeurs du point1, Tizi Ouzou

Tableau VI.33 : identification de G à différentes profondeurs du point1, Tizi Ozou

Tableau VI.34 : identification de Cu à différentes profondeurs du point2, Tizi Ozou

Tableau VI.35 : identification de G à différentes profondeurs du point2, Tizi Ozou

Tableau VI.36 : identification de Cu à différentes profondeurs du point1, Bejaia

Tableau VI.37 : Identification de G à différentes profondeurs du point1, Bejaia

Tableau VI.38 : Identification de Cu à différentes profondeurs du point2, Bejaia

Tableau V.39 : Identification de G à différentes profondeurs du point2, Bejaia

Tableau VI.40 : Identification de Cu à différentes méthode, site Tizi Ouzou

Tableau VI.41 : Identification de Cu à différentes méthode, site Bejaia

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Pressiomètre

Figure I.2: Schéma de principe de l'essai pressiométrique Ménard

Figure I.3 : Contrôleur pression-volume

Figure I.4: Tubulure de liaison

Figure I.5: Pressiomètre avec forage préalable - Courbe d'expansion type

Figure I.6: Courbe de fluage pressiométrique.

Figure I.7 : profil pressiométrique de Ménard

Figure I.8 : Allure d'une courbe pressiométrique obtenue à partir d'essai réalisé au pressiomètre autoforeur avec les différents paramètres tirés

Figure I.9: Correction de la hauteur piézométrique

Figure I.10 : courbe d'inertie

Figure I.11 : Courbe d'étalonnage

Figure I.11 : Courbe pressiométrique corrigée

Chapitre II

Figure II.1: méthode de dérivation de la courbe pressiométrique avec lissage de la courbe

Figure II.2 : Méthode de dérivation de la courbe pressiométrique avec lissage de la courbe

Figure II.3: méthode de Carrère

Chapitre III

Figure III.1 : Procédé général de résolution des problèmes en géotechnique selon FLAC^{2D}

Figure III.2 : Critère de rupture de Mohr-Coulomb dans FLAC, d'après ITASCA

Figure III.3 : Critère de rupture dans le plan Mohr-Coulomb

Chapitre IV

Figure IV.1 : Equilibre d'un élément de sol en déformation plane.

Figure IV.2: Conditions aux limites

Figure IV.3 : Conditions aux limites, modèle Mohr-Coulomb

Figure IV.4 : le vecteur déplacement (FLAC)

Figure IV.5 : Le déplacement au niveau de grillage

Figure IV.6 : Courbe pressiométrique

Figure IV.7 : Influence de l'angle de frottement

Figure IV.8 : Influence de module de Young E

Figure VI.9 : Influence de la cohésion

Chapitre V

Figure V.1 : Courbe expérimentale, brute et corrigé à 4 m

Figure V.2 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Figure V.3 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 6 m

Figure V.4 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 7 m

Figure V.5 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Figure V.6 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Figure V.7 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 4 m

Figure V.8 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Figure V.9 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 6 m

Figure V.10 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 7 m

Figure V.11 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Figure V.12 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Figure V.13 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 1 m

Figure V.14 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 2 m

Figure V.15 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 3 m

Figure V.16 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Figure V.17 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Figure V.18 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Figure V.19 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 12 m

Figure V.20 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 13 m

Figure V.21 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 1 m

Figure V.22 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 3 m

Figure V.23 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 4 m

Figure V.24 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Figure V.25 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 6 m

Figure V.26 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 7 m

Figure V.27 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Figure V.28 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Figure V.29 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 10 m

Figure V.30 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 11 m

Figure V.31 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 12 m

Figure V.32 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 13 m

Figure 33 : Pression limite Pl, point1

Figure 33 : Pression limite Pl, point1

Figure 35: Module pressiometrique Ep, point1

Figure 36: Module pressiometrique Ep, point 2

Figure 37: Pression limite Pl, point1

Figure 38: Pression limite Pl, point2

Figure 39: Module pressiometrique Ep, point 2

Figure 40: Module pressiometrique Ep, point 2.

Chapitre VI

Figure VI.1 : Courbe simulée à 4m point1.

Figure VI.2 : Courbe simulée à 5m point1.

Figure VI.3 : Courbe simulée à 6m point1.

Figure VI.4 : Courbe simulée à 7m point1

Figure VI.5 : Courbe simulée à 9m point1.

Figure VI.6 : Courbe simulée à 4m point 2.

Figure VI.7 : Courbe simulée à 5m point 2.

Figure VI.8 : Courbe simulée à 6m point 2.

Figure VI.9 : Courbe simulée à 7m point 2.

Figure VI.10 : Courbe simulée à 8m point 2.

Figure VI.11 : Courbe simulée à 9m point 2.

Figure VI.12 : Courbe simulée à 1m point1.

Figure VI.13 : Courbe simulée à 2m point 1.

Figure VI.14 : Courbe simulée à 3m point 1.

Figure VI.15 : Courbe simulée à 6m point 1.

Figure VI.16 : Courbe simulée à 7m point 1.

Figure VI.17 : Courbe simulée à 8m point 1.

Figure VI.18 : Courbe simulée à 9m point 1.

Figure VI.19 : Courbe simulée à 10m point 1.

Figure VI.20: Courbe simulée à 11m point 1.

Figure VI.21 : Courbe simulée à 12m point 1.

Figure VI.22 : Courbe simulée à 13m point 1.

Figure VI.23: Courbe simulée à 1m point 2.

Figure VI.24 : Courbe simulée à 2m point 2.

Figure VI.25 : Courbe simulée à 3m point 2.

Figure VI.26 : Courbe simulée à 4m point 2.

Figure VI.27 : Courbe simulée à 5m point 2.

Figure VI.28 : Courbe simulée à 6m point 2.

Figure VI.29 : Courbe simulée à 7m point 2.

Figure VI.30: Courbe simulée à 8m point 2.

Figure VI.31 : Courbe simulée à 13m point 2.

Figure VI.32 : Cohésion non drainée C_u identifiée au point1 site de Tizi Ozou

Figure VI.33 : Module de cisaillement G au point1, Tizi Ozou

Figure VI.34 : Cohésion non drainée C_u au point2, Tizi Ozou

Figure VI.35 : Module de cisaillement G au point2, Tizi Ozou

Figure VI.36 : Cohésion non drainée C_u au point1, Bejaia

Figure VI.37 : module de cisaillement G au point1, Bejaia

Figure VI.38 : Cohésion non drainée C_u au point2, Bejaia

Figure VI.39 : Module de cisaillement G au point2, Bejaia

Figure VI.40 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Tizi Ouzou, point1

Figure VI.41 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Tizi Ouzou, point2

Figure VI.42 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Bejaia, point1

Figure VI.43 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Bejaia, point2

Liste des principales notations et indices

PFP	Pression avec forage préalable
PAF	Pression auto foreur
PMF	Pressiomètre foncé
E_M	Module presiometrique
PI	Pression limite
σ_t	Résistance a la traction de matériau
τ	Contrainte de cisaillement
G_{p2}	Module de cisaillement sécant à 2% de déformation
G_{p5}	Module de cisaillement sécant à 5% de déformation
β	Coefficient d'identification des sols
K_0	Coefficient des terres au repos
γ_d	Poids volumique du sol sec
ρ	Poids volumique de l'eau
Pf	La pression de fluage
ν	Le coefficient de poisson
V_0	Le volume initial de la sonde au repos
V_m	Volume moyenne dans la phase pseudo-élastique
$\Delta P/\Delta V$	L'inverse de la pente de la partie linéaire de la pente
C_u	La cohésion non drainée
P_M	pression lue sur le ma manomètre.
r_0	Rayon de la cavité cylindrique
P_0	la pression des terres au repos
K	Module de compressibilité
G	Module de cisaillement
ϕ	Angle de frottement
ψ	Angle de dilatance
e	Indice des vides
$\Delta \epsilon^e$	Déformation élastique
ϵ^p	Déformation plastique

Introduction Générale

Avant de réaliser un ouvrage d'une certaine importance, une reconnaissance du sol en place est nécessaire. Cette reconnaissance peut s'effectuer soit avec des essais de laboratoire, soit avec des essais in situ, ou avec les deux types d'essais.

Parmi ces essais, l'essai pressiométrique, qui permet d'appliquer un chargement latéral dans un forage, cet essai a été initié vers les années 1930 par Koegler, mais c'est Louis Ménard qui a développé de façon définitive le pressiomètre à partir de 1957. Cet essai est devenu l'un des essais le plus important, puisqu'il permet de mesurer les caractéristiques mécaniques des sols. Les résultats obtenus sont limités à deux paramètres, la pression limite et le module pressiométrique, qui sont utilisés soit directement pour dimensionner les fondations, soit indirectement (méthode d'interprétations) pour déduire les paramètres intrinsèques du sol.

Notre travail consiste en l'évaluation de quelques paramètres de comportement des sols, en particulier la cohésion non drainée à partir de l'essai pressiométrique. On fait comparer et interpréter la méthode numérique et les méthodes empiriques de Louis Ménard et de Amar et Jezequel.

Le présent travail qu'on a entamé, consiste à modéliser l'essai pressiométrique. Pour cela on a utilisé le code de calcul FLAC^{2D} développé par le groupe ITASCA, ce code est basé sur la méthode des différences finies, il permet de modéliser les problèmes géotechniques.

Ce travail comporte six chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique de l'essai pressiométrique, de son histoire, son développement, les types d'appareils, son mode opératoire, les paramètres déduits de cet essai.

Le deuxième chapitre présente quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique, en vue de déterminer les paramètres de sol.

Le troisième chapitre est une présentation de l'outil numérique, l'écriture d'un fichier exécutable sous FLAC, les modèles de comportement intégrés, et une présentation du problème à modéliser.

Le quatrième chapitre consiste en la modélisation de l'essai pressiométrique. En expliquant les différentes étapes à suivre, ainsi que l'étude de l'influence de quelques paramètres sur la courbe pressiométrique.

Le cinquième chapitre est une présentation des courbes expérimentales de l'essai pressiométrique réalisé dans deux sites différents tout en montrant les différentes corrections faites, ainsi que l'exploitation des résultats obtenues.

Le sixième chapitre est consacré aux résultats de la modélisation numérique de l'essai pressiométrique, en vue d'identifier les paramètres de sol. Cette identification fera l'objet d'une comparaison avec les méthodes empiriques de Louis Ménard et de Amar et Jezequel.

Chapitre I

Présentation de l'essai pressiométrique

Chapitre I

Présentation de l'essai pressiométrique

I.1 Introduction

L'utilisation d'essais de reconnaissance des sols en place est particulièrement développée dans le monde. Ce type d'essai permet en effet de s'affranchir des difficultés de prélèvement, de transport et de conservation des échantillons de sols. Parmi ces essais in-situ, l'essai pressiométrique est aujourd'hui couramment utilisé dans les études de fondations.

Dans cette partie de notre étude, nous allons brièvement rappeler les différents types de pressiomètre existant et les méthodes d'interprétation utilisées pour exploiter cet essai.

I.2 Historique

Sur le plan historique, l'idée de l'essai d'expansion latérale du sol revient à l'Allemand Kögler vers les années 1930, dans le but de mesurer un module de déformation du sol. En raison de la technologie de l'époque, l'appareil n'était pas opérationnel et il a été immédiatement abandonné. C'est en 1957 qu'un jeune ingénieur français, Louis Ménard, a repris l'idée en la perfectionnant au cylindre gonflable de Kögler, il a ajouté deux cellules de garde à la cellule de mesure centrale, en évitant l'expansion de celle-ci vers le forage et rendant ainsi l'essai interprétable. L'appareil est devenu rapidement opérationnel en raison du progrès des cellules constituées de caoutchouc admettant de grandes déformations et surtout l'invention des tubulures de plastique semi-rigides rendant possible la réalisation d'essais en profondeur.

Mais l'apport de Louis Ménard n'était pas uniquement sur le plan technique, mais aussi sur le plan exploitation et interprétation des résultats de l'essai

I.3 Définition de l'essai

L'essai pressiométrique consiste à réaliser l'expansion radiale d'une sonde cylindrique dans un forage exécuté au préalable à une profondeur donnée, sous des contraintes radiales jusqu'à la rupture du sol. Il permet d'obtenir une relation entre les contraintes appliquées et les déplacements horizontaux du forage, ce qui présente un grand avantage par rapport à d'autres essais in-situ, du fait qu'il permet l'analyse du comportement du sol aussi bien en petits déplacements qu'à la rupture



Figure I.1 : Pressiomètre

I.4 Type de pressiomètre

Plusieurs générations de pressiomètre ont vu le jour. Ils se classent en quatre grandes familles, se différenciant par leur méthode de mise en place. On distingue le pressiomètre avec forage préalable (PFP), tels qu'imaginés initialement par Ménard, le pressiomètre autoforeur (PAF), le pressiomètre foncé (PMF) et Le pressiomètre de fluage longue durée « DIFLUPRESS ».

Il faut noter que les résultats obtenus sont fortement dépendants du pressiomètre utilisé.

I.4.1 Le pressiomètre avec forage préalable (Pressiomètre de Ménard) :

L'essai pressiométrique consiste à réaliser l'expansion horizontale d'une sonde cylindrique dans un forage exécuté au préalable à une profondeur donnée, sous des contraintes radiales jusqu'à la rupture du sol. Il permet d'obtenir une relation entre les contraintes appliquées et les déplacements horizontaux du forage ce qui présente un grand avantage par rapport à d'autres essais in-situ, du fait qu'il permet l'analyse du comportement du sol aussi bien en petits déplacements qu'à la rupture l'appareil pressiométrique ou pressiomètre Ménard est illustré suivant la figure-I.2.

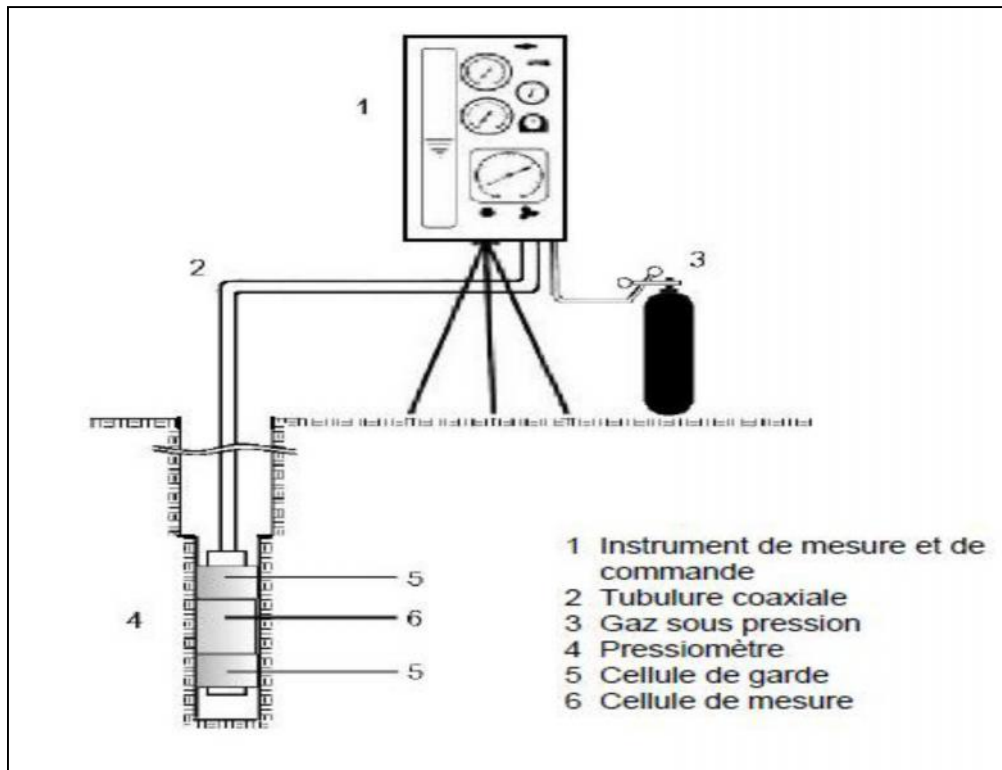


Figure I.2: Schéma de principe de l'essai pressiométrique Ménard

Et l'appareil standard est constitué des éléments suivants :

• Le C.P.V

Un appareillage de mesure placé en surface, permettant d'exercer les pressions dans la sonde, et de mesurer la variation correspondante de volume de celle-ci.

Le Contrôleur pression-volume comprend un réservoir de liquide à niveau visible (eau additionnée d'un peu d'antigel coloré afin d'améliorer la visibilité du ménisque), ainsi qu'un système de mise en pression (manomètres).

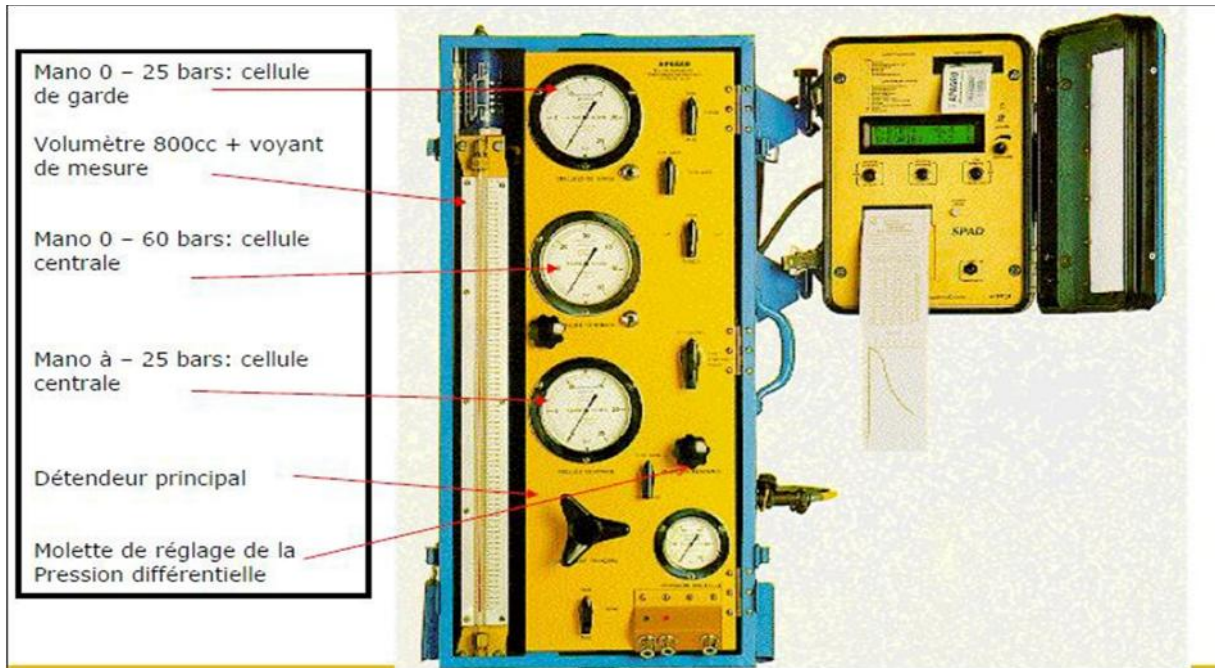


Figure I.3 : Contrôleur pression-volume

- **Une cellule de mesure centrale** (d'un diamètre compatible avec les diamètres des outils de forage usuels) constituée d'un tube métallique revêtu d'une membrane en caoutchouc gonflée avec de l'eau, exerçant une pression radiale sur les parois du forage;
- **Deux cellules de garde** de même conception, disposées aux extrémités de la cellule centrale et gonflées à l'air, tout au moins pour des essais effectués à des profondeurs <15m.

Pour des profondeurs supérieures, il est recommandé de gonfler également à l'eau les cellules de garde, de façon à annuler la différence de pression en cellules due à la pression hydrostatique interne. L'intérêt des cellules de garde est d'assurer une répartition cylindrique uniforme des contraintes et des déformations au niveau de la cellule de mesure et ainsi de neutraliser les perturbations d'extrémité.

- Une tubulure de liaison

Le CPV et la sonde sont reliés par deux tubes plastiques semi-rigides coaxiaux servant à conduire l'eau et le gaz sous pression.

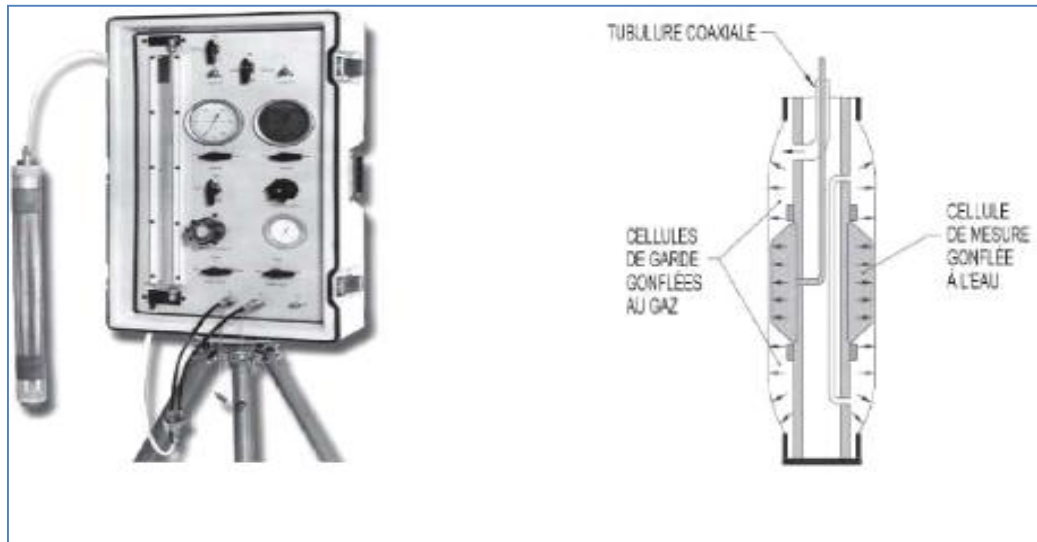


Figure I.4: Tubulure de liaison

I.4.1.1 Mise en place de la sonde du pressiomètre Menard :

La sonde du pressiomètre Menard est généralement mise en place dans un forage d'un diamètre légèrement plus grand que celui de la sonde au repos. Il est recommandé 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 forage sont recommandées en fonction du type de sol étudié.

Tableau I-1 Diamètres des forages pour le pressiomètre

Code	Diamètre de la sonde (mm)	Diamètre du forage (mm)	
		min.	max.
EX	32	34	38
AX	44	46	52
BX	58	60	66
NX	70	74	80
	95	100	110
	115	125	140

I.4.1.2 Interprétation de la courbe pression volume $V=f(P)$:

L'essai étant rapide, donc en conditions non drainées, il s'interprète en contraintes totales. Une courbe d'expansion type, représentée sur la (figure-I.5), permet d'obtenir le module pressiométrique E_M , la pression limite pressiométrique P_L , la pression de fluage P_f et la pression de contact avec le terrain P_0 . La courbe pressiométrique se décompose habituellement en trois phases

➤ phase de recompression

Il s'agit de la mise en contact de la paroi de la sonde avec le sol, elle est limitée par la pression horizontale totale des terres au repos P_0

Elle résulte de l'expansion de la membrane jusqu'au moment où celle-ci vient épouser le contour du trou foré préalablement

➤ Phase pseudo-élastique :

Caractérisée par une réponse approximativement linéaire du sol. La pression atteinte à la fin de cette phase est la pression de fluage P_f . Cette partie de la courbe permet de définir le module pressiométrique Ménard E_M donné par l'expression (I.1).

$$E_M = 2 \frac{1 + \nu}{V_0 + V_m} \frac{dP}{dV} \quad \text{I.1}$$

Avec

ν : Coefficient de poisson

V_0 : Volume initiale de la sonde au repos ;

V_m : variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique ;

$\frac{dP}{dV}$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

➤ **Phase plastique :**

Correspond à l'apparition d'une forte non-linéarité de la courbe d'expansion due à la mise en plasticité du sol. Pour les très grandes déformations, la pression tend vers une valeur limite. C'est la pression limite, notée $p_{l\infty}$ définie comme l'asymptote de la courbe pressiométrique quand le volume tend vers l'infini. En pratique il est difficile, voire impossible, d'accéder à cette valeur de la pression ; la pression limite est alors définie comme la pression provoquant le doublement du volume initial de la sonde ($V_{lc} = 2V_0$) c'est la pression limite conventionnelle, notée P_{lc}

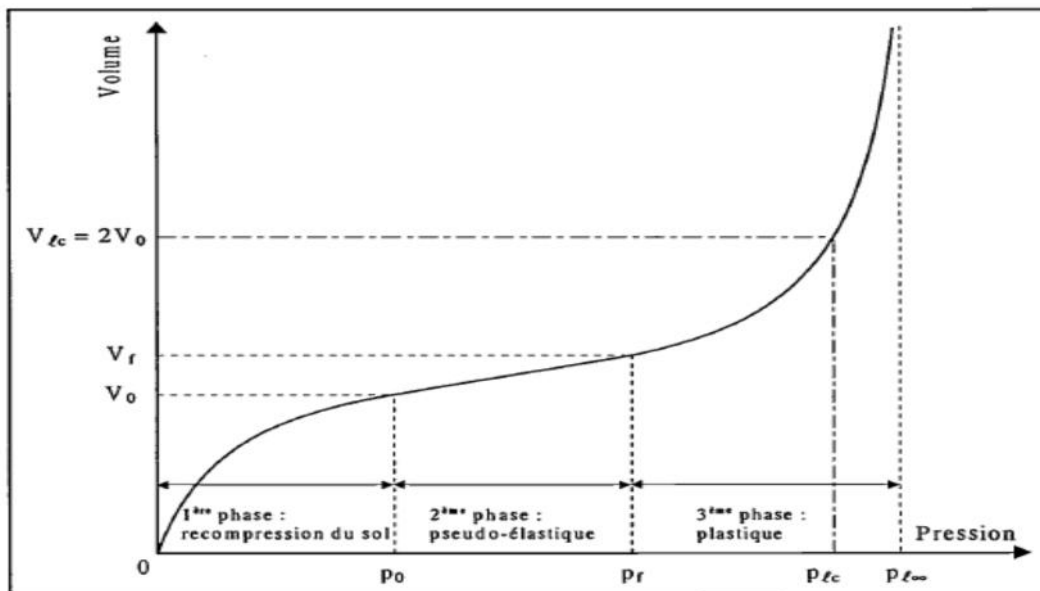


Figure I.5: Pressiomètre avec forage préalable - Courbe d'expansion type

I.4.1.3 Expression des résultats :

I.4.1.4 Détermination du module pressiométrique Ménard E_M :

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 :

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta P(1+\nu)}{E} \quad \text{I.3}$$

A partir de pente de la droite pseudo-élastique on calcul le module préssiométrique, noté E_M comme suit :

$$E_M = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \frac{dP}{dV} \quad \text{I.4}$$

Avec

ν : Coefficient de poisson

V_0 : Volume initiale de la sonde au repos ;

V_m : variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique ;

$\frac{dP}{dV}$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

I.4.1.5 Détermination de la pression de fluage P_f :

- La pression de fluage P_f est obtenue par exploitation graphique du diagramme ($P, \Delta V_{60/30}$), voir (Figure I.6).

- $\Delta V_{60/30}$: 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

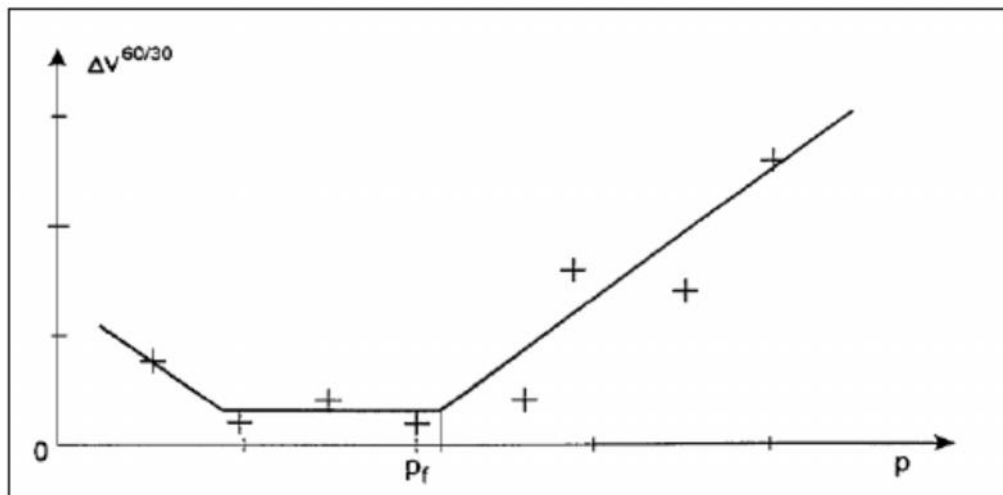


Figure I.6: Courbe de fluage pressiométrique.

I.4.1.6 Détermination de la pression limite Pl :

Lorsque la pression appliquée sur les parois du forage par la sonde dépasse la pression de fluage Pf, 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 P0. Elle correspond à un volume injecté.

$$V_L = V_s + 2V_0 \quad I.5$$

I.4.1.7 Profil pressiométrique :

Les valeurs du module pressiométrique E_M , de la pression de fluage, et de la pression limite obtenues au pressiomètre sont systématiquement représentées en fonction de la profondeur sous forme des tableaux, en parallèle avec les résultats géologique.

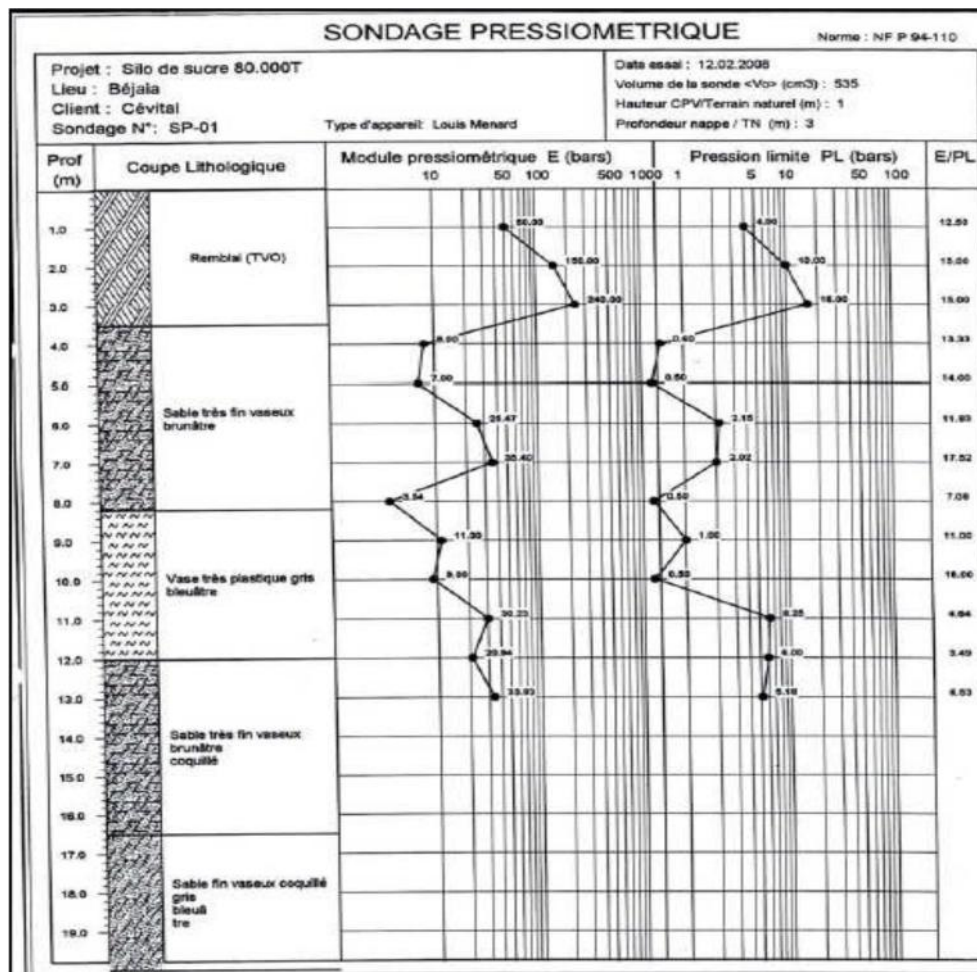


Figure I.7 : profil pressiometrique de Ménard

I. 5 Pressiomètre autoforeur

Pour diminuer les inconvénients dus au préforage, cette sonde pressiométrique est équipée d'un auto-foreur qui peut forer lui-même son propre trou. L'appareil comporte également les trois parties citées précédemment (pour le pressiomètre de Ménard).

Cependant, la sonde de ce pressiomètre est monocellulaire et présente les caractéristiques particulières suivantes:

-La mise en place de la sonde pressiométrique se fait par autoforage grâce à un carottier mince muni d'un dispositif solidaire de la sonde qui désagrège le sol au fur et à mesure de l'enfoncement. Le sol désagrégé pénètre dans le carottier et remonte à la surface grâce à l'injection d'un fluide sous pression.

-Les résultats de l'essai donnent la courbe pressiométrique représentée sur la figure (I-8).

On notera que contrairement au pressiomètre de Ménard, l'allure de la courbe ne fait pas apparaître la phase de recompression, et seules les phases pseudo-élastiques et de grandes déformations apparaissent. La concavité de la courbe est monotone.

-Pour une utilisation pratique de cette courbe, Baguelin et al. (1978), ont été amenés à définir plusieurs modules : un module initial tangent G_{p0} deux modules de cisaillement sécants G_{p2} et G_{p5} définis entre la pression P_0 et les pressions P_2 et P_5 (défini à 2 et 5% de déformation). Le module d'Young est alors donné par l'expression.

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad \text{I.6}$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \text{I.7}$$

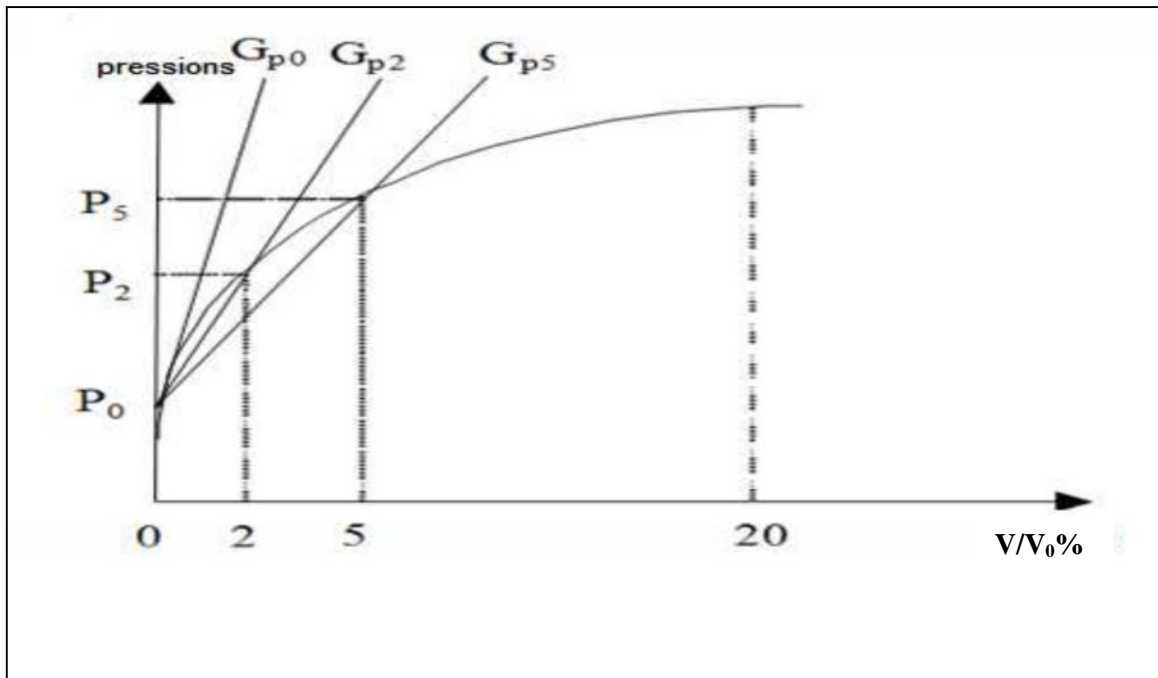


Figure I.8 : Allure d'une courbe pressiométrique obtenue à partir d'essai réalisé au pressiomètre autoforeur avec les différents paramètres tirés

-Baguelin et al. ont également défini un coefficient d'identification des sols, noté β qui caractérise l'allure des courbes. $V/V_0=f(P)$

Ce coefficient est défini en fonction des pressions P_0 , P_5 et P_{20} par la relation suivante

$$\beta = \frac{P_{20}-P_5}{P_{20}-P_0} \quad \text{I.8}$$

Le comportement du sol au cisaillement affecte la forme de la courbe pressiométrique, le coefficient β dépend donc de la nature du sol. Baguelin et al, donnent la classification présentée dans Tableau I.2

Tableau I.2 : valeur de β suivant la nature du sol (Baguelin et al ,1978)

	Argiles Sensible	Argiles très sensibles	Sables compressibles	Sables dilatant	Sables très Dilatant
β (%)	<25	[25,40]	[35,50]	[45,60]	>60

I. 6 Le pressiomètre de fluage longue durée (DIFLUPRESS) :

Le pressiomètre de fluage longue durée a été développé par EDF-GDF dans le but d'étudier les tassements à très long terme des fondations des centrales nucléaires (Leidwanger C., 1993). La sonde pressiométrique est similaire à celle des PAF. La différence entre ces deux types de pressiomètre provient du système de chargement qui permet dans le cas du

DIFLUPRESS d'effectuer des essais à charge constante de très longue durée.: le piston est chargé par une série de poids permettant d'exercer une pression constante dans le temps, indépendamment de la déformation de la sonde.

I.7 Les pressiomètres foncés :

Les pressiomètres foncés sont mis en place par battage, ou vérinage dans le sol. Ils regroupent le pressio-pénétromètre (LCPC-Ménard, 1978) et le pressiomètre Stressprobe (1977) à sonde creuse. Ils étaient originellement conçus pour une utilisation en mer.

I.8 Les méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique

L'essai pressiométrique permet d'avoir accès aux caractéristiques élastiques (module pressiométrique E_m et de rupture (pression limite PL) du sol. Cependant, de nombreuses approches ont été développées, pour exploiter de manière plus complète ce type d'essai. Les différentes méthodes d'interprétation peuvent être séparées en trois catégories : les méthodes empiriques, les méthodes basées sur une étude analytique, et enfin les méthodes numériques.

I.8.1 Les méthodes empiriques

Elles sont encore largement utilisées, notamment dans la réglementation relative au dimensionnement des ouvrages de fondations. Plusieurs auteurs ont proposé des règles empiriques basées sur des observations du comportement de fondations. On peut citer principalement les travaux de Ménard (1957), Amar et Jézéquel (1972) et Baguelin et Jézéquel (1973). Ces méthodes permettent notamment d'évaluer la valeur de la cohésion non drainée C_u à partir de la pression limite P_L .

I.8.2 Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques sont principalement basées sur le résultat de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un milieu élasto-plastique. On peut différencier parmi ces méthodes celles prenant en compte une déformation sans variation de volume dans la phase plastique (*Ménard, 1957 ; Gibson et Anderson, 1961 ; Prévost et Hoeg, 1975 ; Windle et Wroth, 1977 ; Denby, 1978 ; Jefferies, 1988 ; Housby et Withers, 1988 ; Monnet, 1992 ; Ferreira et Roberston, 1994*) et celles prenant en compte une déformation avec variation de volume (*Ladany, 1963 ; Salençon, 1966 ; Hughes et al, 1977 ; Roberston et Hughes, 1986 ; Houlsby et al, 1986 ; Manassero, 1989*).

Avec l'apparition du pressiomètre autoforeur, plusieurs auteurs ont proposé des théories basées sur la dérivation de la courbe pressiométrique, conduisant à déterminer la courbe de cisaillement élémentaire du matériau en place (*Palmer, 1972 ; Ladany, 1972 ; Baguelin et al., 1972*).

I.8.3 Les méthodes numériques

Le développement des moyens informatiques a conduit à la mise au point de codes de calcul de plus en plus élaborés. Depuis quelques années, de nombreux travaux portent sur l'identification des paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique. On peut citer notamment les travaux de *Boubanga (1990)* et *Bahar (1992)* menés à l'Ecole Centrale de Lyon. Un logiciel d'identification de paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique a été développé et appliqué à différents modèles (*Cambou et Boubanga, 1989 ; Cambou et al, 1990 ; Cambou et Bahar, 1993*).

Zentar (1999) a utilisé un logiciel d'optimisation couplé à un logiciel d'éléments finis pour identifier certains paramètres d'un modèle élasto-plastique (Cam-Clay modifier) à partir des résultats d'essais pressiométrique

I.9 correction de la courbe pressiométrique :

Les courbes enregistrées directement à partir des lectures, sont des courbes brutes qui ne peuvent être interprétées sans diverses corrections.

En effet, les lectures des pressions et des volumes faites sur le terrain doivent subir des corrections tenant en compte :

- _ De la surcharge piézométrique due à la hauteur de la colonne d'eau dans l'appareil,
- _ De l'élasticité propre de l'ensemble membrane + gaines, appelée « inertie ».
- _ De la compressibilité interne de l'appareil.

I.9.1 Correction de la hauteur piézométrique

Par convention, les efforts exercés sur le sol doivent être exprimés en contraintes totales. Ainsi donc, si l'essai est réalisé à une profondeur Z au dessous de l'appui du pressiomètre, les pressions lues sur le manomètre devront être majorées de la charge égale à la hauteur de la colonne d'eau entre le manomètre et la cellule. Si l'on appelle P_m la pression lue sur le manomètre, la pression exercée sur le terrain, en négligeant toute autre correction sera donc

$$P = P_m + \gamma_w (Z + a)$$

Z : la profondeur au dessous de l'appui du pressiomètre.

P : La pression exercée sur la paroi de forage.

P_m : La pression lue sur le manomètre

P_i : est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité V_m

Z : la profondeur au dessous de l'appui du pressiomètre

a : la hauteur hydrostatique

γ_w : Poids volumique de l'eau

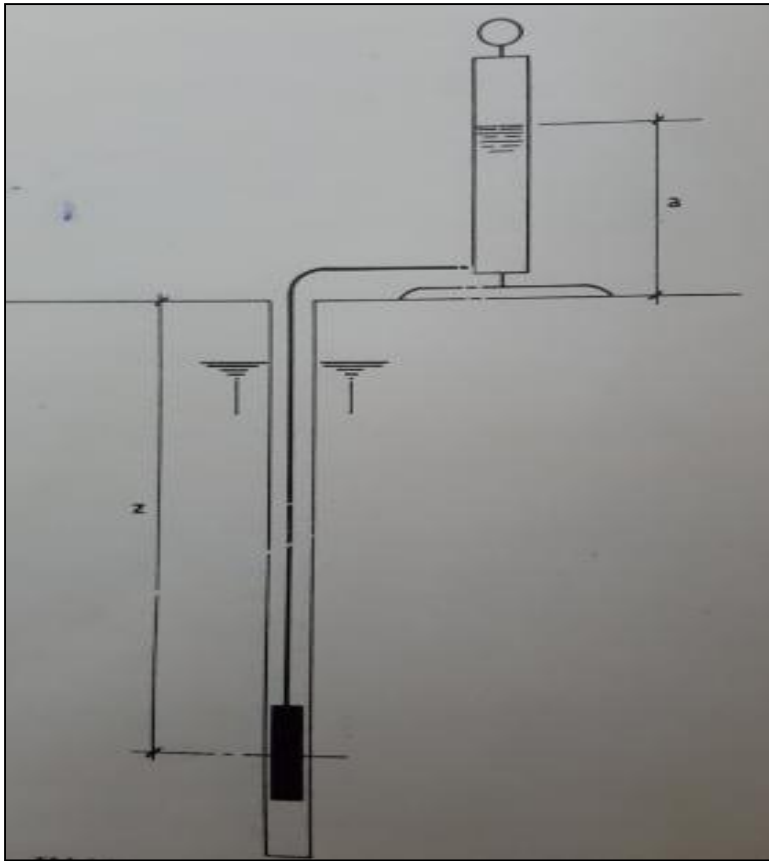


Figure I.9: Correction de la hauteur piézométrique

I.9.2 Correction de l'inertie

La pression P_m majorée de la valeur de la hauteur hydrostatique n'est pas la pression exercée effectivement sur le sol. En effet à toute pression P_m mesurée correspond une déformation volumétrique v_m lue sur le C.P.V.

Pour obtenir la pression qui s'exerce sur la paroi du forage, il faut déduire de la pression P_m mesurée, l'inertie de la sonde P_i (membrane, gaine et éventuellement tube fendu). P_i est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité V_m

➤ Courbe d'inertie

Pour pouvoir procéder aux corrections d'inertie, il suffit de faire essai pressiométrique hors du forage qui consiste à effectuer une expansion à l'air libre, la sonde étant placées verticalement à coté du CPV, pour chaque pression P appliquée par paliers jusqu'à la résistance limite propre de la sonde on mesure le volume V que prend la cellule centrale à stabilisation

La courbe obtenue est appelée courbe d'inertie.

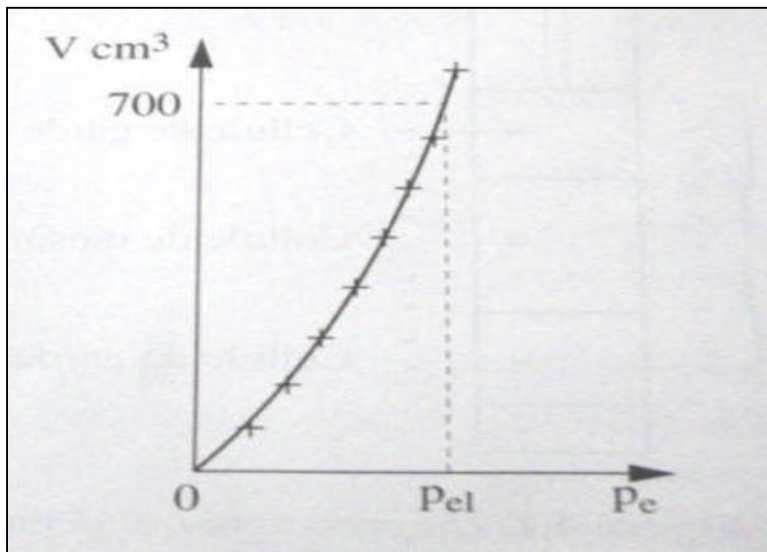


Figure I.10 : courbe d'inertie

La pression P exercée réellement sur la paroi du forage est donnée par la relation suivante :

$$P = P_m - P_i + \gamma_w (Z + a)$$

I.9.3 Correction du volume (courbe d'étalonnage)

Les variations de volume V_m lues sur le CPV correspondent à :

- La déformation du terrain V
- La déformation interne V des différents éléments du pressiomètre et l'on a :

$$V_m = V + V$$

Pour des pressions ne dépassent pas 25 bars. La compressibilité de l'eau, la variation de volume du CPV et des gaines sont négligeables par rapport à la compressibilité du sol.

Cela n'est plus vrai pour les hautes pressions. Pour ce faire, on effectue un essai d'étalonnage en plaçant la sonde dans un tube métallique épais qui peut être considéré en première approximation comme indéformable par rapport à la déformation interne du pressiomètre. Il est clair que les déformations aussi mesurées ne sont que les déformations internes de l'appareil. On tracera alors la courbe d'étalonnage $V = f(P)$ (voir figure I.11) à partir de laquelle on détermine la constante de compressibilité de l'appareil :

$$a = \frac{dV}{dP}$$

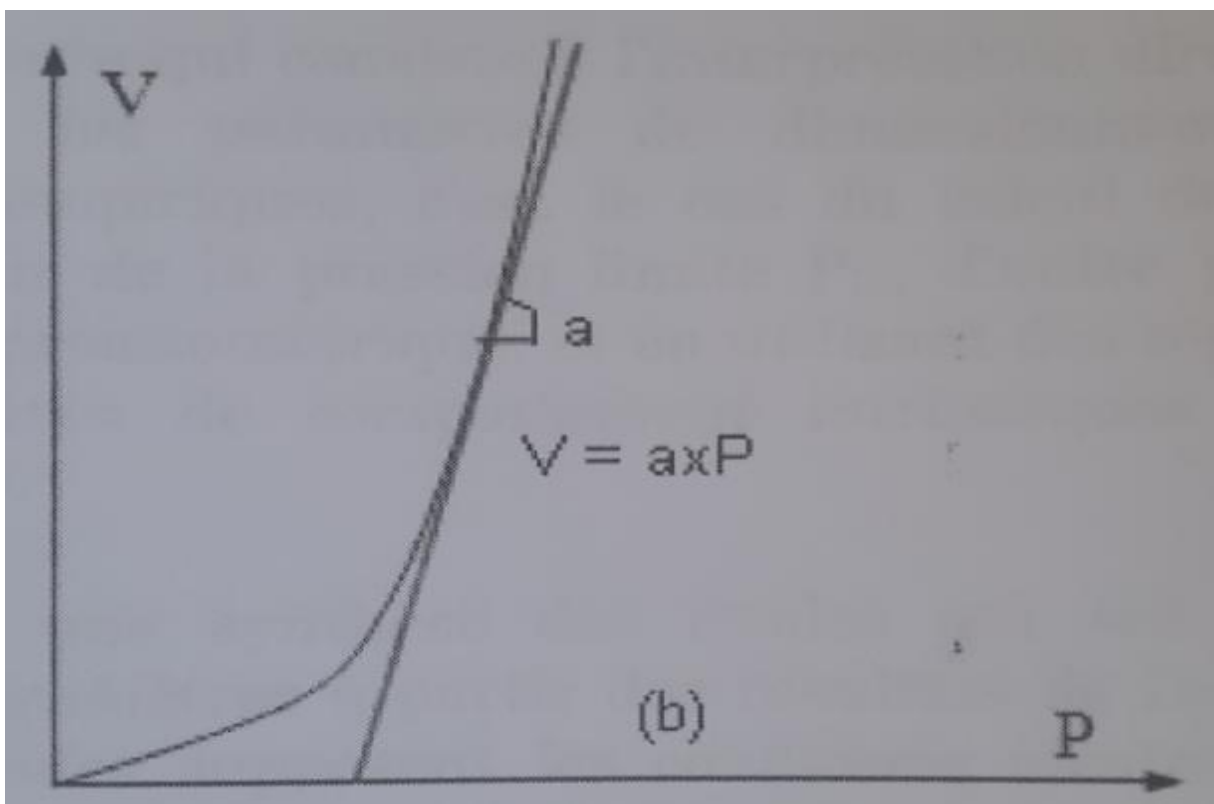


Figure I.11 : Courbe d'étalonnage

Le volume corrigé correspondant à la déformation volumétrique du sol sera, pour chaque pression P_M lue sur le manomètre :

$$V = V_m - V$$

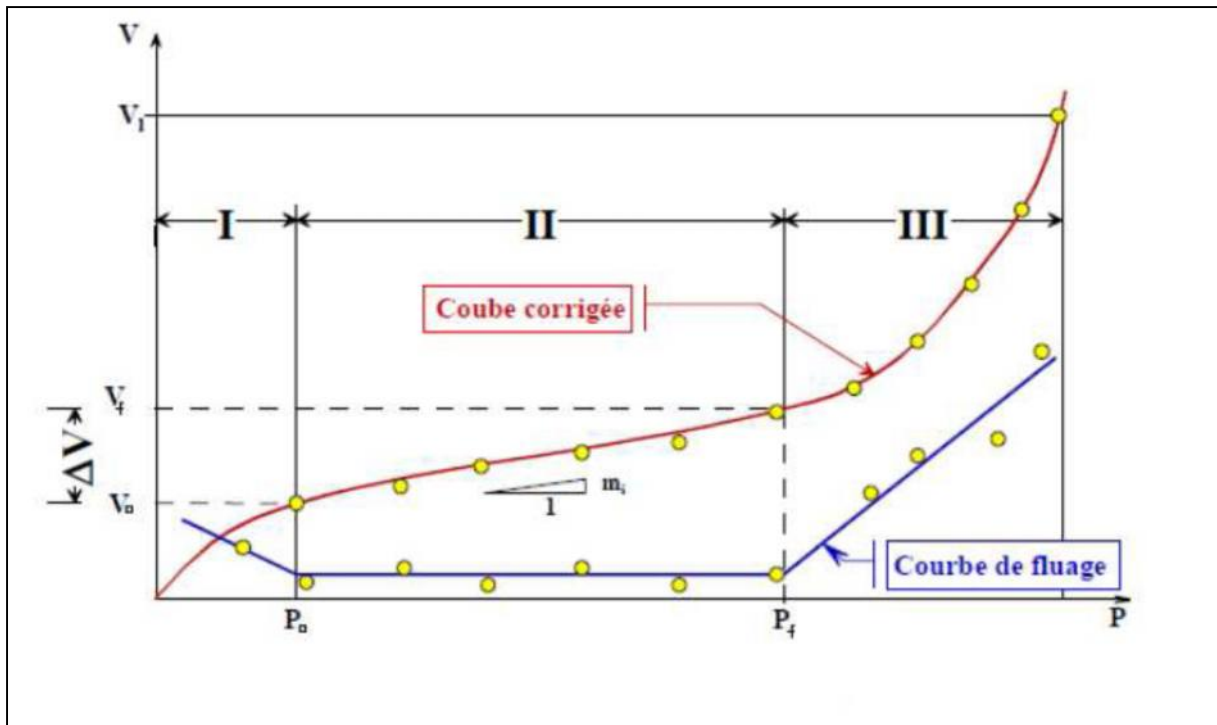


Figure I.11 : Courbe pressiométrique corrigée

I.10 Relation entre P_I et E_M :

Le rapport (E_M/ P_I) bien qu'il regroupe deux caractéristiques très différentes, du fait que l'une correspond aux petits déplacements du forage et l'autre aux grands, l'expérience a montré que celui-ci peut être un critère pratique pour apprécier et classer la raideur des matériaux étudiés.

On admet, selon Ménard la classification suivante :

Tableau I.3 : Classification selon le rapport (E_M/ P_L)

• Argile	$(E_M/P_L) < 5$	Argiles remaniées ou triturées
	$5 \leq (E_M/P_L) < 8$	Argiles sous-consolidées
	$8 \leq (E_M/P_L) < 12$	Argiles normalement consolidées
	$12 \leq (E_M/P_L) < 15$	Argiles légèrement consolidées
	$(E_M/P_L) \geq 15$	Argiles fortement surconsolidées
• Sables	$(E_M/P_L) < 5$	Sables remaniés
	$6 \leq (E_M/P_L) < 8$	Sables et graviers immergés
	$(E_M/P_L) \geq 10$	Sables, sables et gravier secs et serrés

I.11 Ordre de grandeur des pressions limites P_L :

Le tableau suivant donne une classification des sols en fonction **PL**.

Tableau I.4 : Classification Des Sols Suivant PL

Classe de sol		DESCRIPTION	PRESSIOMETRE P_L (MPa)
ARGILES, LIMONS	A	Argiles et limons mous	0.7
	B	Argiles et limons fermes	1.2-2.0
	C	Argiles très fermes à dure	2.5
SABLES, GRAVES	A	Lâche	0.5
	B	Moyennement compacts	1.0 – 2.0
	C	Compacts	2.5
CRAIES	A	Molles	0.7
	B	Altérées	1.0 - 2.5
	C	Compacte	3.0
MARNES MARNO- CALCAIRES	A	Tendres	1.5 – 4.0
	B	compacts	4.5

I.12 Difficultés et limitations de l'essai

I.12.1 Forage pressiométrique

Le forage doit être réalisé à l'aide d'outils de foration adaptés au cas par cas au terrain rencontré, conformément aux prescriptions de la norme, afin que :

- le trou de forage soit correctement calibré au diamètre de la sonde pressiométrique, soit approximativement 60 mm ;
- le sol au bord du trou ne soit pas complètement déstructuré par l'outil et le fluide de foration. Bien que du sol soit remonté à la surface lors de la foration, la reconnaissance des terrains ainsi pratiquée n'est pas toujours suffisante pour le projet, notamment en ce qui concerne les problèmes de faisabilité des ouvrages (stabilité des parois des fouilles, régime des eaux...). Il est donc recommandé, même dans le cas d'études courantes, d'effectuer au moins un sondage classique de reconnaissance et, sur les sols recueillis, d'effectuer les essais d'identification classiques (granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg).

I.13.2 Introduction directe du pressiomètre dans le terrain

Lorsque les parois du forage ne sont pas naturellement stables ou ne peuvent être stabilisées par l'utilisation d'une boue de foration idoine, l'introduction directe de la sonde dans le terrain est autorisée. Cela se fait en plaçant la sonde à l'intérieur d'un tube métallique qui porte des fentes longitudinales. Le tube, dit tube lanterné, est battu dans le terrain par passe d'un mètre, l'essai d'expansion étant effectué à l'issue de chaque passe. La même procédure est autorisée si le sol comporte des éléments anguleux susceptibles de faire éclater les sondes

I.14 Conclusion

L'essai pressiométrique est devenu l'essai le plus répandu, puisque il permet de donner une relation contrainte déformation qui présente le comportement du sol, il permet aussi d'éviter certaines difficultés telles que le prélèvement des échantillons, le remaniement, qu'on rencontre avec les essais de l'laboratoire.

Chapitre II

Méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique

Chapitre II

Méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique

I. Introduction

Deux paramètres sont déduits lors d'un essai pressiométrique :

- Un module pressiométrique E_p , paramètre intrinsèque seulement dans le cas d'un matériau élastique linéaire isotrope, ce qui n'est pas le cas du sol.
- Une pression limite P_l , caractéristique qui n'est pas intrinsèque au matériau (elle dépend du matériau et de l'essai lui-même)

On peut séparer d'une part l'approche directe qui consiste l'interprétation de ces caractéristiques pour calculer les paramètres de dimensionnement moyennant certains abaques ou règles empiriques, c'est aussi le cas de calcul de la capacité portante d'une fondation à partir de la pression limite P_l , d'autre part l'approche indirecte à partir de la courbe pressiométrique ,et en utilisant des règles empiriques, on peut tirer les paramètres de comportement intrinsèques du matériau (les paramètres de cisaillement)

Nous présentant dans ce paragraphe, une synthèse des études qui ont été développés dans le but d'identifier ces paramètres à partir des résultats de l'essai pressiométrique. La plupart de ces études supposent les conditions idéales de l'expansion plane et uniforme d'une cavité cylindrique de longueur infinie, et que l'essai est réalisé sans remaniement.

Nous commençons par l'analyse des méthodes qui admettent une déformation sans variation de volume élémentaire dans la phase plastique, nous aborderons ensuite celles qui admettent une variation de volume non nulle dans la phase plastique

II.1 méthodes empiriques

Sur la base des considérations purement expérimentales, certains auteurs ont proposé des relations empiriques qui relient la cohésion non drainé C_u d'une argile ou l'angle de frottement φ d'un sable à la pression limite P_l .

➤ Méthode de Ménard

Pour une argile cohérente caractérisée par une cohésion non drainé C_u (essai rapide non drainé), Ménard propose la relation empirique suivante :

$$C_u = \frac{P_l - P_0}{\beta} \quad \text{II.1}$$

β : coefficient varie avec le type de sol, avec une valeur moyenne de 5.5

➤ Méthode de Amar et Jézequel

Ces auteurs proposent la relation suivante, pour la détermination de la cohésion non drainée C_u à partir d'un essai pressiométrique :

$$C_u = \frac{P_l - P_0}{10} + 25 \text{ Kpa} \quad \text{II.2}$$

II.2 Méthodes basées sur un calcul analytique de type élastoplastique :

Le problème de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un milieu infini ne peut donner une solution exacte que si l'on fait des hypothèses plus au moins fortes à la fois sur la géométrie de la sonde et sur la loi de comportement du matériau.

On peut citer différentes formulations traitant le cas d'une sonde infinie dans un milieu élasto-plastique, la plupart de ces formulations sont basées sur la théorie classique des corps élasto-plastiques, en prenant le critère de Mohr-Colomb qui est la base de la mécanique des sols traditionnelle

II.2.1 Méthode admettant une déformation sans variation de volume dans la phase plastique

➤ Méthode de Ménard

En supposant que le sol admet le critère de plasticité de Mohr-Colomb en admettant l'hypothèse de déformation à volume constant, Ménard a établie en 1957 une relation qui décrit le comportement du sol

$$P_L = \left(1 + \sin\varphi\right) P_0 + C \cot g\varphi \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\frac{\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}{P_0 \sin\varphi + C \cos\varphi} - C \cot g\varphi \quad \text{II.3}$$

Avec

φ : angle de frottement interne

C : cohésion

Pour une argile non drainée cette relation devient :

$$P_L = P_0 + C_u \left(1 + \log \frac{E}{2(1+\nu) C_u}\right) \quad \text{II.4}$$

➤ Méthode de Salençon

Le calcul proposé par Salençon pour un milieu élastoplastique est une analyse de l'expansion d'une cavité cylindrique ou sphérique en faisant les hypothèses suivantes

- Matériau isotrope,
- le matériau obéit au modèle Mohr-Colomb,
- le sol ne subit pas une variation de volume.
- pour l'expansion d'une sonde cylindrique Salençon propose l'expression suivante :

$$P_L = \left(1 + \sin\varphi\right) P_0 + C \cot g\varphi \frac{E}{4(1+\nu)} \frac{\frac{\sin\varphi}{1+\sin\varphi}}{P_0 \sin\varphi + C \cos\varphi} \quad \text{II.5}$$

Pour un matériau purement cohérent ($\nu = 0$)

$$P_L = P_0 + C_u \left[1 + \log \frac{E}{4(1+\nu)C_u} \right] \quad \text{II.6}$$

En tenant compte de l'hypothèse de la non variation de volume ($\nu = 0.5$) ; la relation proposée par Ménard et celle proposée par Salençon s'écrivent :

$$P_L = P_0 + C_u \left[1 + \log \frac{E}{3C_u} \right] \quad \text{II.7}$$

$$\frac{P_L - P_0}{C_u} = 1 + \text{Log} \frac{E}{3C_u} \quad \text{II.8}$$

La pression limite P_L dépend non seulement des caractéristiques de cisaillement C et mais aussi des caractéristiques de déformabilité E ;

Méthode de Gibson et Anderson

Gibson et Anderson proposent une formulation en proposant que le comportement du sol est élastique jusqu'à la rupture dont le critère de rupture est celui de Trésca.

L'analyse proposée aboutit à une relation exprimant la pression limite P_L en fonction de la cohésion non drainée C_u

$$P_L = P_0 + C_u \left[1 + I_n I_r \right] \quad \text{II.9}$$

Avec

$$I_r = \frac{G}{C_u} \quad \text{II.10}$$

$$\text{Et} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{II.11}$$

I_r : indice de rigidité,

G : module de cisaillement

E et ν : respectivement le module de Young et le coefficient de poisson déterminé au début de la courbe pressiométrique,

P_0 : pression des terres au repos.

Pour un matériau incompressible ($\nu = 0.5$) la formulation proposée coïncide avec celle proposée par Ménard et Salençon

$$C_u = \frac{P_L - P_0}{1 + \ln \frac{E}{3C_u}} \quad \text{II.12}$$

➤ Méthode de la sous-tangente

L'apparition de pressiomètre autoforeur dans les années 70 a permis d'assurer un remaniement minimal du sol et donc de faire quelques hypothèses supplémentaires sur le comportement du sol autour du pressiomètre. On peut principalement citer les trois écoles ; françaises (Baguelin et al), anglaise (palmer) et belge (Landanyi) qui ont presque simultanément (1972) ébauché une théorie de dérivation de la courbe pressiométrique, ce qui conduit à déterminer la courbe de cisaillement élémentaire des matériaux en place. Cette méthode permet de déterminer la cohésion non drainée du sol en utilisant les résultats de l'essai pressiométrique.

Dans ce paragraphe on s'intéresse aux travaux de Baguelin, Jézequel, le Mée et Le Méhauté et Baguelin, Jézequel et shields, dont les hypothèses sont les suivantes :

- Sollicitation non drainée,
- Hypothèse de déformation plane,
- Influence de la pression moyenne négligée

Les champs de déformation et de contraintes lors de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un matériau cohérent peuvent être décrits comme suit :

a) Champ de déformation :

Les équations décrivent ce champ sont :

$$\varepsilon_r = \frac{d\rho - dr}{dr} = \frac{du_r}{dr} \quad \text{II.13}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\rho d\theta - r d\theta}{r d\theta} = \frac{u_r}{r} \quad \text{II.14}$$

Avec

ε_r : est une déformation radiale (contraction)

ε_θ : Est une déformation circonférentielle au bord de la sonde ε_θ est connue immédiatement en fonction du déplacement de la paroi

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_{r0}}{r_0} \quad \text{II.15}$$

La condition du non variation de volume s'écrit :

$$\rho^2 - r^2 = \rho_0^2 - r_0^2 = a^2 \quad \text{II.16}$$

$$\text{Ou encore :} \quad 2u_r r + u_r^2 = Cte \quad \text{II.17}$$

On dérivant (1.13b) et en utilisant (1.11a) et (1.11b), on obtient la relation entre ε_r et ε_θ :

$$2 \frac{du_r}{dr} r + 2 u_r + 2 u_r \frac{du_r}{dr} = 0 \quad \text{II.18}$$

D'où :

$$1 + \varepsilon_r \quad 1 + \varepsilon_\theta = 1 \quad \text{II.19}$$

b) Champ de contraintes :

L'équilibre des forces sur un élément de volume est décrit par la seule équation dans la direction radiale

$$\frac{\Delta \sigma_r - \sigma_\theta}{\rho} = - \frac{d(\Delta \sigma_r)}{d\rho} \quad \text{II.20}$$

Les axes principaux ne tournent pas, donc les contraintes principales restent fixes durant l'expansion. Cette constatation a permis aux auteurs de supposer que le comportement du sol peut être défini par une seule relation reliant le déviateur à

une variable de déformation par exemple ε_0 , ce qui veut dire que la pression moyenne n'intervient pas.

$$\tau = \frac{\Delta(\sigma_r - \sigma_0)}{2} = F(\varepsilon) \quad \text{II.21}$$

En tenant compte de l'équation d'équilibre (II.15) l'équation (II.16) devient

$$d \Delta\sigma_r = 2f(\varepsilon) \frac{d\rho}{\rho} \quad \text{II.22}$$

En intégrant cette relation pour un point situé à une distance ρ_1 , on a

$$\Delta\sigma_{r1} = - \int_{\rho_1}^{\infty} 2 f(\varepsilon) \frac{d\rho}{\rho} \quad \text{II.23}$$

$$\text{Avec } \rho = r(1 + \varepsilon_\theta) \quad \text{II.24}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dr}{r} + \frac{d\varepsilon_\theta}{1 + \varepsilon_\theta} \quad \text{II.25}$$

Et d'après,

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{d\varepsilon_\theta}{\varepsilon_\theta (1 + \varepsilon_\theta) \left(1 + \frac{\varepsilon_\theta}{2}\right)} \quad \text{II.26}$$

Finalement on obtient

$$\Delta\sigma_{r1} = - \int_0^{\varepsilon_{01}} \frac{f(\varepsilon_\theta)}{\varepsilon_\theta (1 + \varepsilon_\theta) \left(1 + \frac{\varepsilon_\theta}{2}\right)} d\varepsilon_\theta \quad \text{II.27}$$

Ce qui donne en petites déformations :

$$\Delta\sigma_{r1} = - \int_0^{\varepsilon_{01}} \frac{f(\varepsilon_\theta)}{\varepsilon_\theta} d\varepsilon_\theta \quad \text{II.28}$$

On déduit que, si le sol est intact, $f(\varepsilon_\theta)$ est unique pour tout le milieu, il ya donc une relation biunivoque entre deux quelconque des paramètres de déformation et de contraintes .P au bord de la paroi de la sonde sera :

$$P = - \int_0^{\varepsilon_\theta} \frac{f(\varepsilon_\theta)}{\varepsilon_\theta (1 + \varepsilon_\theta) \left(1 + \frac{\varepsilon_\theta}{2}\right)} d\varepsilon \quad \text{II.29}$$

En décrivant cette dernière relation, on obtient :

$$\frac{d\rho}{d\varepsilon_\theta} = \frac{f(\varepsilon_\theta)}{\varepsilon_\theta (1+\varepsilon_\theta)(1+\varepsilon_\theta/2)} \quad \text{II.30}$$

A partir de la courbe pressiométrique, on remarque que $\overline{NT} = \varepsilon_\theta \frac{dP}{d\varepsilon_\theta}$ Est la sous tangente de la courbe de cisaillement se met aussi sous la forme suivante

$$\tau = f(\varepsilon_\theta) = \overline{NT}(1 + \varepsilon_\theta)(1 + \varepsilon_\theta/2) \quad \text{II.31}$$

Pour ε_θ compris entre 10 et 20 (domaine de petites déformations), on a :

$$\tau = f(\varepsilon_\theta) = NT \quad \text{II.32}$$

La valeur de la cohésion non drainé C_u correspond à la valeur du pic de la sous tangente à la courbe pressiométrique.

L'analyse de cette méthode permet de faire la remarque suivante :

Cette méthode n'est pas stable numériquement car la détermination des tangentes est très difficile sur une courbe expérimentale. On doit utiliser des algorithmes de lissage pour avoir des résultats interprétables (fig b)

Pour pallier cette difficulté, les auteurs proposent l'expression suivante qui permet d'approximer la courbe pressiométrique par la formule suivante :

$$P = P_0 + \frac{1}{2b} a \log 1 + \varepsilon_0^2 + 2 \text{Arctg} \varepsilon_0 \quad \text{II.33}$$

a et b sont des constantes qui sont déterminées par ajustement de la courbe théorique sur la courbe expérimentale.

La courbe de cisaillement dans ce cas prend la forme suivante

$$\tau = \frac{1}{b} \frac{a\varepsilon_0^2}{\varepsilon_0+1} \left(1 + \varepsilon_0 \right) \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{2} \right)$$

II.34

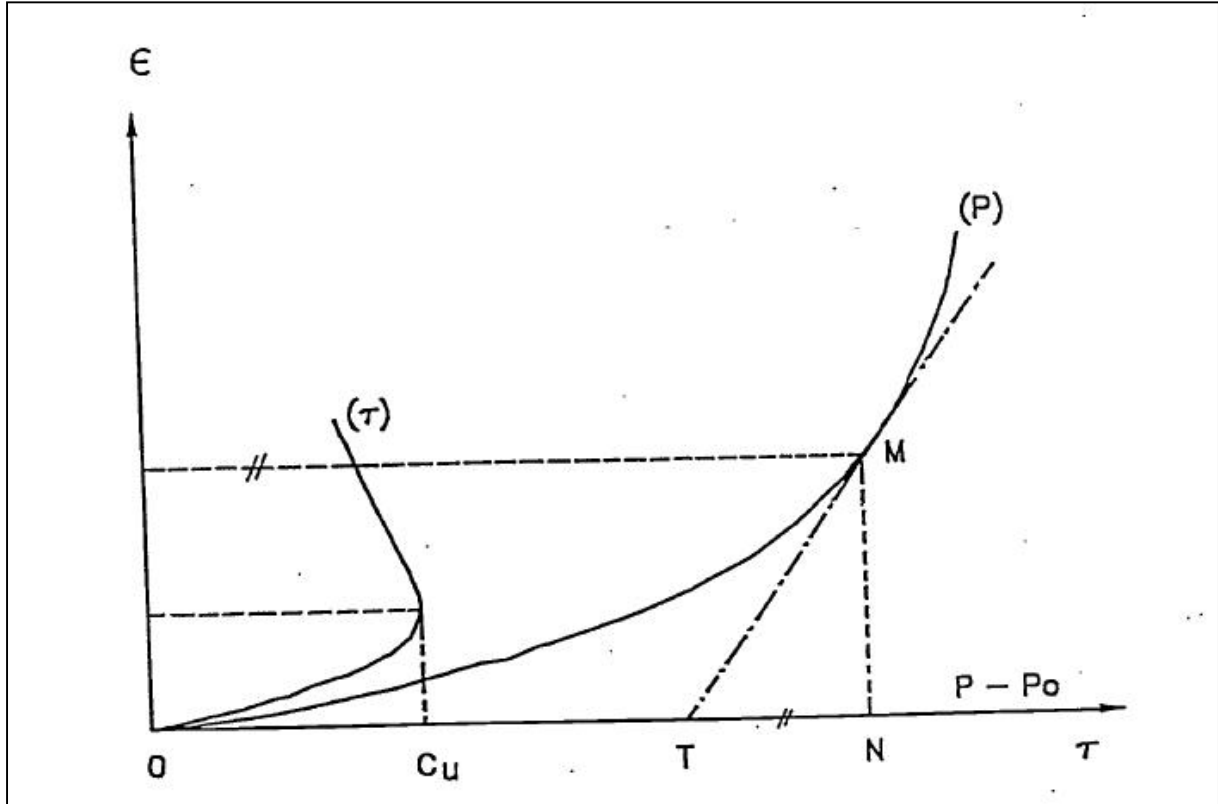


Figure II.1: méthode de dérivation de la courbe pressiométrique avec lissage de la courbe

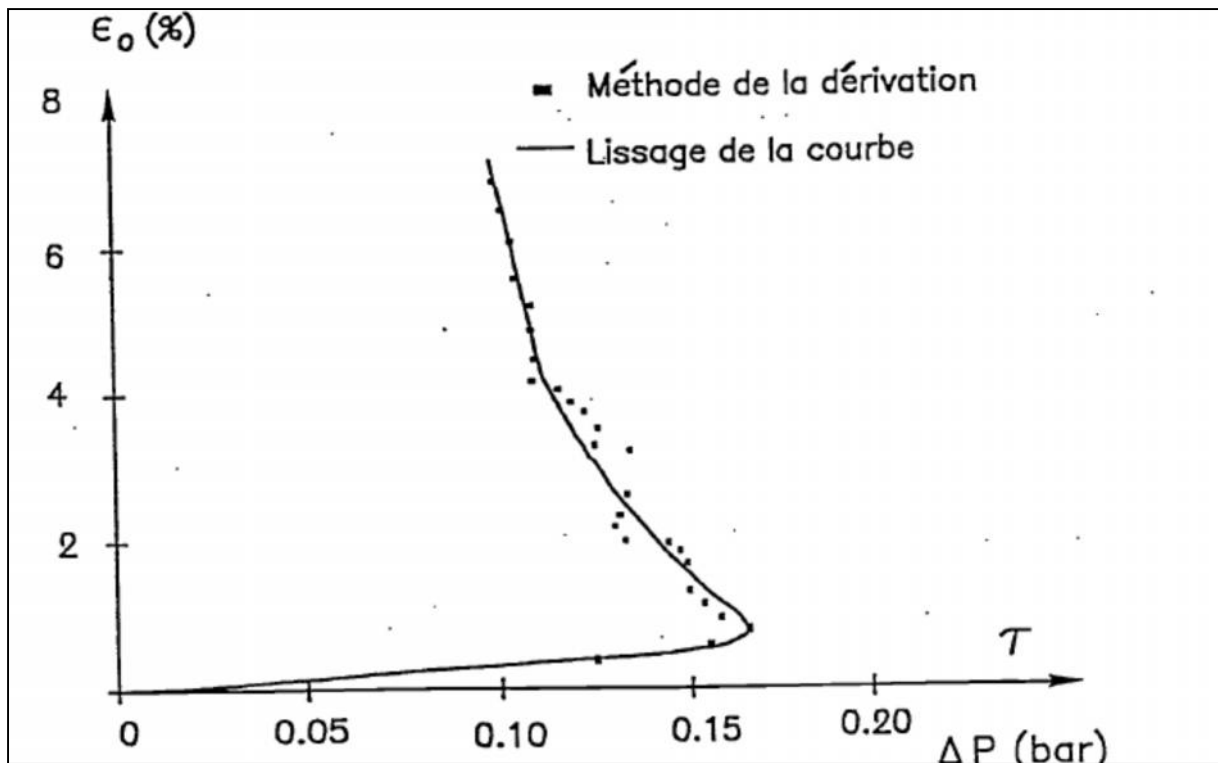


Figure II.2 : Méthode de dérivation de la courbe pressiométrique avec lissage de la courbe

➤ Méthode de Palmer

Une méthode graphique simple a été proposée par Palmer pour déterminer une relation complète contrainte-déformation plane pour un essai pressiométrique classique (Ménard)

La seule hypothèse restrictive prise en compte par Palmer est la condition non drainée. L'expression finale proposée, détermine la différence $\phi = \sigma_r - \sigma_\theta$ (sur la paroi de la sonde) comme étant la double tangente de la fonction ;

$$\Psi = F \left(\log \frac{\Delta V}{V} \right) \quad \text{II.35}$$

$$\phi_{r_0} = \frac{2d\Psi_{r_0}}{d(\log \frac{\Delta V}{V})} \quad \text{II.36}$$

Ψ_{r_0} : La pression appliquée sur la paroi

ϕ_{r_0} : Différence de contraintes principales extrême σ_r et σ_θ .

Dans le cas d'une argile saturée, le critère de Mohr Colomb donne :

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2C_u \quad \text{II.37}$$

L'expression devient donc :

$$C_u = \frac{d\Psi_{r_0}}{d \text{Log} \frac{\Delta V}{V}} \quad \text{II.38}$$

II.2.2 Méthode admettant une déformation avec variation de volume en phase plastique

Dans le cas des matériaux dilatants, la déformation au cours de la phase plastique s'effectue avec variation de volume élémentaire. Nous présentons dans ce paragraphe quelques méthodes d'interprétation tenant compte de ce phénomène.

➤ Méthode de Carrère

La Méthode de Carrère est basée sur la constatation expérimentale que d'un sol pulvérulent est fonction de la contraintes moyenne $\frac{\sigma_r + \sigma_\theta}{2}$

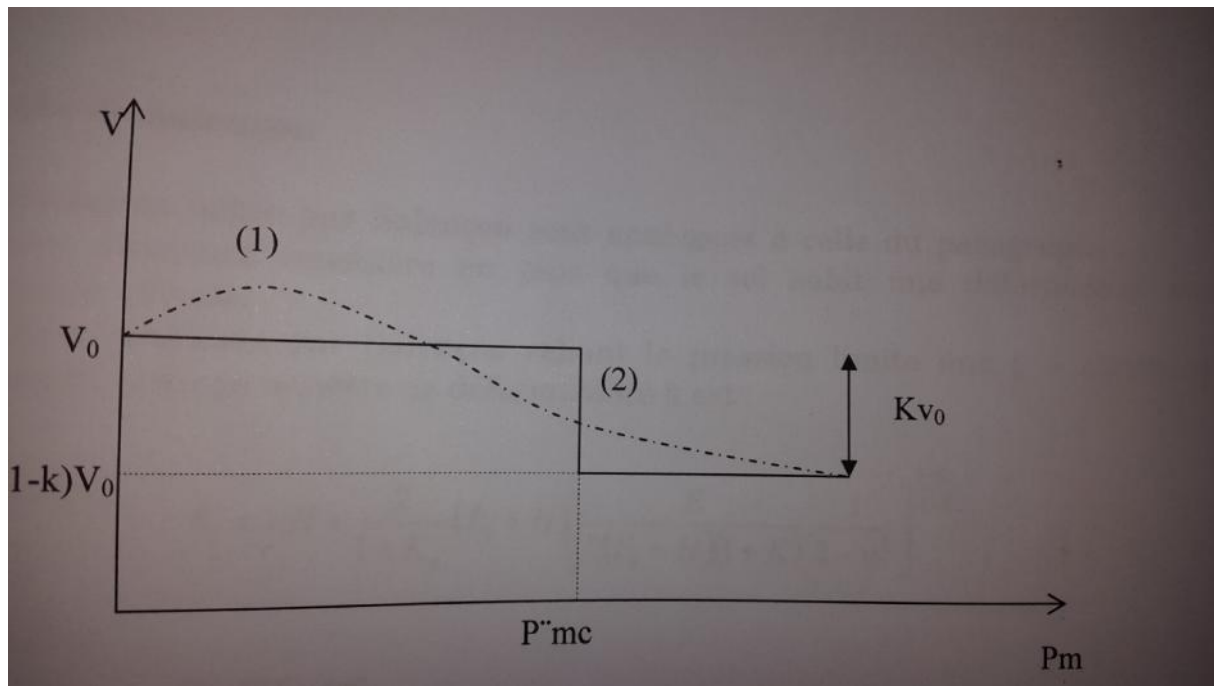


Figure II.3: méthode de Carrère, Maurice CASSAN (1978).

Il suppose que pour un élément en déformation plastique, la variation de volume en fonction de la pression moyenne se fait suivant la loi définie par la courbe 1 de la figure II.3 .compte tenu de la complexité de la loi, Carrère a substitué à la courbe réelle continue 2 de la figure II.3, ce qui conduit à définir deux paramètres caractérisant le comportement plastique du sol :

- 1) Un coefficient de compressibilité K défini de la manière suivante

$K = \text{variation de volume} / \text{volume initiale}$

- 2) Une contrainte moyenne critique P_{mc} qui délimite la zone où les déformations se font à volume constant de la zone où les déformations se font avec variation de volume.

Pour $K=0$, on retrouve la relation proposée par Ménard. Dans le cas d'une argile purement cohérente, Carrère propose la relation suivante pour la pression limite :

Pour $K=1$, on se retrouve dans le cas d'un matériau parfaitement compressible et l'expression de P_L devient

$$P_L = P_{mc} - C_u \quad \text{II.39}$$

Une comparaison entre les expressions proposées par Carrère (II.38) et (II.39) montre que la pression limite d'un terrain incompressible est supérieure à la pression d'un terrain compressible.

➤ Méthode de Salençon

Les hypothèses faites par Salençon sont analogues à celle du paragraphe (déformation sans variation de volume),

Cependant l'auteur considère en plus que le sol subit une déformation avec variation de volume.

La relation proposée par Salençon reliant la pression limite aux paramètres de cisaillement et au paramètre de déformabilité K est :

$$P_L = -H + \frac{2}{1+K_a} P_0 + H \frac{E}{2 P_0 + H} \frac{1}{1+K} * \frac{1}{1-\nu^2} \frac{1-K_a}{1+K} \quad \text{II.40}$$

Ou

$$H = C \cdot \text{Cot}g\varphi$$

$$K_a = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$$

Pour $K=1$, on trouve l'expression de P_L du paragraphe (déformation sans variation de volume)

Pour $K > 1$, on observe une déformation avec augmentation permanente de volume.

Pour $K < 1$, on observe une déformation avec diminution de volume.

II.3 Conclusion

A cause de certaines difficultés liées à l'opération de prélèvement d'échantillons intacts qui est toujours délicate, et le transport de chantier au laboratoire qui augmente encore le remaniement du sol, se sont développés les essais in situ qui permettent d'aller solliciter le milieu naturel en place et de s'affranchir en grande partie du remaniement inévitable avec les échantillons.

Parmi ces essais in situ, on trouve le pressiomètre Ménard qui est devenu l'essai le plus répandu, puisqu'il permet de donner une relation contraintes déformation qui représente le comportement du sol.

Les paramètres obtenus par cet essai utilisés soit directement, dans le calcul des ouvrages, soit pour déterminer les caractéristiques intrinsèques du sol (cohésion non drainée) en utilisant des règles empiriques, des méthodes théoriques ou des méthodes numériques.

Chapitre III

Présentation de l'outil numérique

Chapitre III

Présentation de l'outil numérique

III.1 Introduction

Depuis une vingtaine d'années, encouragées par l'augmentation exponentielle de la puissance de calcul des ordinateurs, les méthodes numériques ont connu un développement très important dans les bureaux d'études et les centres de recherches en géotechnique.

Leur utilisation est aujourd'hui très courante, et la conception de grands projets passe forcément par des analyses de ce type, afin de vérifier la stabilité des ouvrages en interaction avec leur environnement, de contrôler que les valeurs des déplacements et des contraintes soient admissibles, et d'aider au dimensionnement des structures.

Parmi ces méthodes, la méthode des éléments finis et la méthode des différences finies. Chaque méthode a sa particularité et son domaine d'application en fonction des problèmes à résoudre.

De nos jours, beaucoup de codes de calculs sont basés sur la méthode des éléments finis. Cette méthode a été développée autour des années soixante, établie à partir de la mécanique des milieux continus. Le principe de base de la méthode des éléments finis est la discrétisation du problème à modéliser en un nombre fini d'éléments ; les équations d'équilibre ou de mouvement sont alors résolues pour chaque élément et ensuite combinées pour produire une solution globale du problème. La méthode des éléments finis est assez simple et beaucoup d'exemples de son utilisation ont été mis en disponibilité au cours des quarante dernières années.

La méthode des différences finies, a été utilisée vers la fin des années soixante-dix, et le choix de la méthode numérique pour notre recherche est motivé par la disponibilité du code de calcul FLAC^{2D} qui utilise la méthode des différences finies.

III.2 présentation de la méthode des différences finis

La méthode des différences finies est la plus vieille technique de résolution des systèmes d'équations différentielles avec valeurs initiales et conditions aux frontières. Elle traite le milieu comme un massif continu, et le présenter par une grille d'éléments rectangulaire, ou chaque maille (élément) est dotée des propriétés mécanique du milieu continu équivalent à des lois de comportement et d'interaction associés à des relations de continuités et de compatibilité inter élément permettent de décrire le comportement mécanique de ces volumes élémentaires de matériau, qui contribuent à la réponse globale du massif

Cette méthode permet de résoudre des systèmes d'équation différentielles avec condition initiales et /ou au limite.

L'avantage de cette méthode est quelle permet de simplifier considérablement la description géométrique du milieu, ce qui facilite la mise en œuvre informatique du modèle (petit nombre de nœud, automatisation de maillage). La difficulté réside dans la détermination des caractéristiques équivalentes et la taille des échantillons à prendre en compte pour que le modèle numérique soit représentatif du massif réel.

III.3 présentation de logiciel FLAC

FLAC (Fast Lagrangian Analysis Of Continua) est un logiciel crée par Peter Cundall en 1986 et développé par la suite par la société Américaine ITASCA consulting group, est spécialement conçu pour les problèmes de géo-mécanique en général, et pour les problèmes de mécanique des sols en particulier.

C'est un logiciel de modélisation mécanique de problèmes de géotechnique qui utilise la méthode des différences finies. FLAC fait partie des outils de calculs dits en «contraintes-déformation», dans un milieu continue.

III.3.1 Ecriture d'un fichier FLAC

Quelque soit le problème traité, l'écriture d'un fichier exécutable sous FLAC suit les étapes suivantes

1. Définition de ou des configurations retenues (mode de calcul) ;
2. Géométrie de problème ;
3. Choix de model de comportement et de ses paramètres,
4. Détermination des différentes conditions initiales et limites ;
5. Spécifier les fonctions ou les variables définies par l'utilisateur ;
6. Résolution de problème.

L'organigramme donné par la figure (III.1), montre le procédé général de résolution d'un problème géotechnique dans FLAC^{2D}

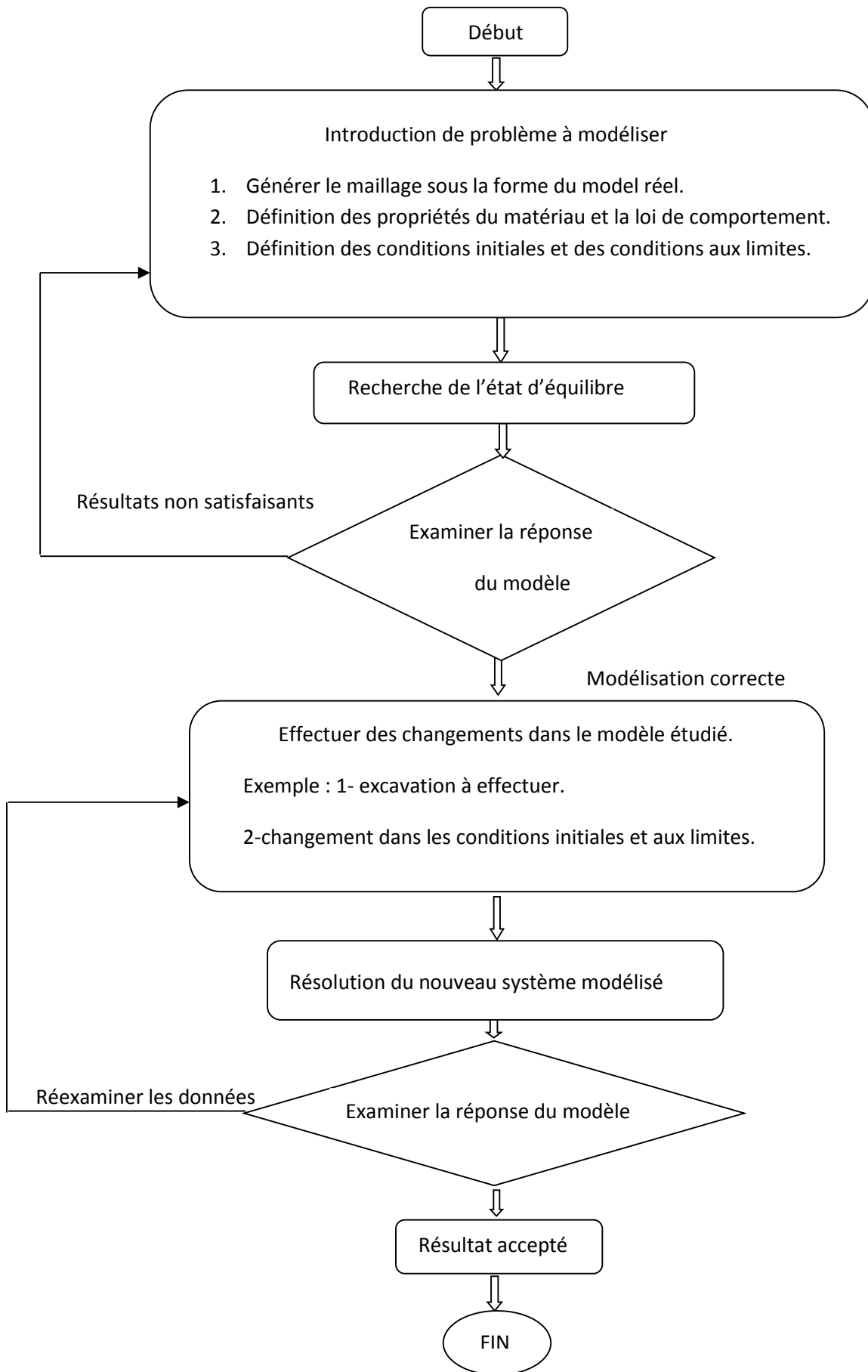


Figure III.1 : Procédé général de résolution des problèmes en géotechnique selon FLAC^{2D}

III.3.2 Modèle de comportement des sols

FLAC regroupe dans ses différentes versions plusieurs modèles élastoplastiques ; (Mohr Coulomb, Mohr Coulomb avancé, Cam Clay modifié, Hard soil model, soft soil model...) décrivant le comportement des géomatériaux. Il reste toutefois à l'ingénieur de choisir le modèle le mieux adapté au problème qu'il désire traiter en fonction des conditions rencontrées in situ.

La loi de comportement d'un matériau est la relation fonctionnelle qui permet d'exprimer les efforts intérieurs en fonction des grandeurs cinématiques qui décrivent la déformation du milieu. La forme de la relation fonctionnelle est donnée comme suit :

$$\sigma_{ij} = F \varepsilon_{ij}$$

σ_{ij} : Tenseur des contraintes ;

ε_{ij} : Tenseur des déformations ;

F : fonctionnelle.

Les lois de comportement sont souvent utilisés sous forme incrémentales comme suit :

$$\delta \varepsilon_{ij} = G(\delta \sigma_{ij})$$

$\delta \varepsilon_{ij}$: L'incrément de déformation ;

$\delta \sigma_{ij}$: L'incrément de contrainte ;

G : fonction tensorielle

III.3.2.1 Elasticité

L'élasticité correspond à la partie réversible des déformations. Le modèle élastique est le modèle de matériau le plus simple, il est caractérisé par une relation linéaire-réversible et indépendante de l'histoire des sollicitations entre la contrainte totale et la déformation (loi de Hooke). On peut citer, l'élasticité linéaire isotrope et l'élasticité non linéaire.

III.3.2.2 Elasticité linéaire isotrope

Dans le cas de l'élasticité linéaire isotrope, le tenseur des déformations est relié au tenseur des contraintes, et la relation la plus courante est donnée par la relation de Hooke :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij}$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{(1 + \nu)} \varepsilon_{ij} + \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \varepsilon_{kk} \delta_{ij}$$

δ_{ij} : Indice de Kronecker.

III.3.3.3 Elastoplasticité de Mohr Coulomb

En réalité, très peu de matériaux ont un comportement élastique parfait. Au-delà d'un certain seuil de contraintes, tout ou une partie de la déformation additionnelle est alors irréversible.

En complément de la déformation élastique définie par la loi de Hooke, les modèles élastoplastique intègrent ainsi un degré de déformation plastique permanent, caractérisé par une loi d'écoulement lorsque la surface de charge est atteinte.

La théorie de l'élastoplasticité tente de décrire le comportement non linéaire et irréversible des matériaux. Cette partie vise à présenter les notions fondamentales de la théorie de l'élastoplasticité qui sont :

- La partition des déformations : est caractérisée par la présence de déformations irréversibles en déchargement. Les déformations se décomposent en une partie élastique et une partie plastique ;
- La surface de charge : qui définit le seuil de contraintes au-delà duquel le comportement du matériau est irréversible ;

- L'écroutissage : qui permet de faire évoluer le domaine élastique ;
- La règle d'écoulement plastique : qui décrit l'évolution des déformations plastiques.

Dans le modèle élastoplastique de Mohr-Coulomb, l'incrément de déformation totale se décompose donc en deux parties, l'une élastique et l'autre plastique :

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon^e_{ij} + \varepsilon^p_{ij}$$

Toutefois, la composante plastique n'est non-nulle que durant l'écoulement plastique.

Dans le cas contraire, l'incrément de déformation totale est égal à sa composante élastique, conformément à la loi de Hooke, qui s'écrit sous sa forme incrémentale :

$$\Delta\sigma_1 = \alpha_1\Delta\varepsilon_1^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_2^e + \Delta\varepsilon_3^e)$$

$$\Delta\sigma_2 = \alpha_1\Delta\varepsilon_2^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_3^e)$$

$$\Delta\sigma_3 = \alpha_1\Delta\varepsilon_3^e + \alpha_2(\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_2^e)$$

Dans les équations précédentes : $\alpha_1 = K + \frac{4G}{3}$ et $\alpha_2 = K - \frac{2G}{3}$, où K et G, désignent respectivement les modules de compressibilité volumique et de cisaillement du matériau, exprimés en PASCALS. Ils sont liés au module de Young et au coefficient de poisson par les relations suivantes :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Le domaine plastique, quant à lui, est défini par un critère de rupture associé à une loi d'écoulement plastique.

III.3.3.1 le critère de rupture de Mohr-Colomb

Tout champ de contraintes peut être exprimé en terme de contraintes principales σ_1 , σ_2 et σ_3 . la convention de signe, dans FLAC, attribuant des valeurs négative à la compression, et positives à la traction, les contraintes principales sont alors ordonnées de la manière suivante :

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$$

L'enveloppe de rupture (aussi appelée surface de charge) de Mohr-Colomb (figure III.3) est définie du point A au point B par la relation suivante, qui fait intervenir les caractéristiques de résistance au cisaillement du matériau :

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 \overline{N_\phi} + 2c \overline{N_\phi} = 0$$

Du point B au point C, la rupture est contrôlée par la résistance à la traction du matériau, f^t :

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 = 0$$

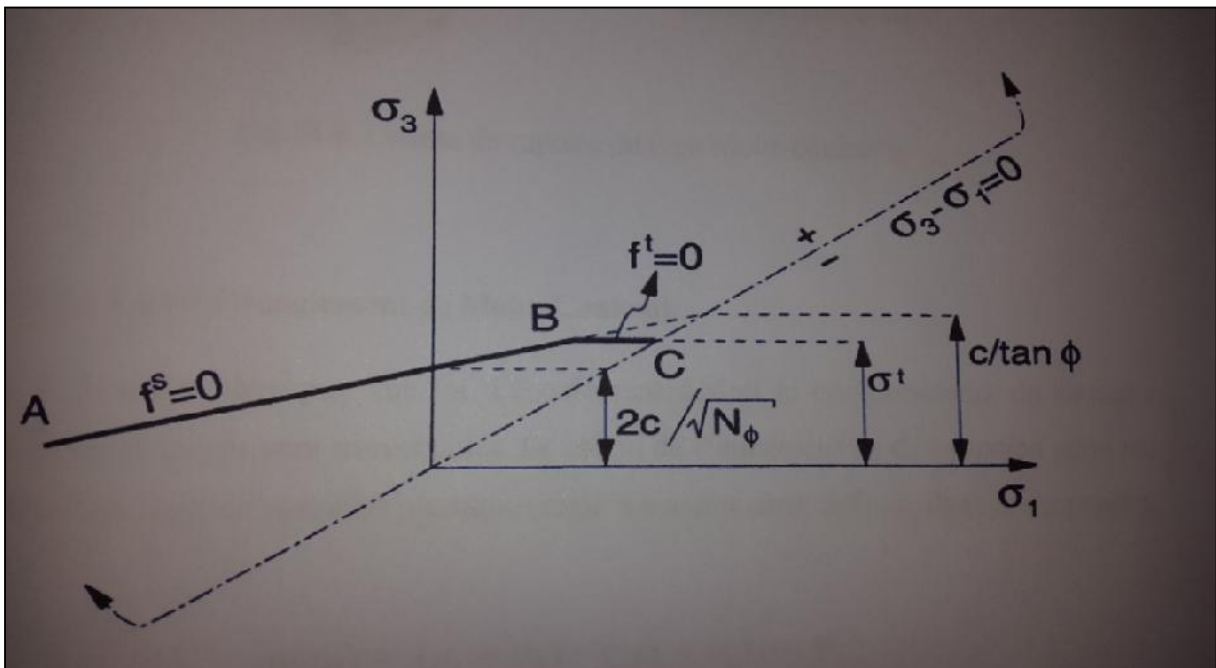


Figure III.2 : Critère de rupture de Mohr-Coulomb dans FLAC, d'après ITASCA.

Les valeurs des paramètres N_ϕ , σ_t peuvent être calculées à partir des valeurs de la cohésion C et de l'angle de frottement interne ϕ et inversement :

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{ou} \quad \sin \phi = \frac{N_\phi - 1}{N_\phi + 1}$$

$$\sigma_t \leq \frac{C}{\tan \phi} \quad \text{ou} \quad C \geq \sigma_t \tan \phi$$

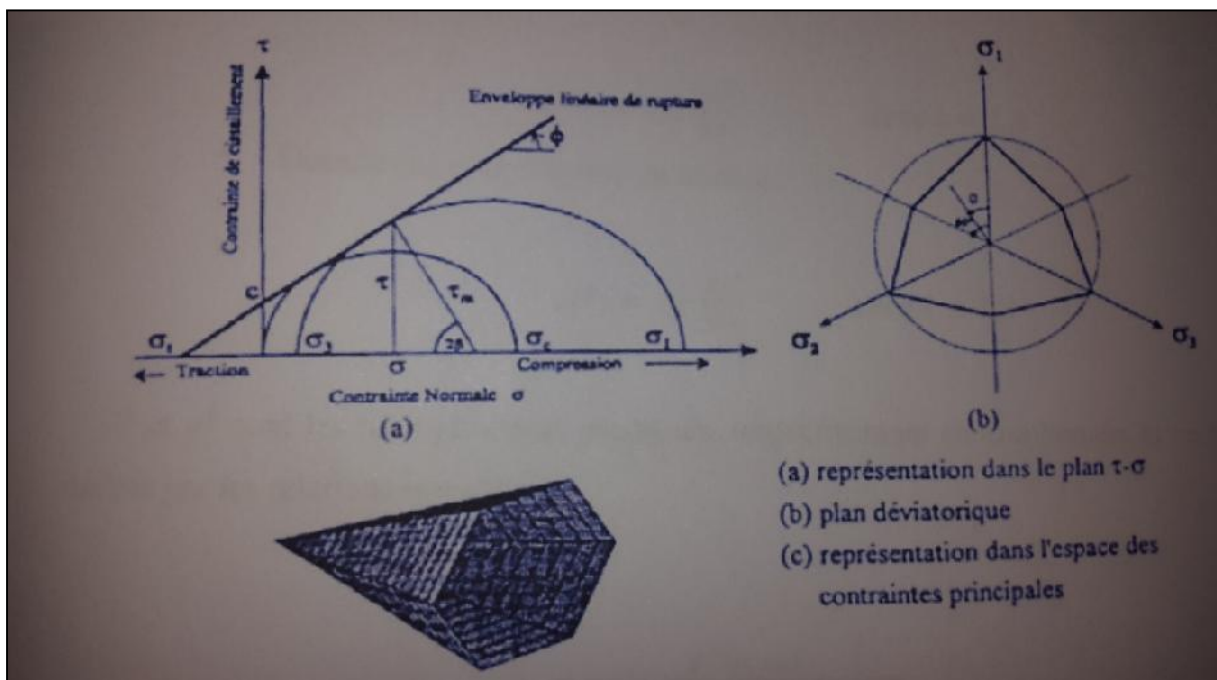


Figure III.3 : Critère de rupture dans le plan Mohr-Coulomb

III.3.3.2 Paramètres de la loi de Mohr-Coulomb

La loi de comportement élastoplastique de Mohr-Coloumb est associée à une loi élastique linéaire, elle comprend donc au total sept (07) paramètre :

- bulk_mod «K» : Module de compressibilité.
- shear-mod «G» : Module de cisaillement.
- cohésion «C» : la cohésion de matériau.
- density « » : Densité de matériau.
- friction « » : Angle de frottement interne.
- dilatation « »: angle de dilatation.
- tension « t »: Contrainte de traction limite.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une petite présentation de l'outil numérique FLAC^{2D} afin de l'utiliser pour la modélisation numérique de l'essai pressiométrique, ce qui va faire l'objet de chapitre suivant.

Pour le choix de modèle de comportement, on a opté pour le modèle élastoplastique le plus utilisé Mohr Coulomb, pour sa simplicité, et le faible nombre de paramètres qu'il utilise.

Chapitre IV

Modélisation numérique de l'essai pressiométrique

Chapitre IV

Modélisation numérique de l'essai pressiométrique

IV.1 Introduction

Dans les paragraphes ci-dessous, nous nous proposons d'illustrer la réponse du sol pour une sollicitation de type pressiométrique, d'étudier et de comparer les résultats expérimentaux aux résultats des simulations numériques et de l'utiliser dans le cadre de l'identification des paramètres du comportement des sols.

IV.2.1 Présentation du problème

On considère l'expansion de la sonde dans un milieu élastoplastique ;

L'hypothèse de déformation plane dans la direction verticale est prise en compte dans cette étude. Cette hypothèse se justifie par la présence de cellules de garde autour de la sonde.

Le problème aux limites est donc défini à la fois axisymétrique et en déformation plane, donc c'est un problème bidimensionnel.

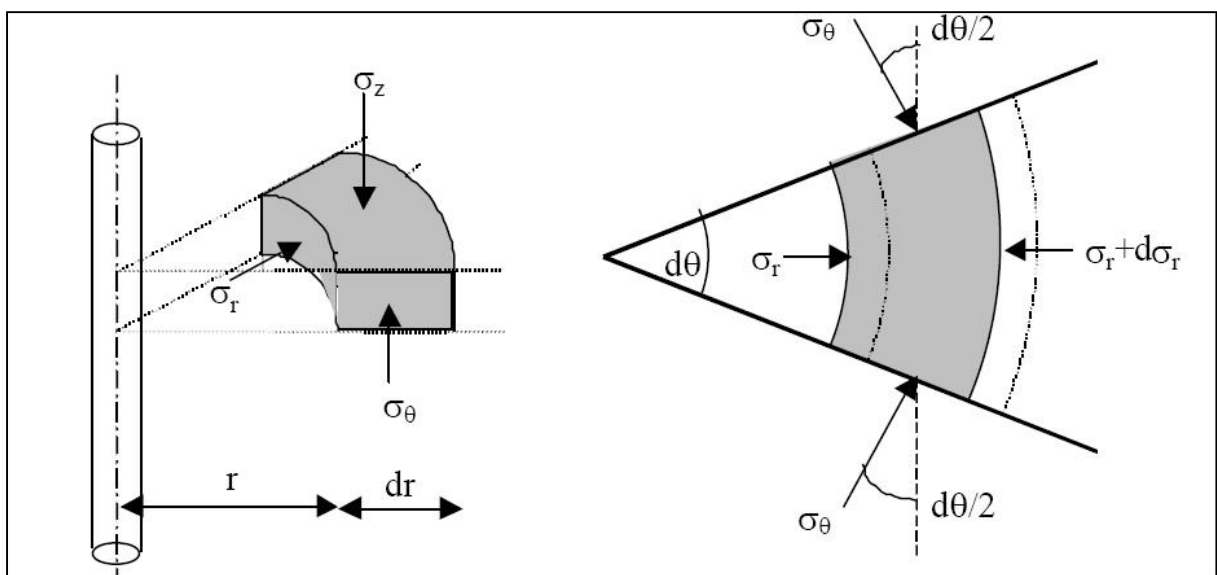


Figure IV.1 : Equilibre d'un élément de sol en déformation plane.

IV.2.2 Le maillage

La détermination du maillage répondra à des considérations physiques réelles et à des constatations issues des travaux précédents.

On a considéré une grille de 30 éléments dans la direction radiale

IV.2.2.1 Dimensions

Pour la longueur de l'échantillon on a pris la même longueur prise par [Bahar, 1992], qui est égale à 4 m, puisque il a montré qu'elle est suffisante pour éliminer l'influence du massif.

IV.2.2.2 Génération du maillage

Le chargement (sonde pressiométrique) est appliqué sur une face de forage, d'où le maillage doit être resserré au voisinage de la sonde et ce raffinement diminue au fur à mesure qu'on s'éloigne de la sonde.

S'appuyant toujours sur des études précédentes, on a choisi une progression géométrique, de raison 1.25, cette progression s'écrit comme suit :

$$r_n = r_{n-1} + \Delta r_n$$

Avec
$$\Delta r_n = 1.25 * \Delta r_{n-1}$$

On alors 30 élément rectangulaires dans la direction radiale

IV.2.2.3 Conditions aux limites

- Loin de la sonde, le sol ne se déforme pas, on impose un déplacement nul suivant l'axe xx' à 4m.

$$\begin{aligned} dx &= dx_0 && \text{pour } r = r_0 \\ dx &= 0 && \text{pour } r = r \end{aligned}$$

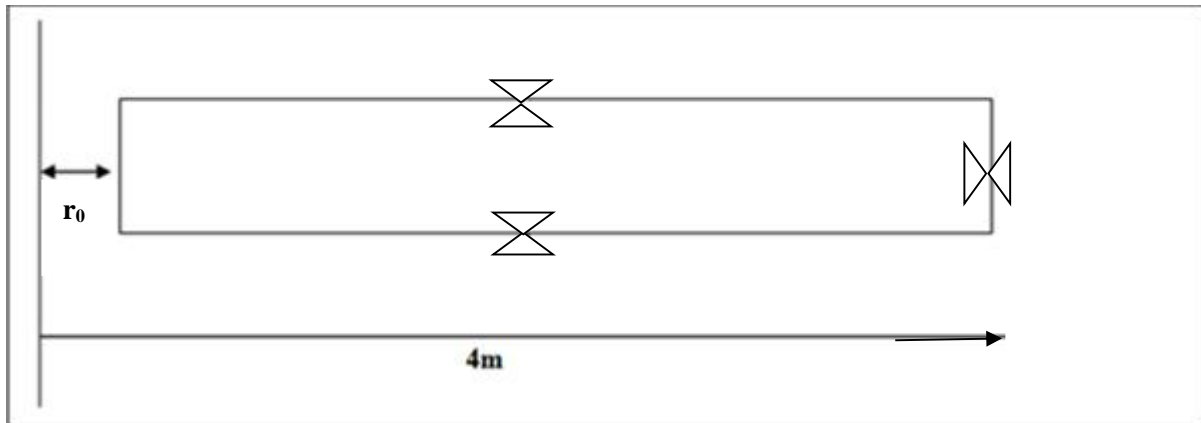


Figure IV.2: Conditions aux limites

IV.2.2.4 Conditions initiales

Avant d'appliquer une charge pressiométrique, il faut représenter l'état initial du sol, pour cela, on lui applique l'état de contraintes initiales, qui représente la pression des terres au repos.

$$P_0 = K_0 \times \gamma \times Z$$

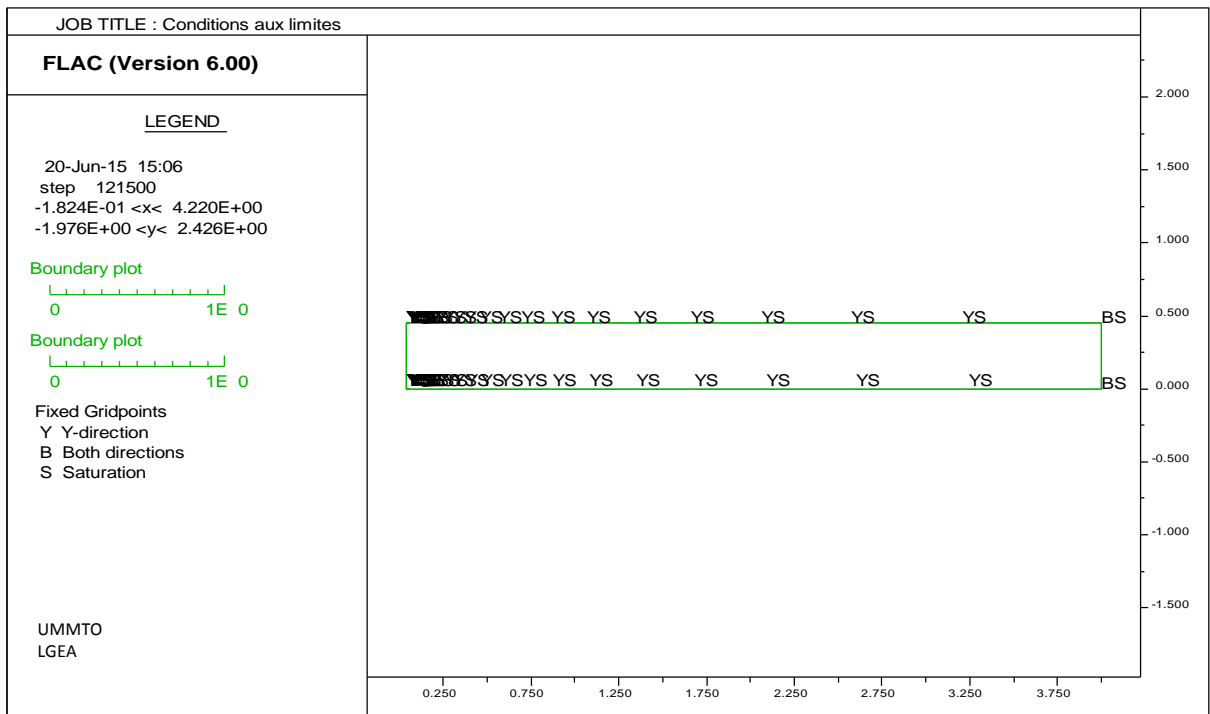


Figure IV.3 : Conditions aux limites, modèle Mohr-Coulomb

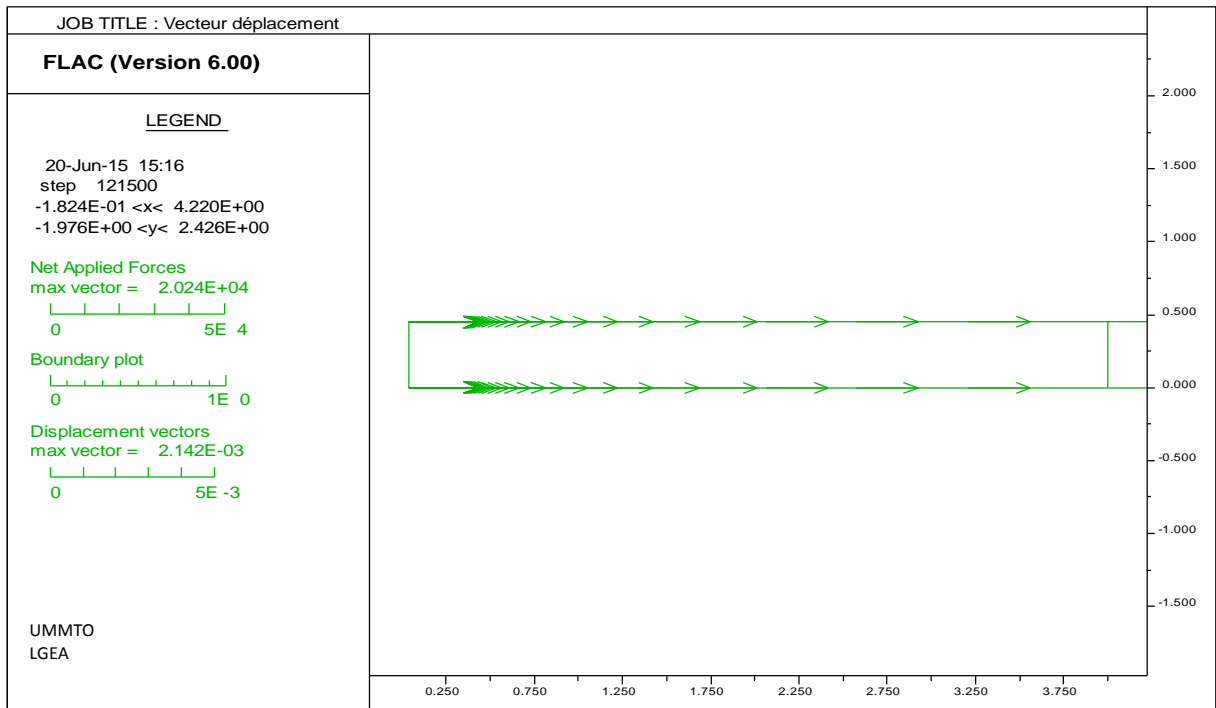


Figure IV.4 : le vecteur déplacement (FLAC)

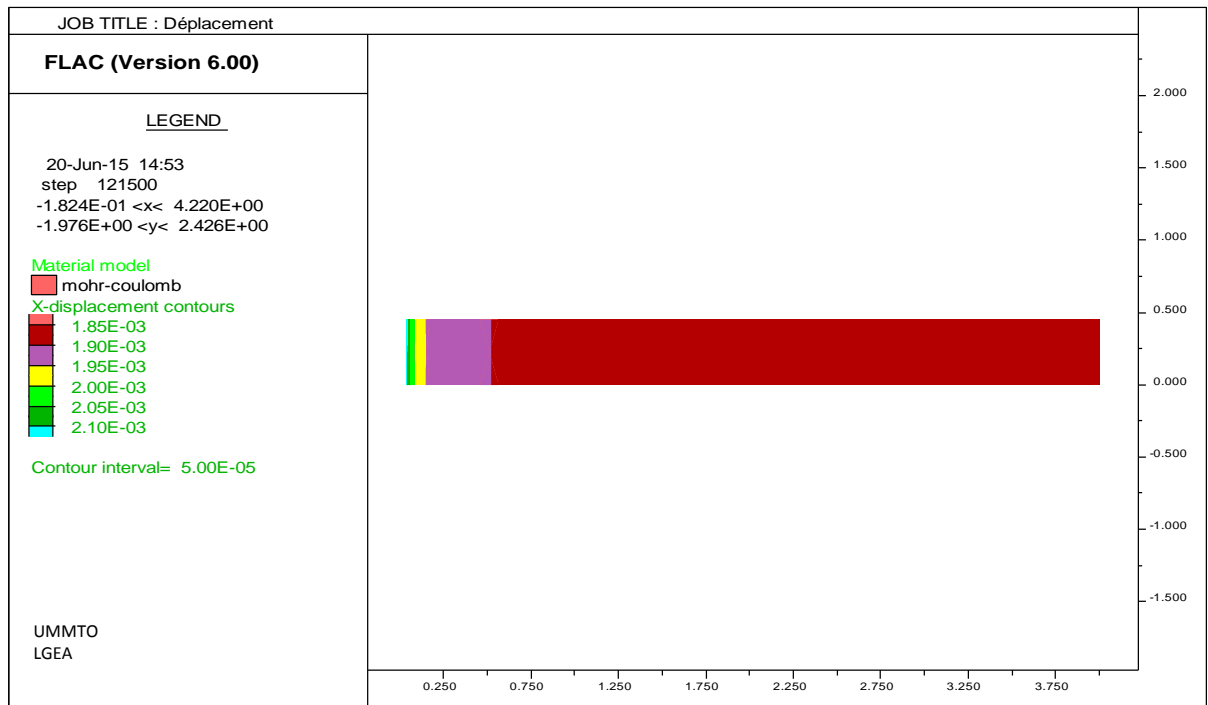


Figure IV.5 : Le déplacement au niveau de grillage

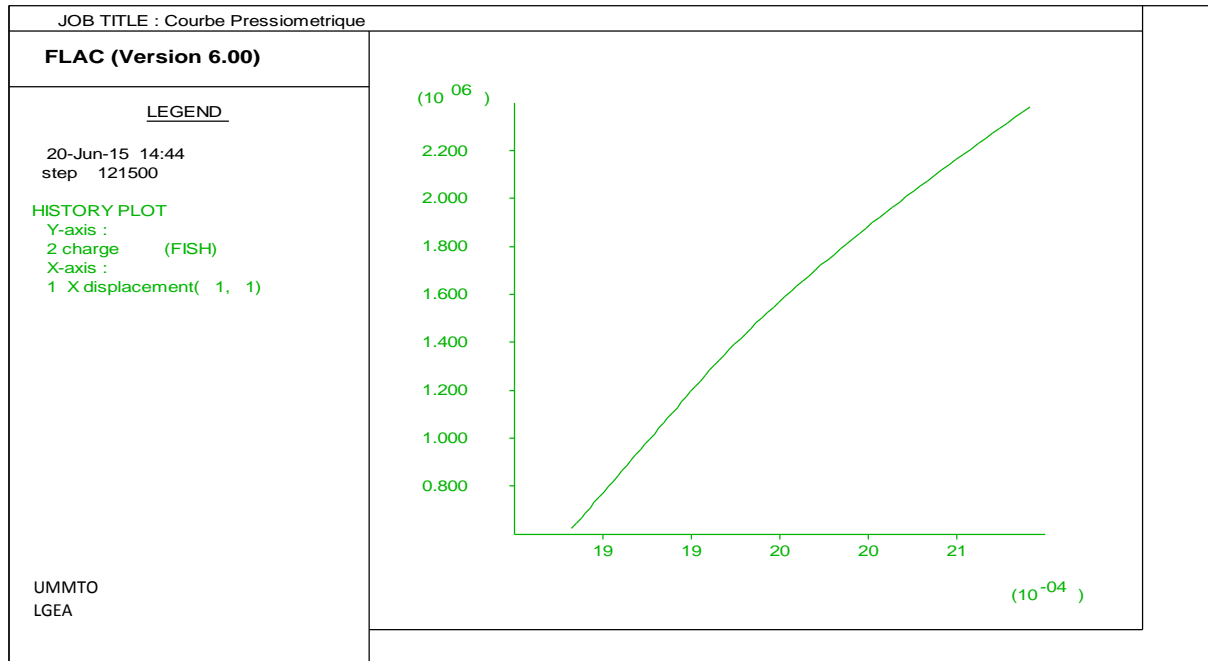


Figure IV.6 : Courbe pressiométrique

IV.3 Analyse de l'essai pressiométrique

IV.3.1 Modèle Mohr Colomb

On a défini précédemment le modèle élastique parfaitement plastique de Mohr Colomb et ses paramètres (chapitre III). Dans ce qui suit, on présentera une simulation de l'essai pressiométrique avec ce modèle en analysant l'influence de quelques paramètres.

Les paramètres utilisés sont donnés dans le tableau IV.1 (les paramètres sont ceux du site Tizi Ouzou à 4m, point 1).

Tableau IV.1 : paramètres de sol

		Cu	E module de Young
10^0	1890 KN/m ³	3.9 bar	558.6 bar

IV.3.1.1 Analyse de l'influence des paramètres du modèle Mohr Colomb

➤ Influence de l'angle de frottement

On considère un maillage simple, avec les mêmes paramètres choisis au début mais en variant la valeur de l'angle de frottement.

On fait trois calculs, en considérant trois valeurs de α , $=5^0, 10^0$, et 15^0 .

L'influence de l'angle de frottement sur la réponse des simulations est représentée sur la figure (IV. 7)

On constate que lorsque l'angle de frottement augmente, la pression de sol augmente. Par exemple quand α augmente de 5^0 à 10^0 , la pression de sol passe de 800 Kpa à 900 Kpa, pour une même déformation.

Quand α augmente de 5^0 à 15^0 , la pression de sol passe de 800 Kpa à 1000 Kpa.

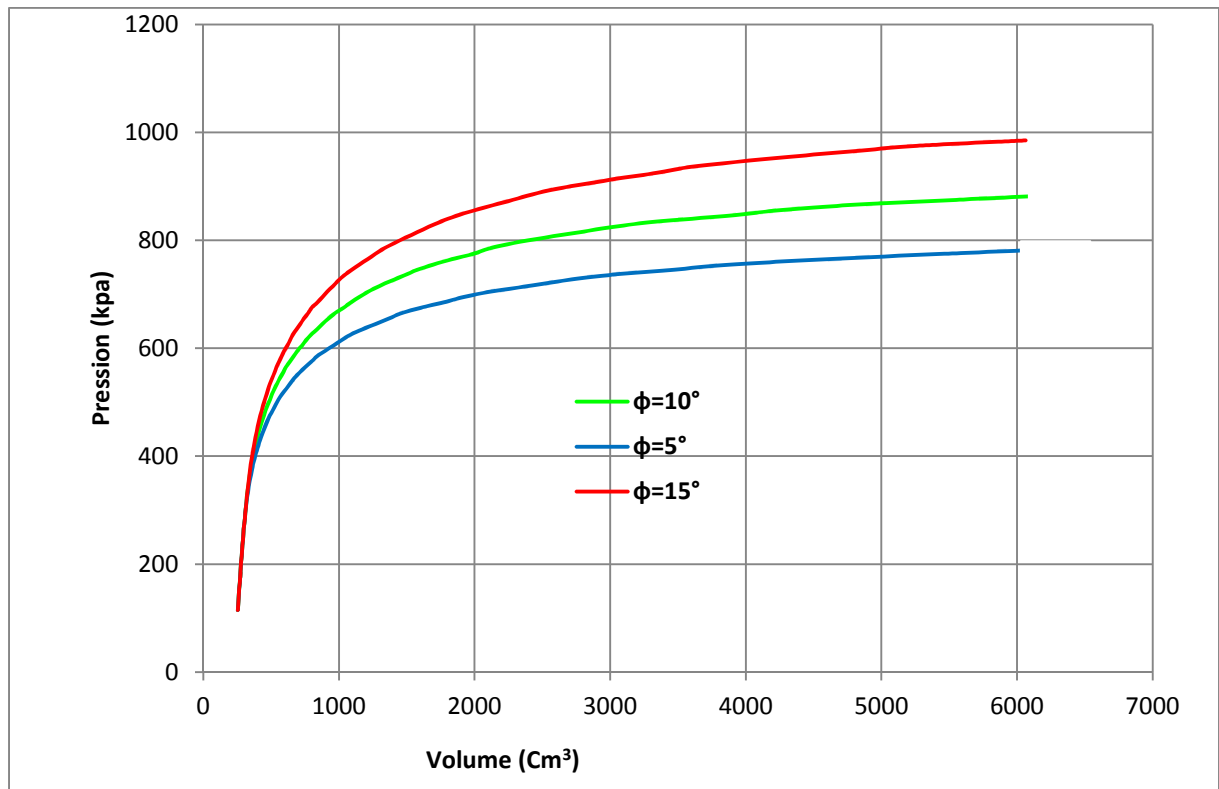


Figure IV.7 : Influence de l'angle de frottement

➤ Influence de module de Young E

On a simulé l'essai pressiométrique avec trois valeurs de module de Young qui sont

$E = 20, 25, \text{ et } 30 \text{ Mpa}$, en maintenant les autres paramètres fixes.

Les courbes résultantes sont données par la figure (IV.8)

➤ On remarque que lorsque E augmente, la pression de sol augmente, d'où le module E a une influence considérable sur la courbe pressiométrique

On remarque que la pente varie avec E, cette dernière augmente avec l'augmentation de module de Young.

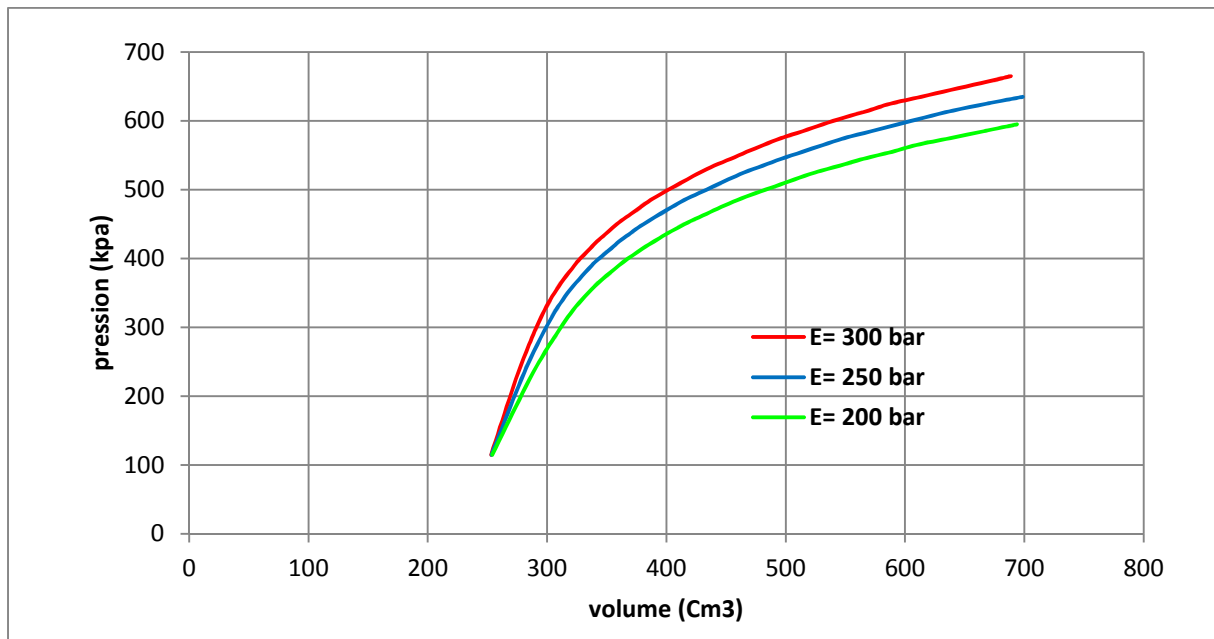


Figure IV.8 : Influence de module de Young E

➤ **Influence de la cohésion non drainée C_u**

On a aussi simulé l'essai pressiométrique avec trois valeurs de cohésion C_u qui sont

$C_u = 1.5, 2,$ et 2.5 bar en maintenant les autres paramètres fixes.

Les courbes résultantes sont données par la figure (IV.9)

On remarque que lorsque C_u augmente, la pression de sol augmente, d'où la cohésion a une influence considérable sur la courbe pressiométrique

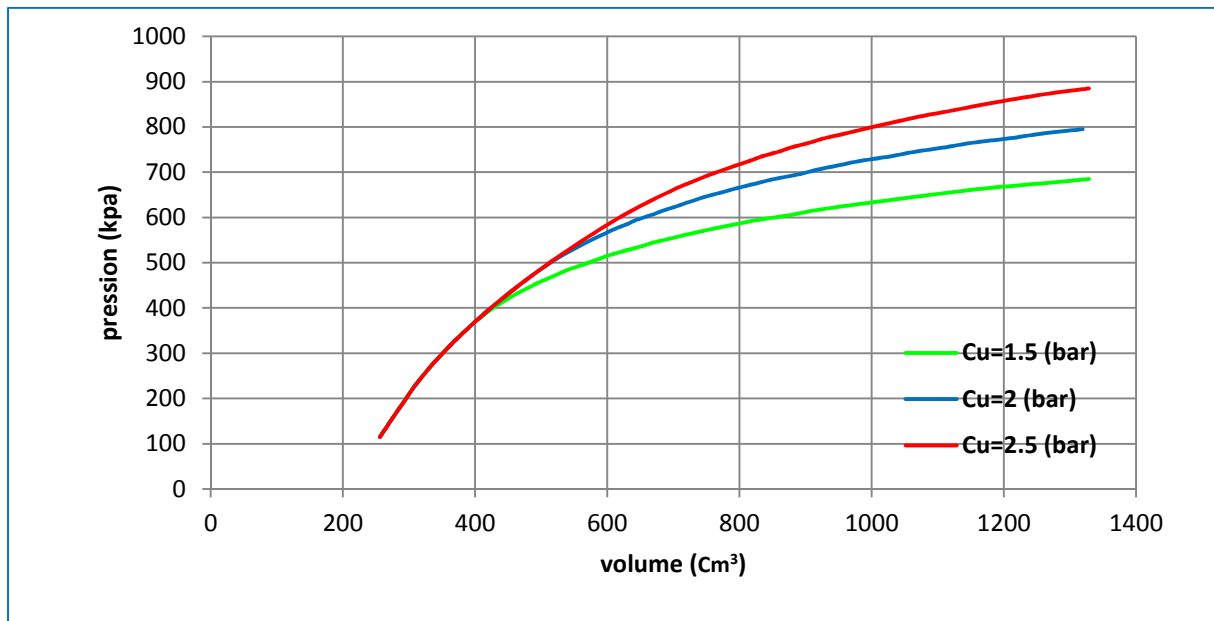


Figure VI.9 : Influence de la cohésion

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une simulation de l'essai pressiométrique en utilisant l'outil numérique Flac^{2D}, en considérant un modèle élastoplastique de Mohr Coulomb, ce qui va nous permettre de faire une identification des paramètres du sol à étudier.

On a constaté à partir de la simulation que l'influence du module de Young E, la cohésion non drainée Cu, et l'angle de frottement sur les résultats de l'essai est significative. On a remarqué que plus on augmente ces paramètres, il y a variation de la pression limite, ce qui permet de faire une approche des paramètres à introduire, ainsi que d'identifier ces derniers.

Chapitre V

Correction des courbes pressiométriques et interprétation

Chapitre V

Correction des courbes pressiométriques et interprétation

V.1 Introduction

Suite à la réalisation de l'essai pressiométrique dans le sol, les paramètres de comportement de sol seront enregistrés,

Les courbes établies directement à partir des lectures, sont des courbes brutes qui ne peuvent être interprétées sans diverses corrections.

En effet, les lectures des pressions et volumes faites sur le terrain doivent subir des corrections tenant en compte ;

- De la surcharge piézométrique due à la hauteur de la colonne d'eau dans l'appareil,
- De l'élasticité propre de l'ensemble membrane + gaines, appelée « inertie ».
- De la compressibilité interne de l'appareil.

V.2 Présentation des essais

À partir des résultats des essais pressiométriques réalisés par le Laboratoire National De l'Habitat Et De La Construction Centre « L.H.C.C », réalisée sur un sol pour un projet de réalisation du système de transport par câble dans la wilaya de Tizi ousou , On a tracé les courbes brutes, ensuite les courbes corrigées, en effectuant diverses corrections (cités dans le chapitre I) comme c'est illustré ci-après.

Donc on a ;

$$P = P_m - P_i + \gamma_w (Z + a)$$

P : La pression exercée sur la paroi de forage.

P_m : La pression lue sur le manomètre

P_i : est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité V_m

Z : la profondeur au dessous de l'appui du pressiomètre

a : la hauteur hydrostatique.

γ_w : Poids volumique de l'eau

Point 1

Le tableau suivant ainsi que la figure(V.1) , illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites.

Tableau V.1 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 4 m.

Pression brute	Volume fluage	pression corrigée	volume
0,5	30	0,25	160
1	3	0,7	189
1,5	1	1,15	193
2	1	1,6	196
3	1	2,5	206
4	1	3,4	214
5	1	4,35	223
7	2	6,25	246
9	10	8,25	290
11	24	10,02	376
13	40	11,77	480

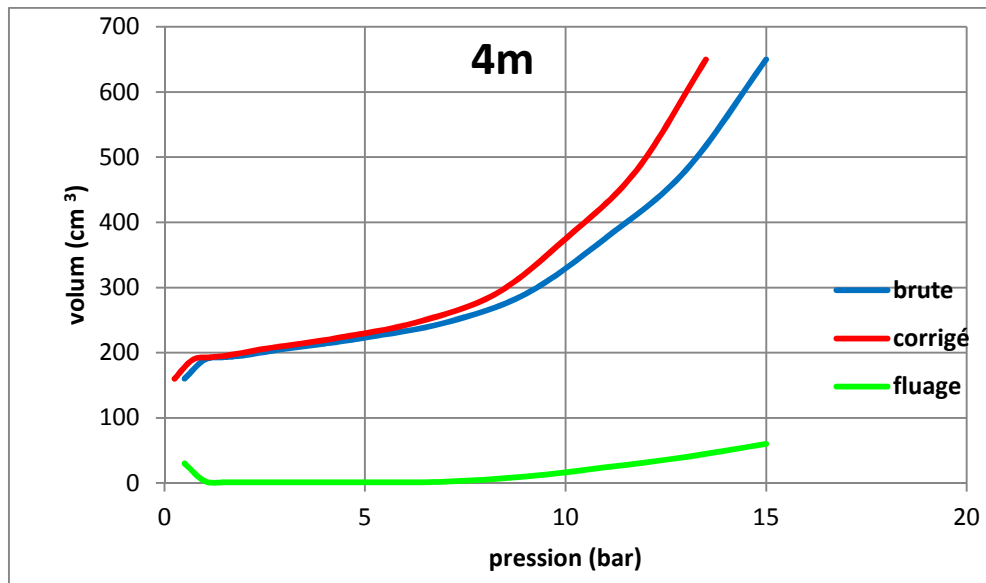


Figure V.1 : Courbe expérimentale, brute et corrigé à 4 m.

Le tableau suivant ainsi que la figure(V.2), illustrent les résultats de l'essai à 5 m de profondeur, avec les différentes corrections faites.

Tableau V.2 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

pression	fluage	pression corrigée	volume
1,05	1	0,95	131
2	1	1,85	140
3	1	2,84	146
5	2	4,76	160
7	2	6,7	174
9	2	8,65	190
11	5	10,55	215
13	8	12,45	250
15	10	14,33	292
17	12	16,2	340
19	20	17,93	400

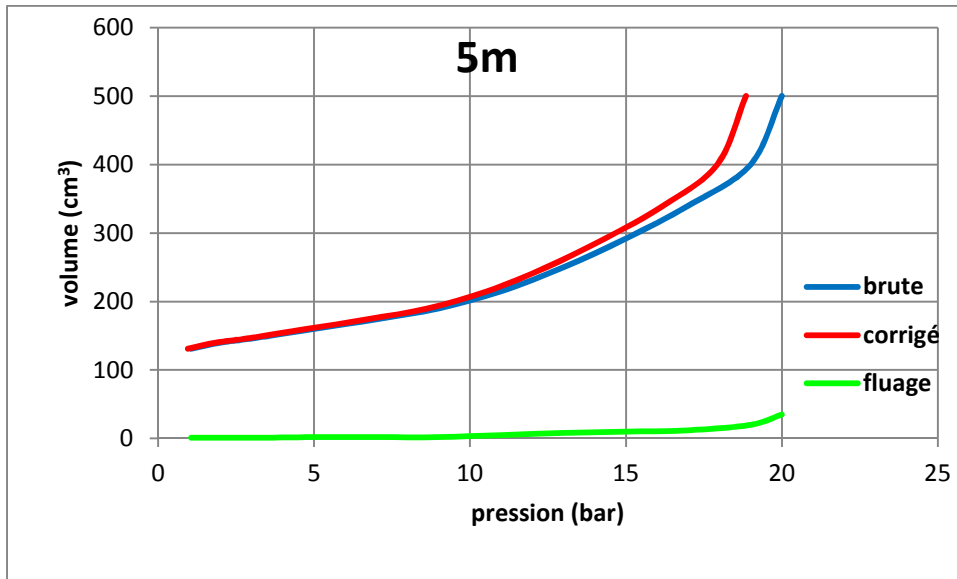


Figure V.2 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 6 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.3 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 6 m

pression	fluage	pression cor	volume
1	1	0,96	137
2	1	1,95	144
3	1	2,9	148
5	1	4,85	156
7	1	6,82	164
9	1	8,8	172
13	4	12,75	194
17	5	16,2	220
21	6	20,575	250
25	10	24,325	300

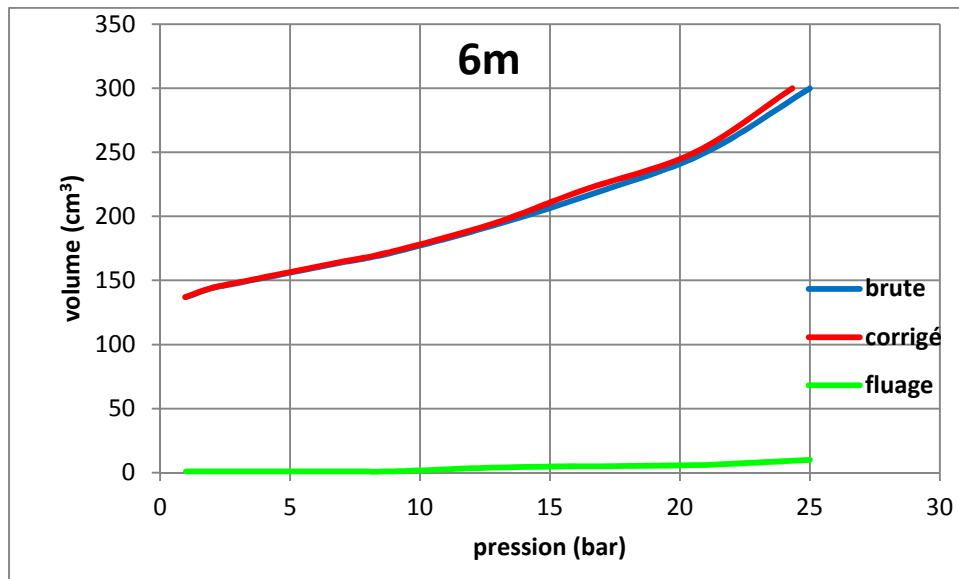


Figure V.3 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 6 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 7 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.4 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 7 m

pression corrigée	pression	volume	Volume de fluage
0,8	1	130	4
1,15	2	134	1
2,11	3	138	1
3,09	5	146	1
5,05	7	156	1
7,01	9	166	1
8,95	13	180	2
12,86	17	200	3
20,575	21	225	5
24,325	25	250	5

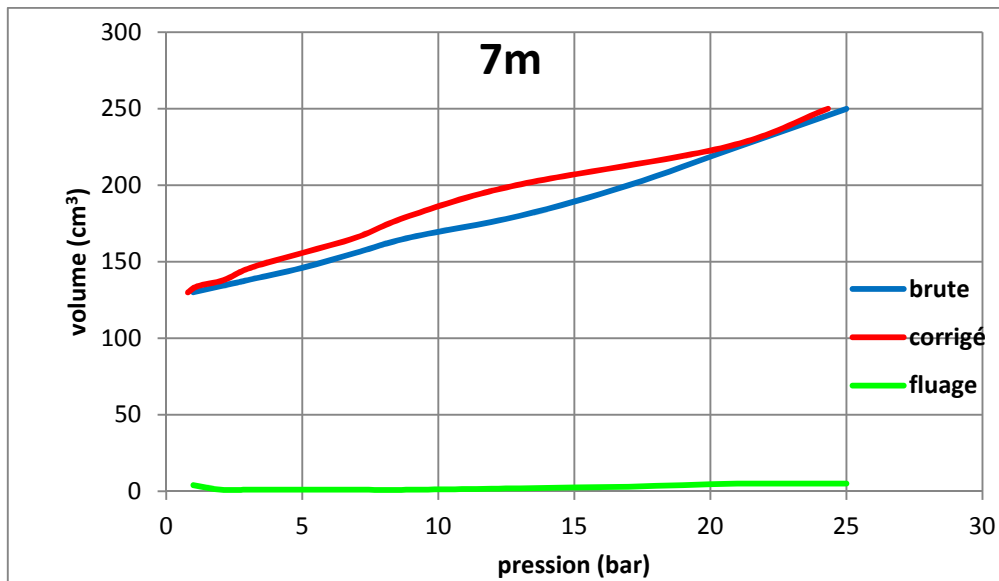


Figure V.4 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 7 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.5 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8m

pression	volume	Volume de fluage	pression corrigée
1	106	1	1,35
2	110	1	2,32
3	112	1	3,3
5	116	1	5,24
7	118	1	7,21
9	120	1	9,2
13	124	1	13,17
17	128	1	17,15
21	134	1	21,175
25	140	1	25,15

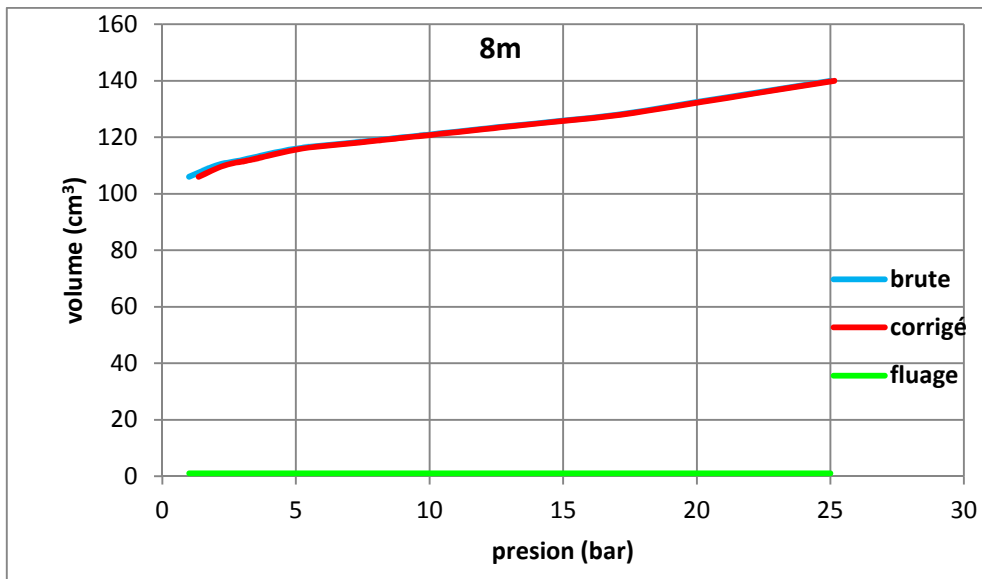


Figure V.5 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.6 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

pression	volume	Volume de fluage	pression corrigée
1	163	1	1,15
2	180	2	2,07
3	190	1	3,02
5	196	1	5,01
7	204	1	7
9	208	1	8,8
13	213	1	12,6
17	220	1	16,4
21	230	1	20,91
25	240	1	24,875

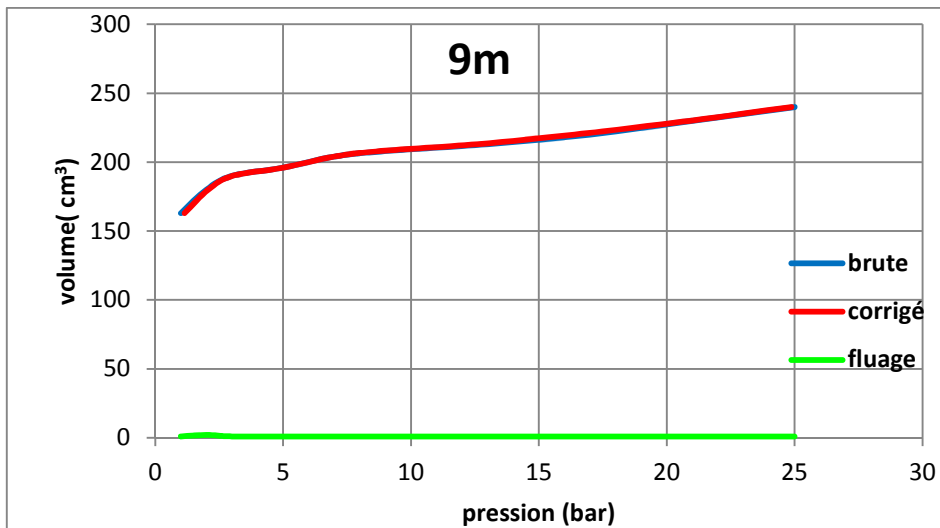


Figure V.6 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Point 2

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.7 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 4 m

pression	volume	fluage	pression cori
0,5	100	15	0,5
1	145	15	0,75
1,5	170	5	1,15
2	180	1	1,6
3	194	2	2,55
4	220	5	3,45
5	250	6	4,35
6	282	6	5,25
7	320	8	6,15
8	370	12	7,02
9	450	20	7,85

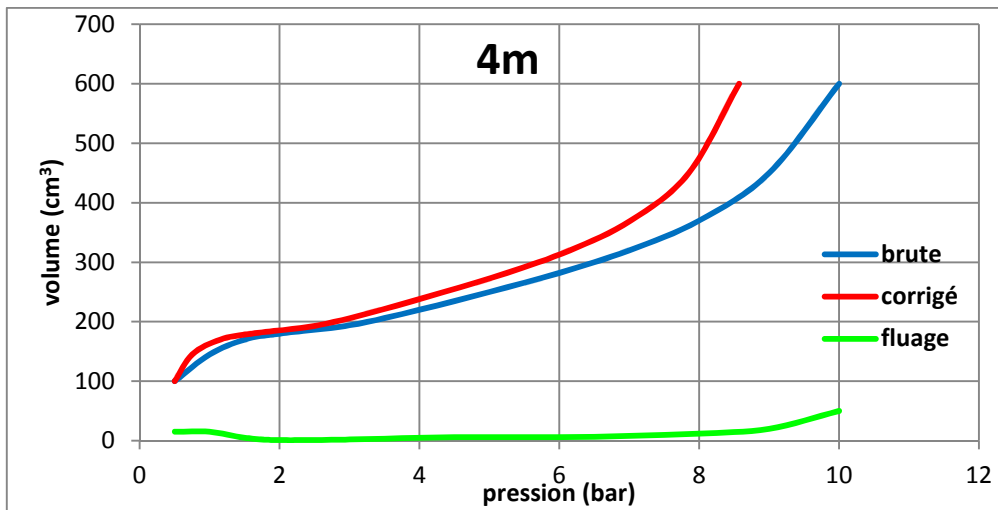


Figure V.7 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 4 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.8 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

pression	fluage	pression corrigée	volume
0,5	10	0,4	100
1	9	0,85	140
1,5	20	1,05	215
2	1	1,55	221
3	2	2,5	236
4	3	3,4	254
5	3	4,35	274
6	5	5,25	300
7	7	6,22	330
8	8	7,15	362
9	10	8,05	400

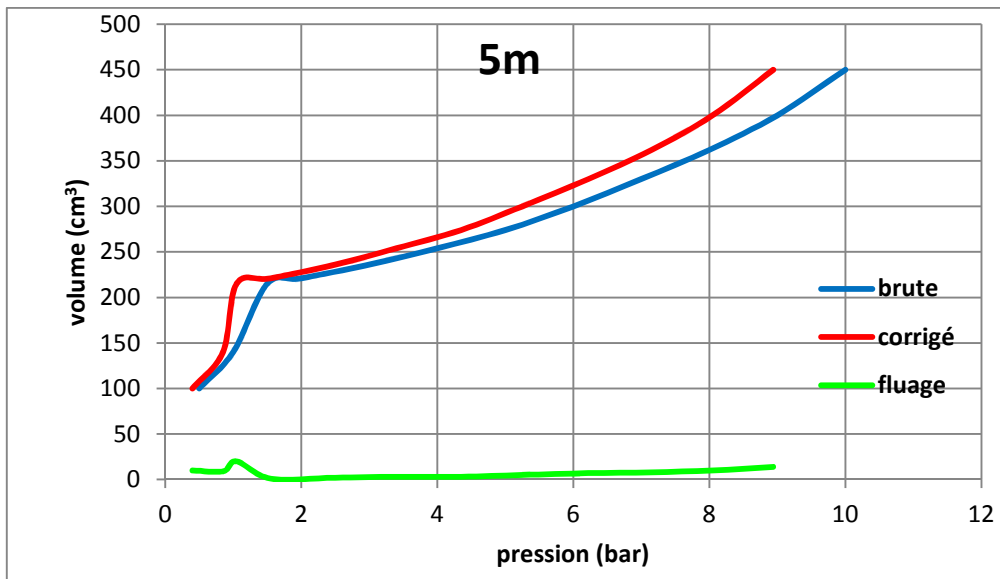


Figure V.8 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.9 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 6 m

pression	Volume de fluage	pression corrigée	volume
0,5	5	0,5	130
1	4	0,89	155
1,5	1	1,38	160
2	1	1,87	164
3	1	2,86	168
4	1	3,84	170
5	1	4,83	176
7	1	6,8	186
9	1	8,82	196
13	3	12,65	220
17	6	16,55	250
21	10	19,45	292

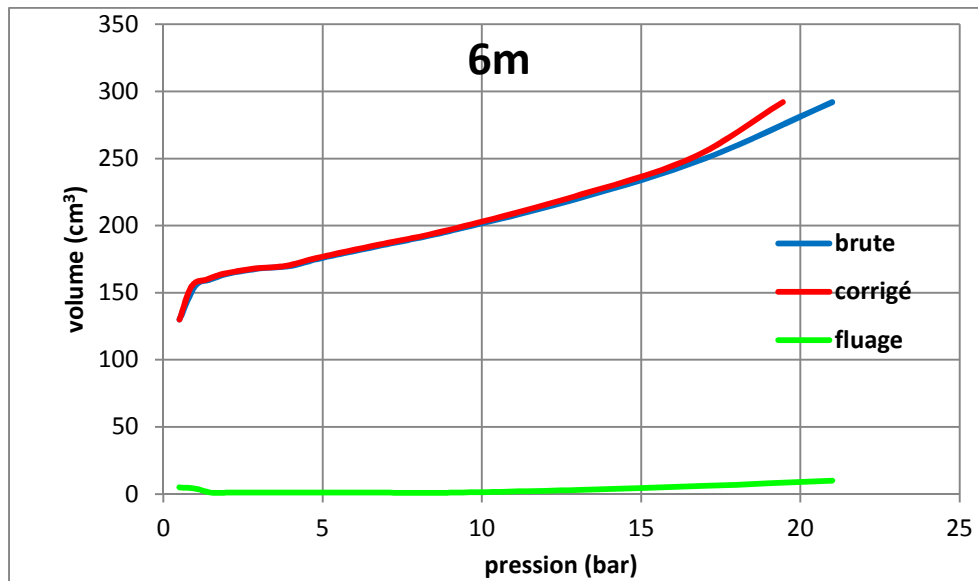


Figure V.9 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 6 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.10 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 7 m

pression corrigée	Volume de fluage	pression	volume
1	1	1	197
2	1	2	204
3	1	3	208
5	1	5	212
7	1	7	224
9	1	9	230
13	1	13	238
17	1	17	246
20	1	20	256
25	1	25	266

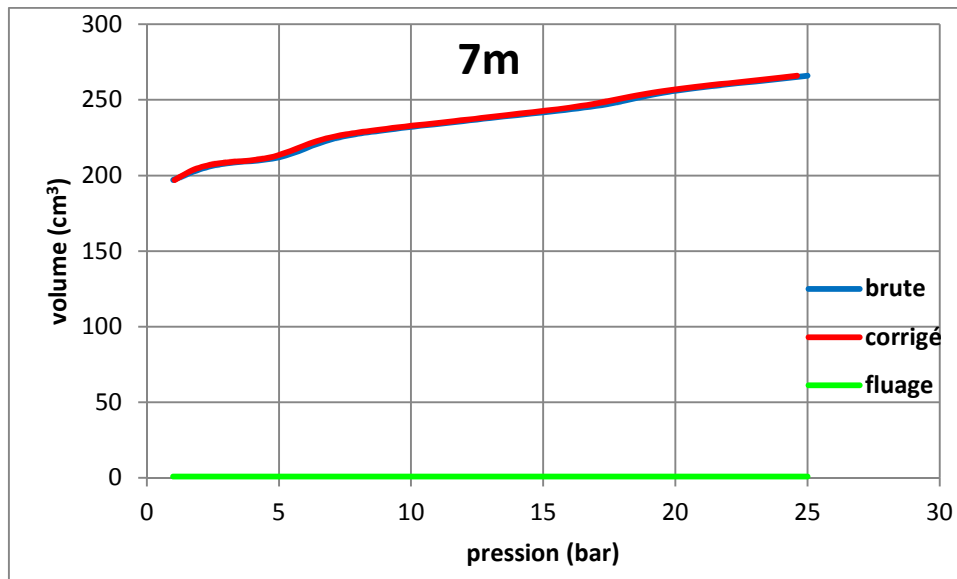


Figure V.10 : courbe expérimentale, brute et corrigée à 7 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.11 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8 m

pression	pression corrigée	volume	fluage
1	1,25	121	1
2	2,24	130	1
3	3,2	136	1
5	5,15	143	1
7	6,18	160	2
9	9,05	166	1
13	13	174	1
17	16,97	182	1
21	20,94	193	1
25	24,87	205	1

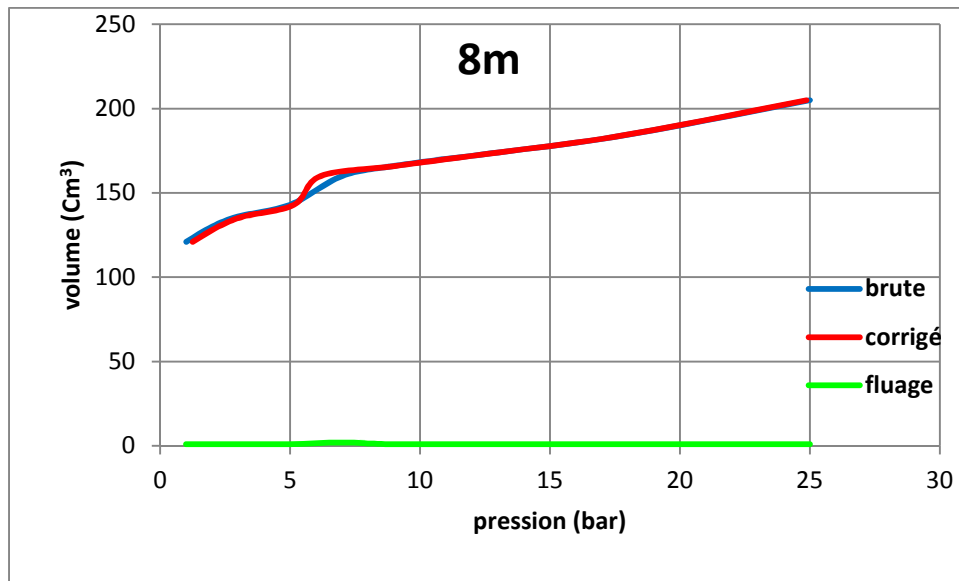


Figure V.11 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.12 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

pression	fluage	pression corrigée	volume
1	1	1,31	131
2	1	2,3	136
3	1	3,25	140
5	1	5,24	146
7	1	6,22	152
9	1	9,2	156
13	1	13,15	164
17	2	17,11	178
21	2	21,05	192
25	2	24,98	208

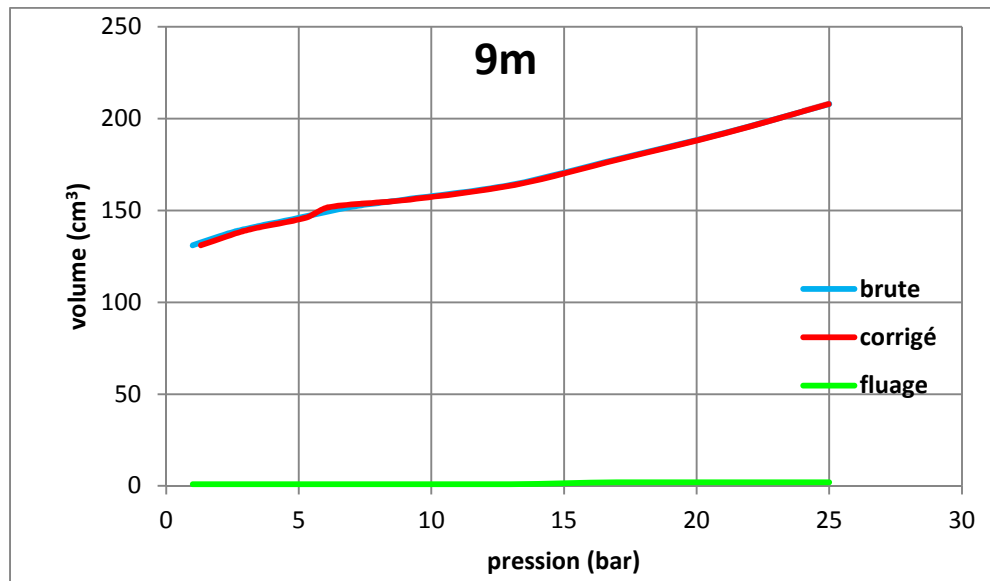


Figure V.12 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

➤ **Site de Bejaia**

On suit le même cheminement de calcul pour corriger les courbes brutes, pour le site de Bejaia,

Point 1

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.13 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 1 m

pression	volume	pression corrigé	pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	170	0	0,2	50
1	196	0,45	0,4	100
1,5	220	0,9	0,6	150
2	230	1,35	0,8	220
3	234	2,35	1	320
4	240	3,3	1,2	435
5	245	4,3	1,4	600
7	261	6,25		
9	300	8,2		
11	372	10,1		
13	510	11,9		

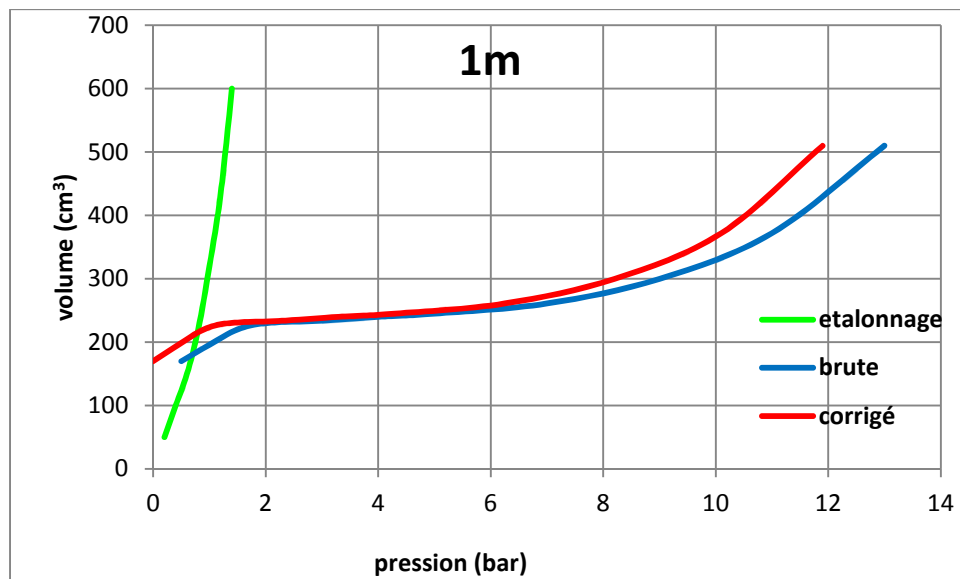


Figure V.13 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 1 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.14 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 2 m

pression	volume	pression corrigée	pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	164	0,17	0,2	50
1	191	0,6	0,4	100
1,5	213	1,04	0,6	150
2	235	1,47	0,8	225
2,5	258	1,94	1	320
3	286	2,37	1,2	410
3,5	318	2,83	1,4	600
4	360	3,23		
5	438	4,11		
6	580	4,92		

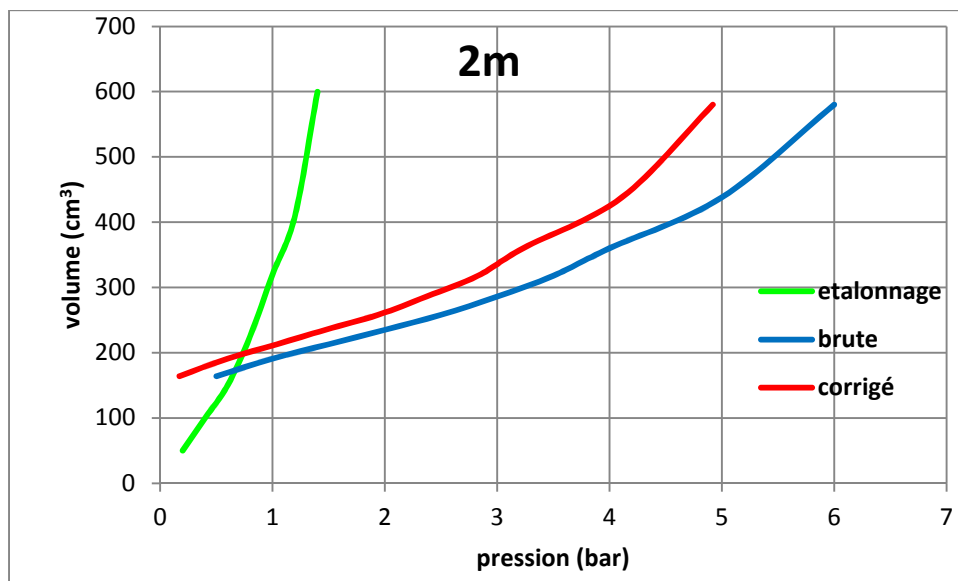


Figure V.14 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 2 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.15 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 3 m

pression	volume	pression corrigé	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	132	0,38	0,2	50
1	235	0,55	0,4	100
1,5	324	0,9	0,6	150
2	434	1,2	0,8	220
2,5	538	1,56	1	320
3	700	2	1,2	440
			1,4	600

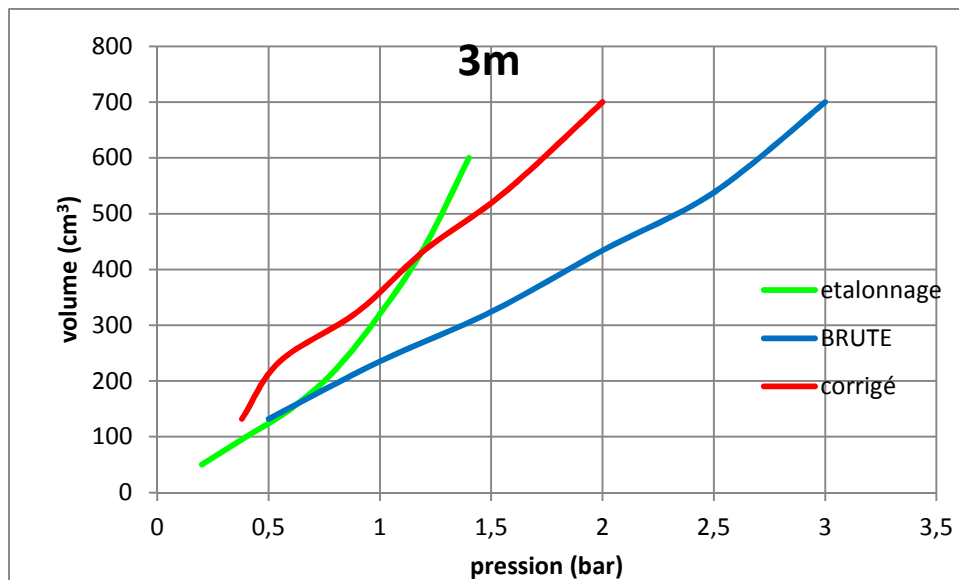


Figure V.15 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 3 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.16 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

Pression	Pression corrigé	volume	Pression étalonnage	Volume étalonnage
0,25	0,25	143	0,2	50
0,5	0,3	231	0,4	100
0,75	0,35	320	0,6	150
1	0,4	428	0,8	220
1,25	0,45	580	1	320
1,5	0,67	690	1,25	440
			1,4	600

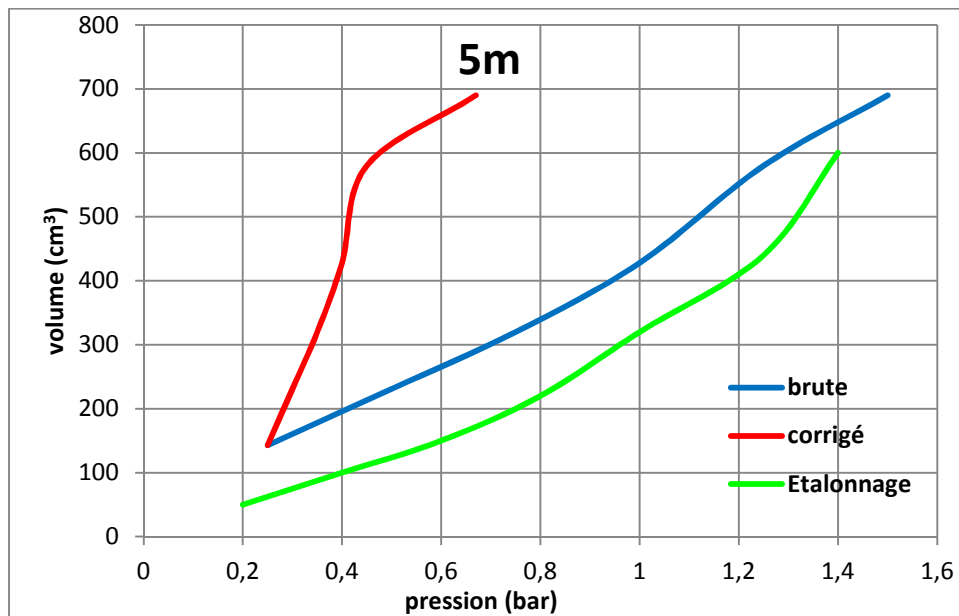


Figure V.16 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.17 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8 m

pression	volume	pression corrigé	pression étalonnage	volume étalonnage
0,25	104	0,75	0,2	50
0,5	142	0,85	0,4	100
0,75	191	0,9	0,6	150
1	236	1,08	0,8	225
1,5	291	1,46	1	320
2	354	1,86	1,2	430
2,5	419	2,24	1,4	600
3	510	2,58		
3,5	636	2,98		

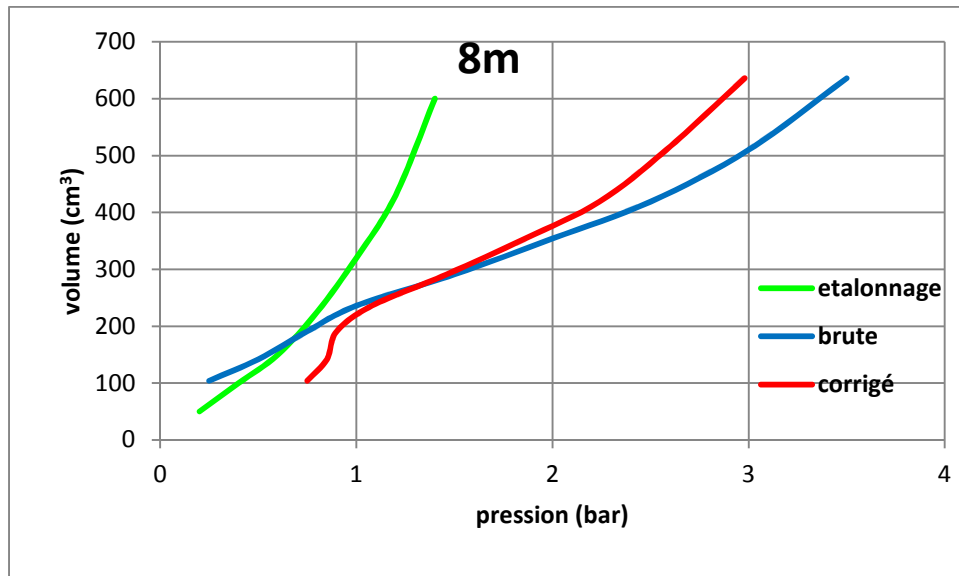


Figure V.17 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.18 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

pression	Pression corrigé	volume	Pression étalonnage	Volume étalonnage
0,5	0,88	160	0,1	50
1	1,2	231	0,45	100
1,5	1,475	342	0,6	150
2	1,775	462	0,8	225
2,5	2,14	574	1	320
3	2,6	620	1,2	435
3,5	3	676	1,4	600
4	3,5	700		

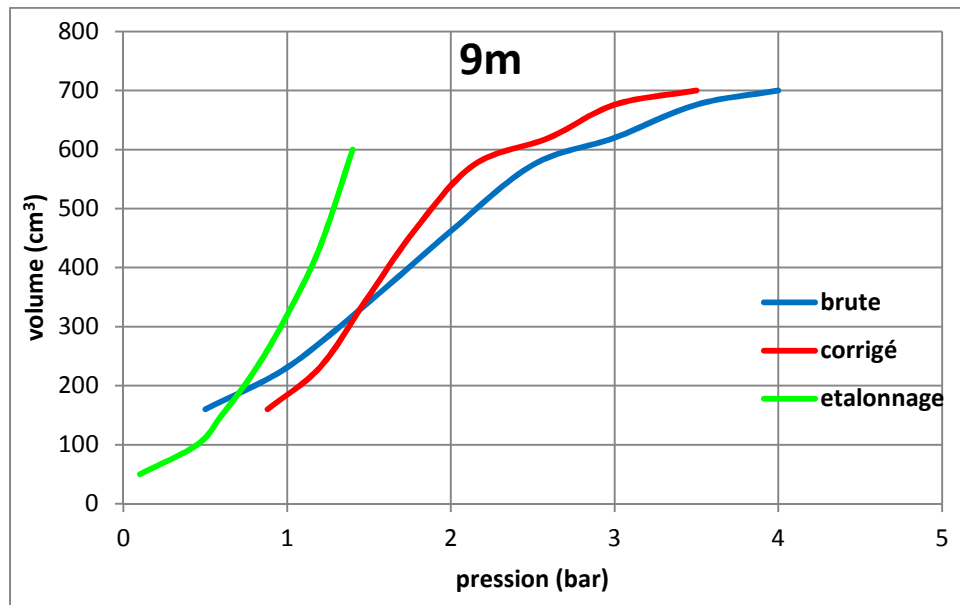


Figure V.18 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.19 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 12 m

pression	volume	pression corrigé	pression étalonnage	volume étalonnage
0,25	130	0,98	0,2	50
0,5	168	1,175	0,4	100
0,75	211	1,25	0,6	150
1	254	1,425	0,8	220
1,5	340	1,775	1	320
2	416	2,125	1,2	435
2,5	472	2,55	1,4	600
3	518	3		
3,5	550	3,475		
4	600	3,9		
5	700	4,8		

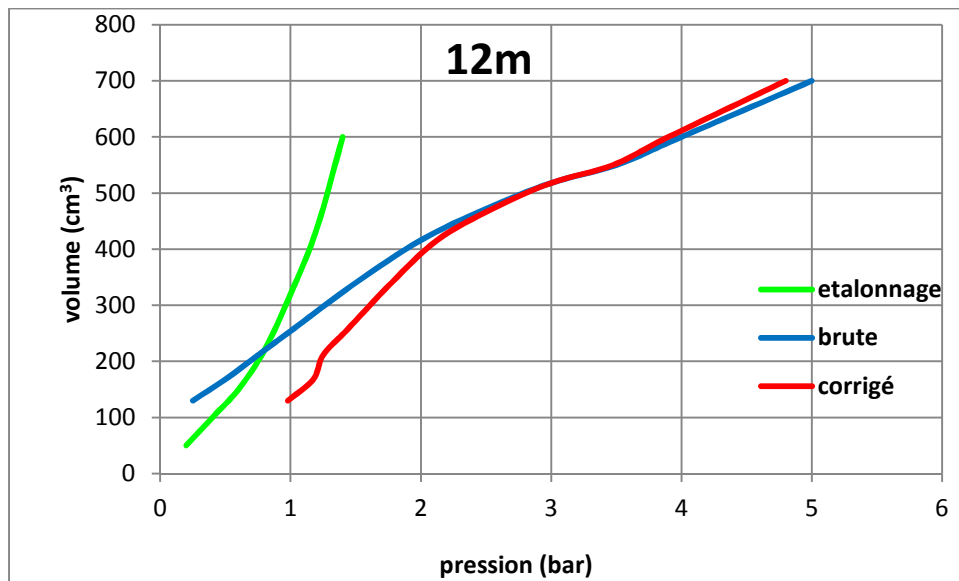


Figure V.19 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 12 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.20 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 13 m

pression	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	150	1,3	0,2	50
1	188	1,65	0,4	100
1,5	211	2,1	0,6	150
2	236	2,5	0,8	220
2,5	260	2,95	1	320
3	298	3,4	1,2	435
4	336	4,3	1,4	600
5	400	5,2		
6	492	6,15		
7	610	7		
8	700	7,8		

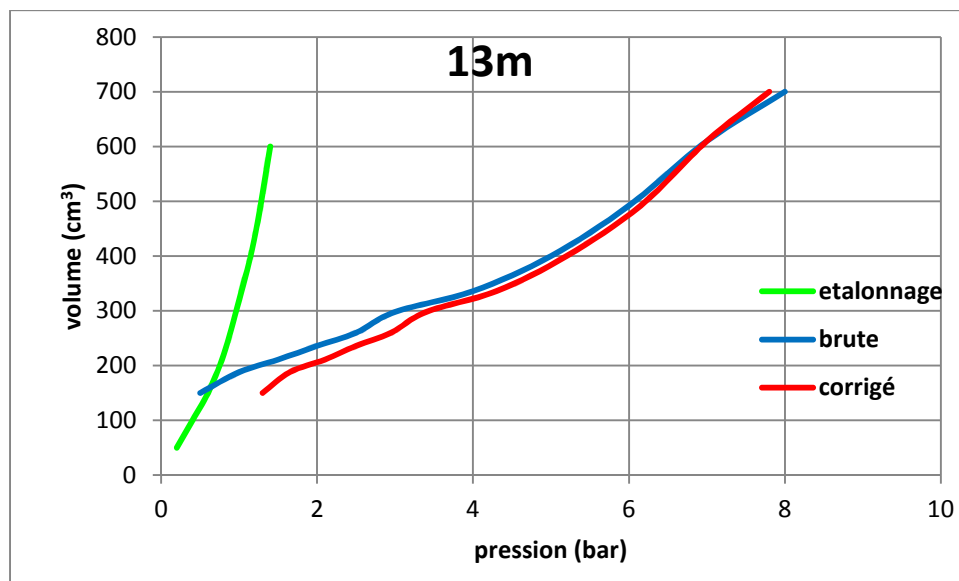


Figure V.20 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 13 m

➤ Point 2

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.21 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 1 m

pression	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	190	0	0,2	50
1	216	0,45	0,45	100
1,5	242	0,9	0,6	150
2	258	1,35	0,8	225
2,5	264	1,8	1	310
3	271	2,25	1,2	435
4	281	3,2	1,4	600
5	309	4,15		
6	360	5,1		
7	440	6		
8	561	6,85		

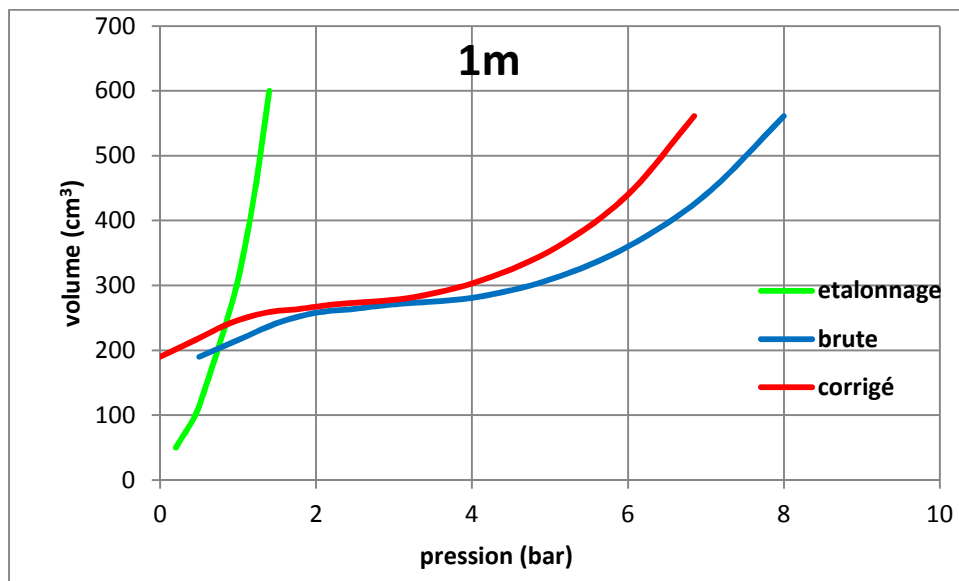


Figure V.21 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 1 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.22 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 3 m

pression brute	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,25	136	0,125	0,2	50
0,5	190	0,175	0,4	100
0,75	215	0,375	0,6	150
1	238	0,55	0,8	225
1,5	270	0,975	1	320
2	310	1,425	1,2	435
2,5	360	1,825	1,4	600
3	408	2,225		
3,5	438	2,675		
4	480	3,1		
5	600	4		

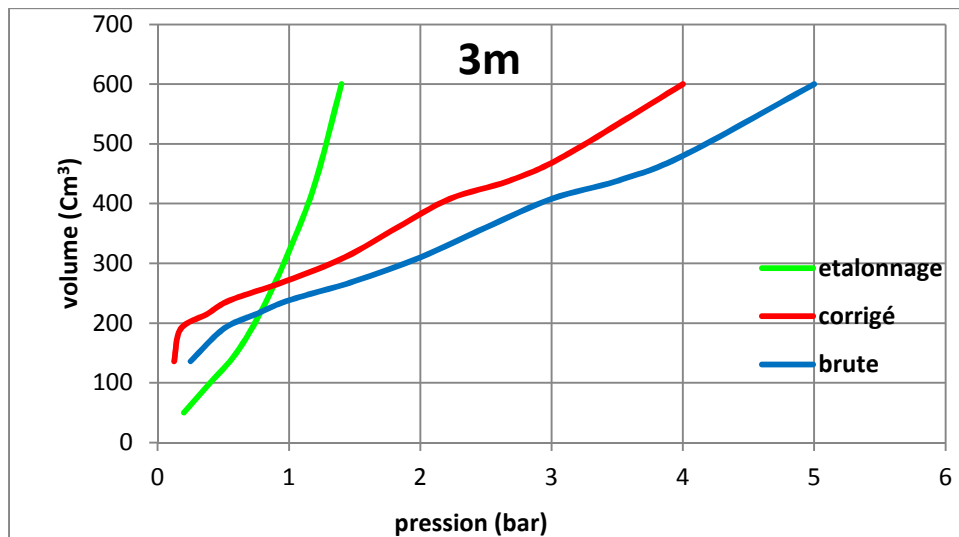


Figure V.22 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 3 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.23 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 4 m

pression	volume	Pression corrigée	pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	120	0,525	0,2	50
1	200	0,75	0,4	100
1,5	287	1,05	0,6	150
2	404	1,35	0,8	225
2,5	630	1,6	1	320
			1,2	435
			1,4	600

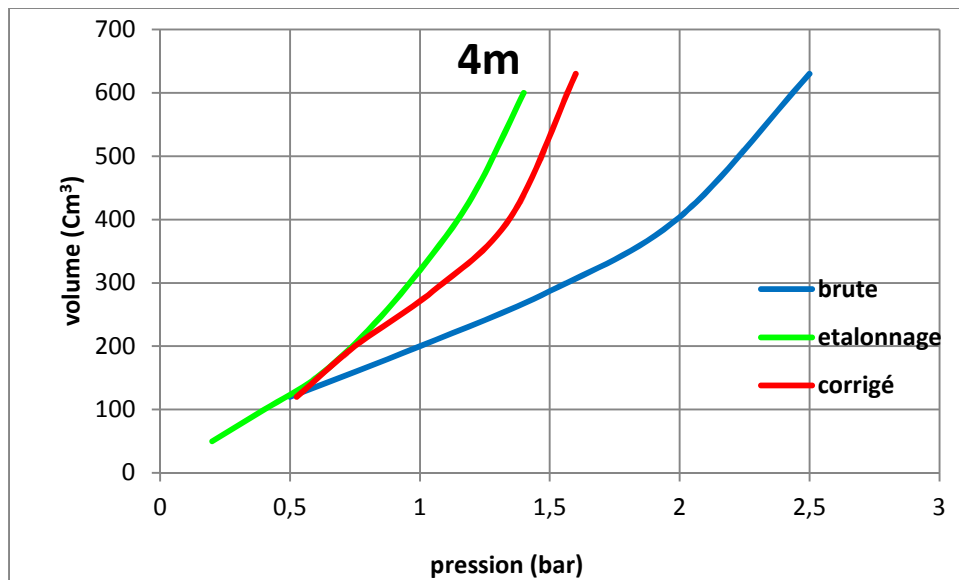


Figure V.23 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 4 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.24 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 5 m

pression	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	100	0,7	0,2	50
1	150	1	0,4	100
1,5	192	1,375	0,6	150
2	260	1,725	0,8	225
2,5	365	2,025	1	320
3	550	2,25	1,2	435
			1,4	600

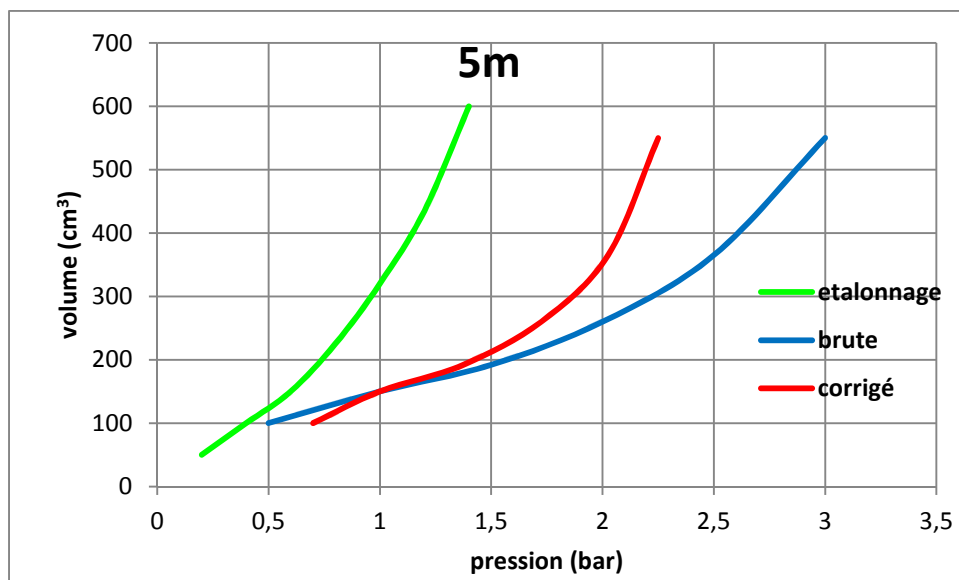


Figure V.24 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 5 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.25 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 6 m

pression	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	78	0,875	0,2	50
1	120	1,2	0,4	100
1,5	190	1,475	0,6	150
2	250	1,825	0,8	225
2,5	400	2,025	1	320
3	640	2,3	1,2	435
			1,4	600

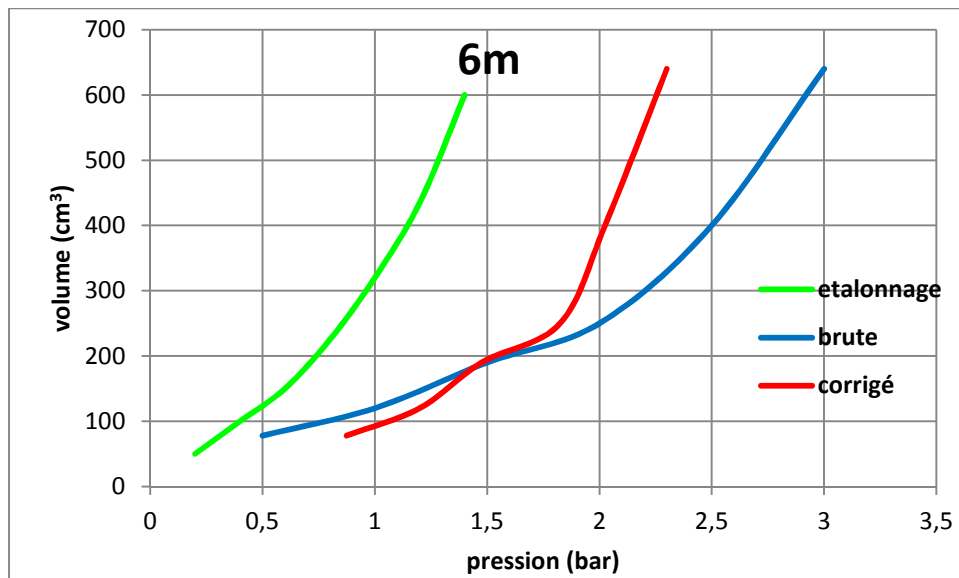


Figure V.25 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 6 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.26 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 7 m

pression	Pression corrigé	volume	Pression étalonnage	Volume étalonnage
0,25	0,6	110	0,2	50
0,5	0,675	154	0,4	100
0,75	0,75	221	0,6	150
1	0,85	296	0,8	220
1,25	1	354	1	320
1,5	1,15	400	1,2	435
2	1,47	520	1,4	600
2,5	1,9	684		

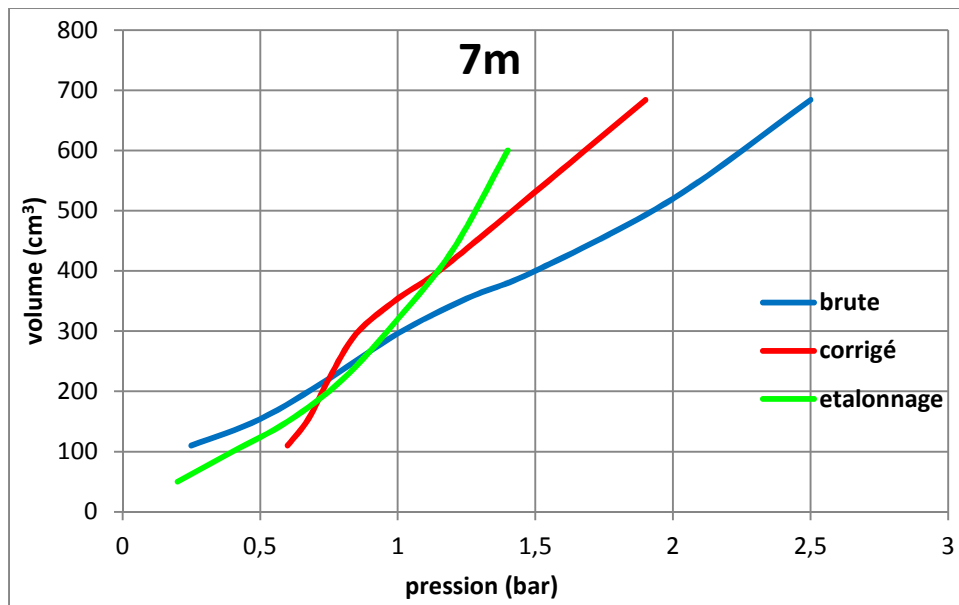


Figure V.26 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 7 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.27 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 8 m

pression	Pression corrigée	volume	Pression étalonnage	Volume étalonnage
0,5	0,9	120	0,2	50
1	1,15	204	0,4	100
1,5	1,47	276	0,6	150
2	1,8	358	0,8	220
2,5	2,2	439	1	320
3	2,55	546	1,2	435
3,5	3	700	1,4	600

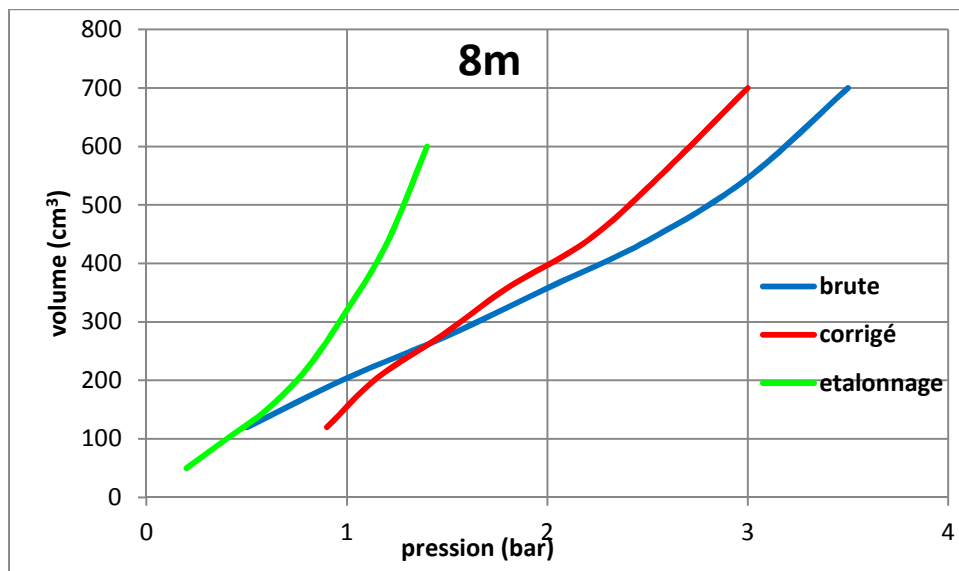


Figure V.27 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 8 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.28 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 9 m

pression	Pression corrigé	volume	Pression étalonnage	Volume étalonnage
0,5	0,92	146	0,2	50
1	1,25	206	0,4	100
1,5	1,57	280	0,6	150
2	1,92	367	0,8	220
2,5	2,3	443	1	320
3	2,72	496	1,2	435
3,5	3,15	564	1,4	600
4	3,6	666		

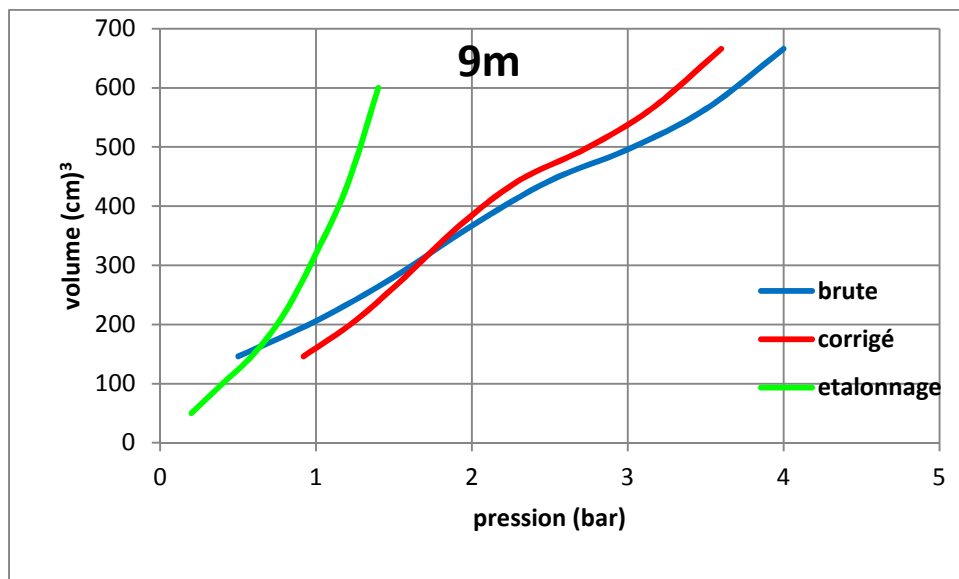


Figure V.28 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 9 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.29 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 10 m

pression	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	150	1	0,2	50
1	196	1,375	0,425	100
1,5	228	1,8	0,6	150
2	270	2,2	0,8	220
2,5	306	2,625	1	315
3	325	3,075	1,2	435
4	373	4	1,4	600
5	487	4,85		
6	662	5,7		

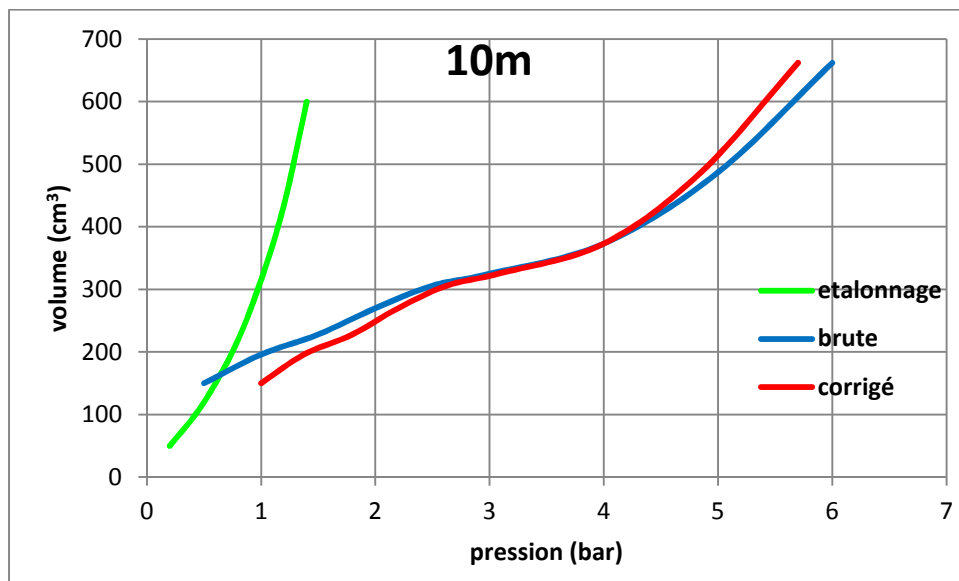


Figure V.29 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 10 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.30 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 11 m

pression	volume	Pression corrigé	Pression étalonnage	Volume étalonnage
0,5	144	1,15	0,2	50
1	194	1,5	0,425	100
1,5	232	1,9	0,6	150
2	269	2,3	0,8	220
2,5	297	2,725	1	315
3	314	2,95	1,2	435
4	368	4,1	1,4	600
5	444	5		
6	591	5,825		

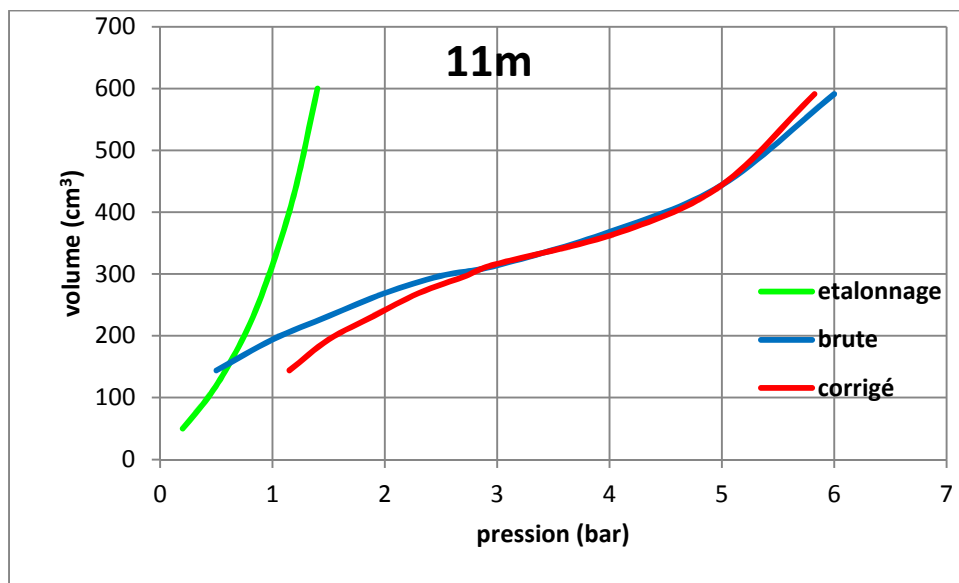


Figure V.30 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 11 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.31 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 12 m

pression	volume	Pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	200	1,15	0,2	50
1	260	1,55	0,425	100
1,5	273	1,9	0,6	150
2	318	2,3	0,8	220
2,5	364	2,725	1	315
3	395	3,175	1,2	435
4	433	4,1	1,4	600
5	520	4,975		
6	653	5,9		

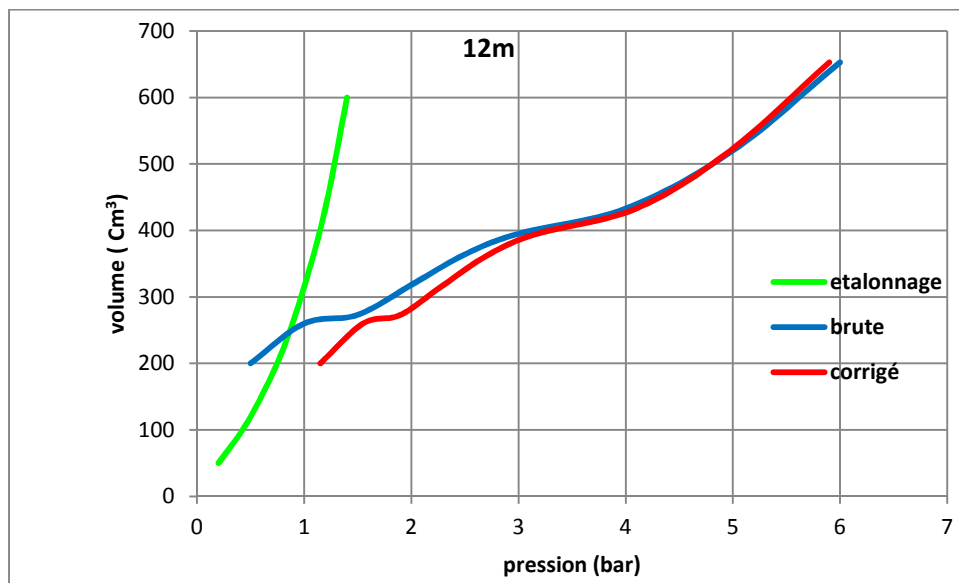


Figure V.31 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 12 m

Le tableau suivant ainsi que la figure, illustrent les résultats de l'essai à 4 m de profondeur, avec les différentes corrections faites

Tableau V.32 : résultats de l'essai pressiométrique et correction à 13 m

pression	volume	pression corrigée	Pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	143	1,35	0,2	50
1	179	1,7	0,4	100
1,5	204	2,15	0,6	150
2	223	2,6	0,8	225
3	246	3,5	1	320
4	266	4,45	1,2	430
5	297	5,4	1,4	600
6	335	6,35		
7	403	7,25		
8	492	8,15		
9	640	9		

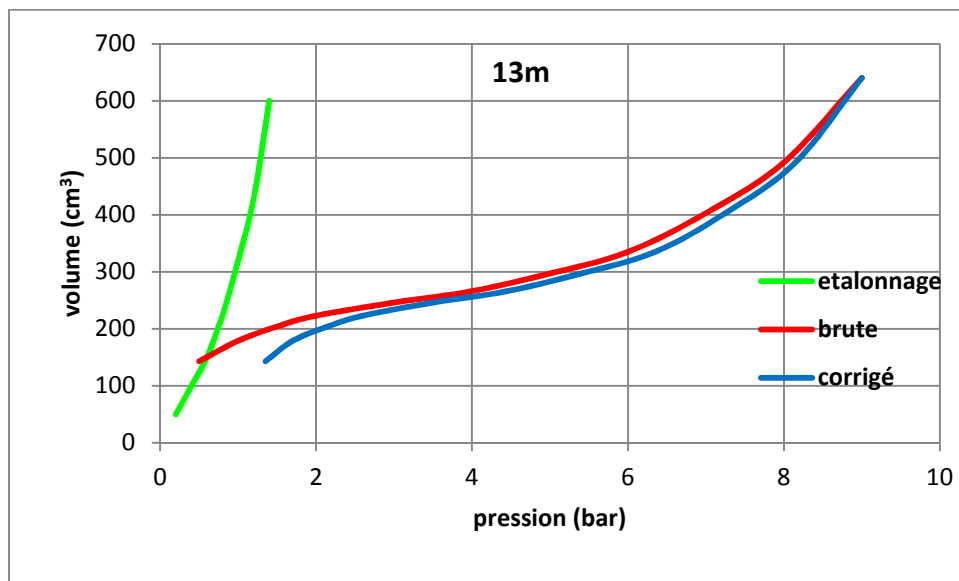


Figure V.32 : courbe expérimentale, brute et corrigé à 13 m

Après correction des courbes brutes, la pression limite et le module pressiométrique seront directement calculés à partir de la courbe corrigée.

Avec :

$$E_M = 2 \frac{1 + \nu}{V_0 + V_m} \frac{dP}{dV}$$

ν : Coefficient de poisson

V_0 : Volume initiale de la sonde au repos ;

V_m : variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique ;

$\frac{dP}{dV}$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

V.3 Interprétation :

Après correction des courbes, la détermination de pression limite PI et module pressiométrique Ep, a été réalisé selon les différentes profondeurs, et représentés par les profils pressiométrique ci-dessous

➤ Site Tlzi Ouzou

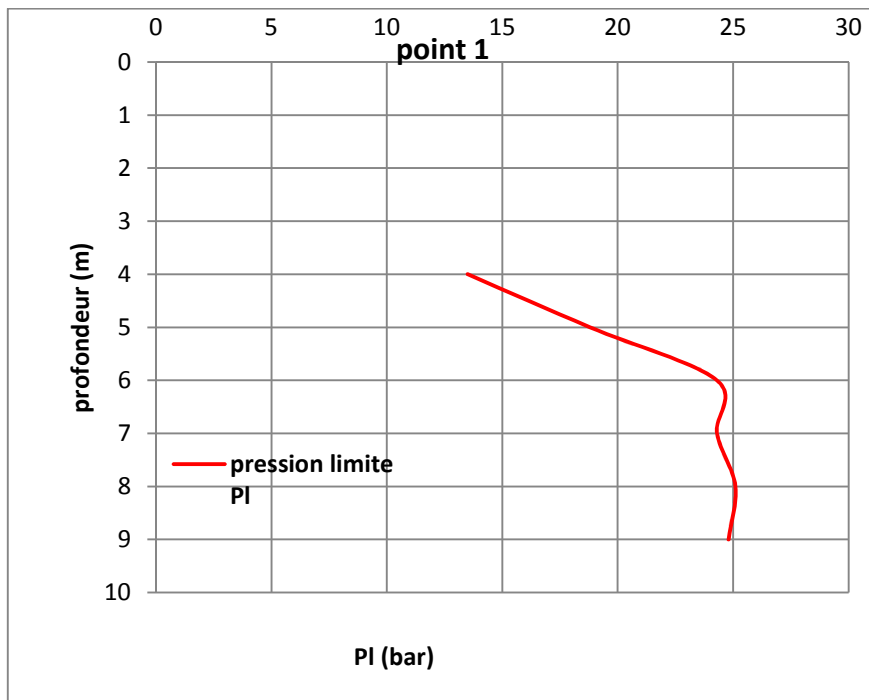


Figure 33 : Pression limite PI, point1

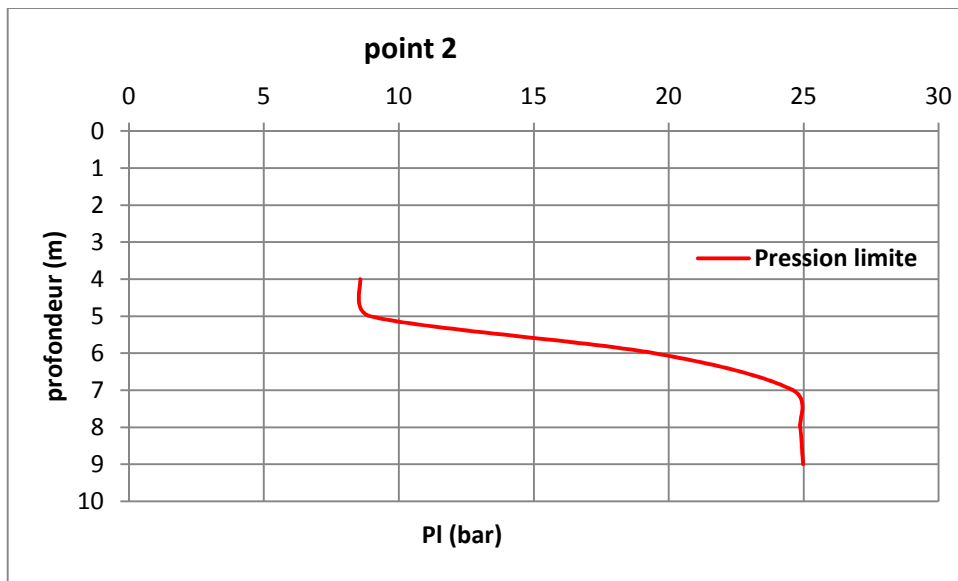


Figure 34: Pression limite Pl, point 2

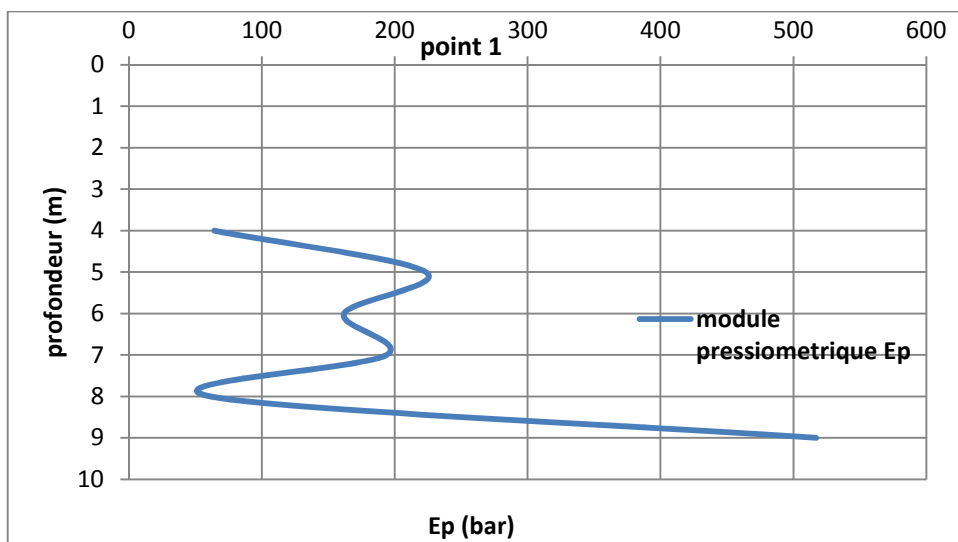


Figure 35: Module pressiometrique Ep, point 1

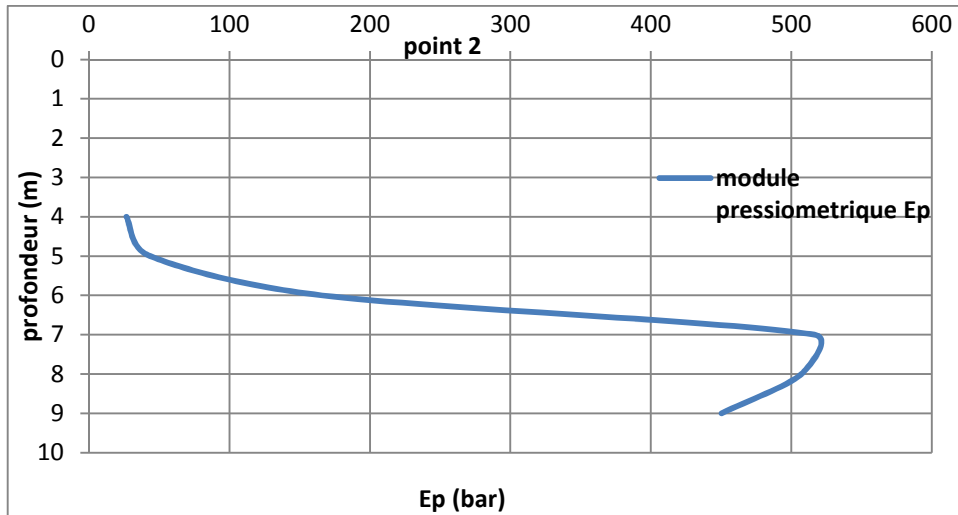


Figure 36: Module pressiometrique E_p , point 2

➤ Site Bejaia

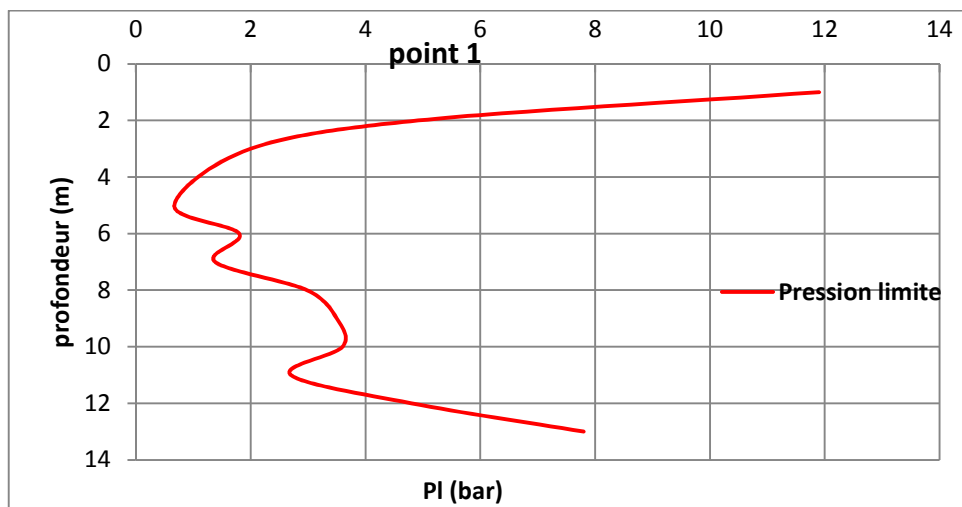


Figure 37: Pression limite P_l , point 1

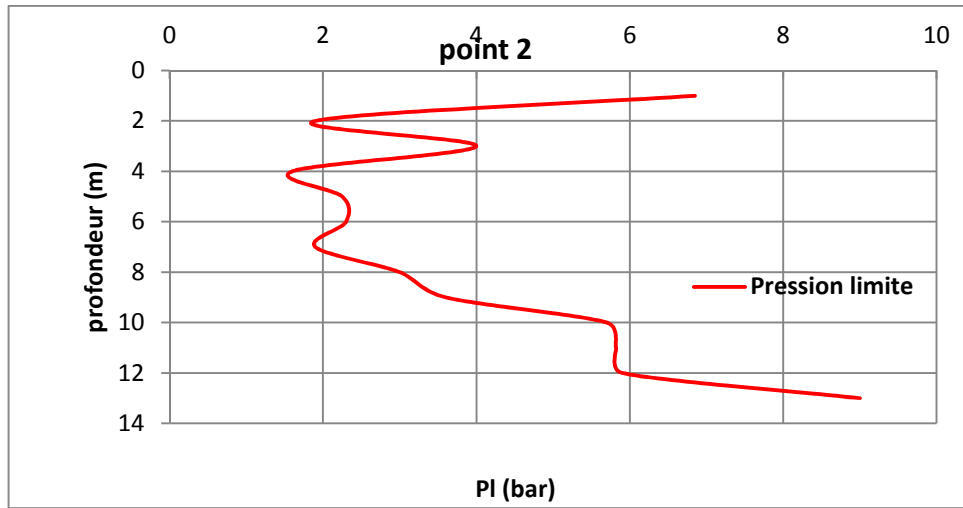


Figure 38: Pression limite P_l , point 2

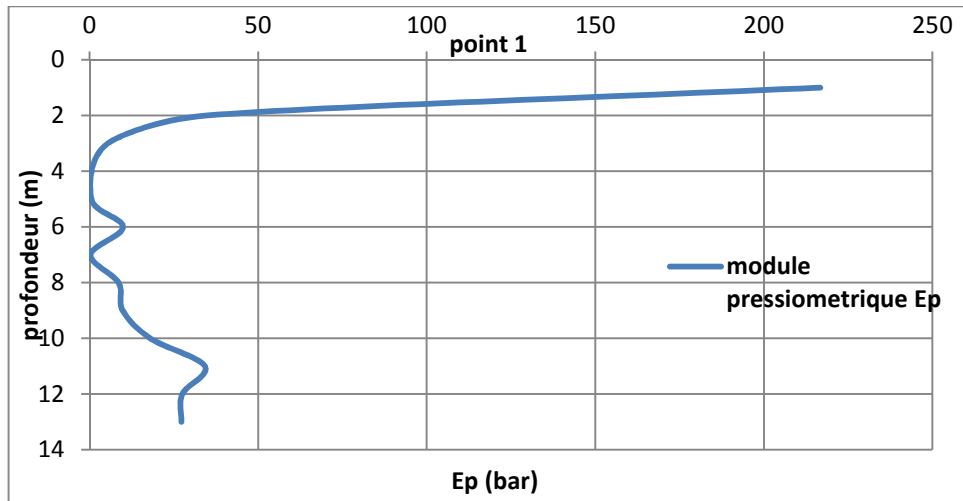


Figure 39: Module pressiométrique E_p , point 2

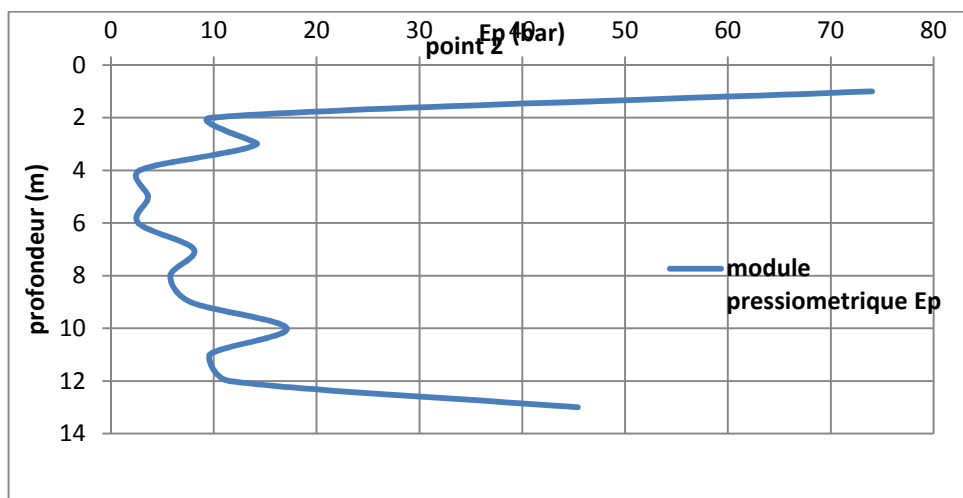


Figure 40: Module pressiométrique E_p , point 2.

V.4 Exploitation de l'essai

Toutes études de sol consistent à définir sa nature à partir de ses paramètres identifiés suivant différents essais. Pour l'essai pressiométrique, la détermination de la pression limite PI et le module pressiométrique Ep , nous permettent de faire classer le sol étudié.

On étudie dans ce cadre, deux rapports de sol, où figuraient uniquement des résultats pressiométriques, le premier rapport concernait un site destiné à recevoir un système de transport par câble à Tizi Ouzou, le deuxième rapport concernait un site destiné à recevoir des bacs de stockage à Bejaia.

Ces deux paramètres, qui sont très importants, ont permis de faire une première classification selon les règles LCPC, d'où une première reconnaissance.

V.4.1 Site de Bejaia

Tableau IV.33 : Classification de sol, point1, (Norme Ménard)

PROFONDEUR	PI	Ep	EP/pl	Classification
1	11,9	216,7	18,21	Argiles fortement surconsolidées
2	4,92	34,75	7,06	Argiles sous-consolidées
3	2	5,42	2,7	Argiles remaniées ou triturées
5	0,67	0,55	0,82	Argiles remaniées ou triturées
6	1,8	9,9	5,5	Argiles sous-consolidées
7	1,38	0,29	0,21	Argiles remaniées ou triturées
8	2,98	8,6	2,88	Argiles remaniées ou triturées
9	3,5	9,82	2,8	Argiles remaniées ou triturées
10	3,6	18	5	Argiles remaniées ou triturées
11	2,7	34,2	12,66	Argiles légèrement consolidées
12	4,8	27,5	5,72	Argiles sous-consolidées
13	7,8	27,21	3,48	Argiles remaniées ou triturées

➤ Point 2

Tableau IV.34 : classification de sol, point2, (Norme Ménard)

PROFONDEUR	PI	Ep	EP/pl	Classification
1	6,85	74,01	10,8	Argiles normalement consolidées
2	1,9	9,82	5,16	Argiles sous-consolidées
3	4	14,21	3,55	Argiles remaniées ou triturées
4	1,6	2,8	1,75	Argiles remaniées ou triturées
5	2,25	3,62	1,6	Argiles remaniées ou triturées
6	2,3	2,66	1,15	Argiles remaniées ou triturées
7	1,9	8,06	4,24	Argiles remaniées ou triturées
8	3	5,78	1,92	Argiles remaniées ou triturées
9	3,6	7,72	2,14	Argiles remaniées ou triturées
10	5,7	17,1	3	Argiles remaniées ou triturées
11	5,82	9,6	1,64	Argiles remaniées ou triturées
12	5,9	11,52	1,95	Argiles remaniées ou triturées

V.4.2 Site de Tizi ouzou

• Point1

Tableau IV.35: Classification de sol, point1, (Norme Ménard)

PROFONDEUR	PI	Ep	EP/pl	Classification
1	6,85	74,01	10,8	Argiles normalement consolidées
2	1,9	9,82	5,16	Argiles sous-consolidées
3	4	14,21	3,55	Argiles remaniées ou triturées
4	1,6	2,8	1,75	Argiles remaniées ou triturées
5	2,25	3,62	1,6	Argiles remaniées ou triturées
6	2,3	2,66	1,15	Argiles remaniées ou triturées

- **Point 2**

Tableau IV.36 : Classification de sol, point2, (Norme Ménard)

PROFONDEUR	PI	Ep	EP/pl	Classification
4	8,57	26,65	3,1	Argiles remaniées ou triturées
5	9,94	43,56	4,38	Argiles remaniées ou triturées
6	19,45	165,98	8,53	Argiles normalement consolidées
7	24,6	516,4	21	Argiles fortement surconsolidées
8	24,87	507,22	20,4	Argiles fortement surconsolidées
9	24,98	450,3	18,02	Argiles fortement surconsolidées

V.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a tracé les courbes expérimentales de l'essai pressiométrique, ensuite on a corrigé les courbes brutes qui ne peuvent pas être interprétées sans diverses corrections.

Ensuite on a calculé le module pressiométrique E_p , et la pression limite PI , à partir des courbes corrigées, et on les a représenté sous forme des profils pressiométrique, en fonction de la profondeur pour chaque site étudié, ce qui nous a permis de faire une première classification de nos sols.

On a pu classer le sol étudié à partir des paramètres E_p et PI de l'essai pressiométrique, selon la norme de Ménard, cette classification a mis en évidence un sol très remanié, ou très consolidé.

Ce que nous a conduit au chapitre suivant de faire une étude comparative et d'interpréter les résultats de l'essai pressiométrique à partir de la méthode numérique $FLAC^{2D}$ et la méthode empirique.

CHAPITRE VI

IDENTIFICATION DES PARAMETRES DE COMPORTEMENT DE SOL

Chapitre VI

Identification des paramètres de comportement de sol

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, qui constitue l'objet principal de notre travail on a réalisé plusieurs modélisations de l'essai pressiométrique, dans le but d'identifier les paramètres de comportement de sol.

Pour faire cette identification, on procédera par calage de la courbe pressiométrique simulée sur la courbe expérimentale corrigée. Les paramètres à identifier sont la cohésion non drainée C_u , et le module de cisaillement G .

Afin d'analyser la validation des paramètres obtenus, en particulier la cohésion non drainée C_u , nous allons comparer les valeurs de cohésion identifiées à partir de la méthode numérique et celles obtenues à partir des méthodes empiriques de Louis Ménard, Amar et Jezequel (citées dans le chapitre II).

VI.2 Identifications des paramètres :

Pour cette étape, on a considéré la simulation de l'essai pressiométrique avec les conditions aux limites et initiales déjà citées aux chapitre IV, en prenant comme modèle de comportement le modèle de Mohr-Coulomb.

Après correction des courbes brutes (cité en chapitre V), des simulations de chaque essai a été effectué avec FLAC^{2D}, pour cela on fait introduire un premier jeu de paramètres qu'on fait varier jusqu'à atteindre le calage entre l'expérimentale et le numérique. Pour le premier jeu de paramètres, on l'a déterminé à partir des formules empiriques.

On fait les mêmes étapes pour chaque site :

- Site de Tizi Ouzou, pour le projet de réalisation du système de transport par câble.
- Site de Bejaia, pour le projet des bacs de stockage.

Les résultats des simulations des essais pressiométriques sont illustrés par les tableaux (VI.1, VI.2,VI.31), ainsi que par les figures (VI.1, VI.2,VI.31).

VI.2.1 Site de Tizi Ouzou

➤ Point 1

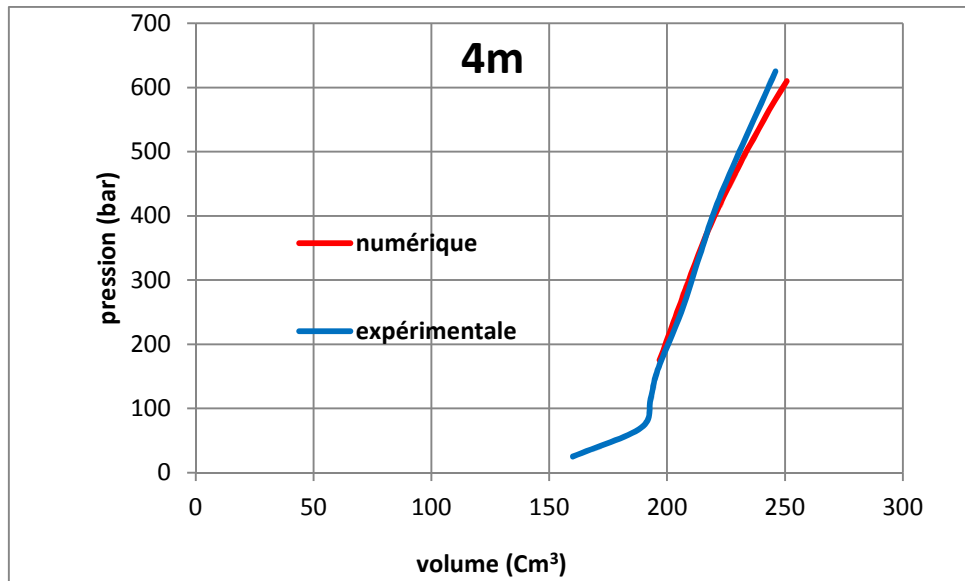


Figure VI.1 : Courbe simulée à 4m point1.

Tableau VI.1 : Paramètres de courbes simulées à 4m, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	2.16	24.16
Paramètres de sortie	3.9	210

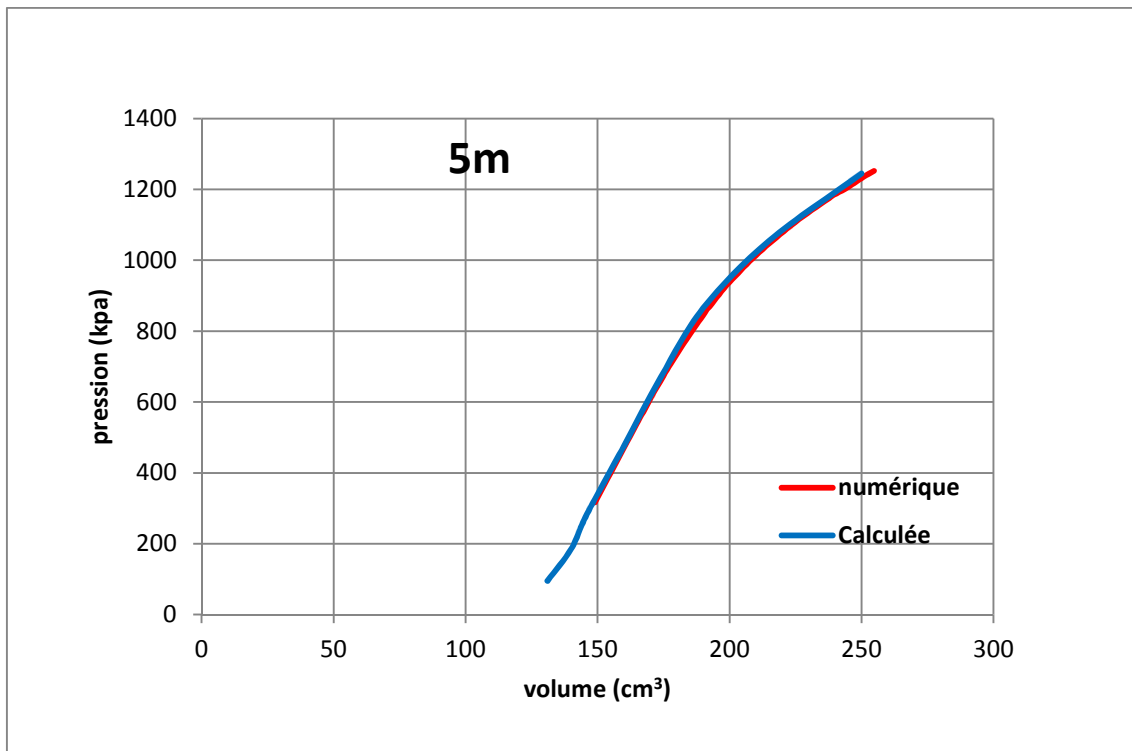


Figure VI.2 : Courbe simulée à 5m point1.

Tableau VI.2 : Paramètres de courbes simulées à 5m, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	2.88	84
Paramètres de sortie	3.5	290

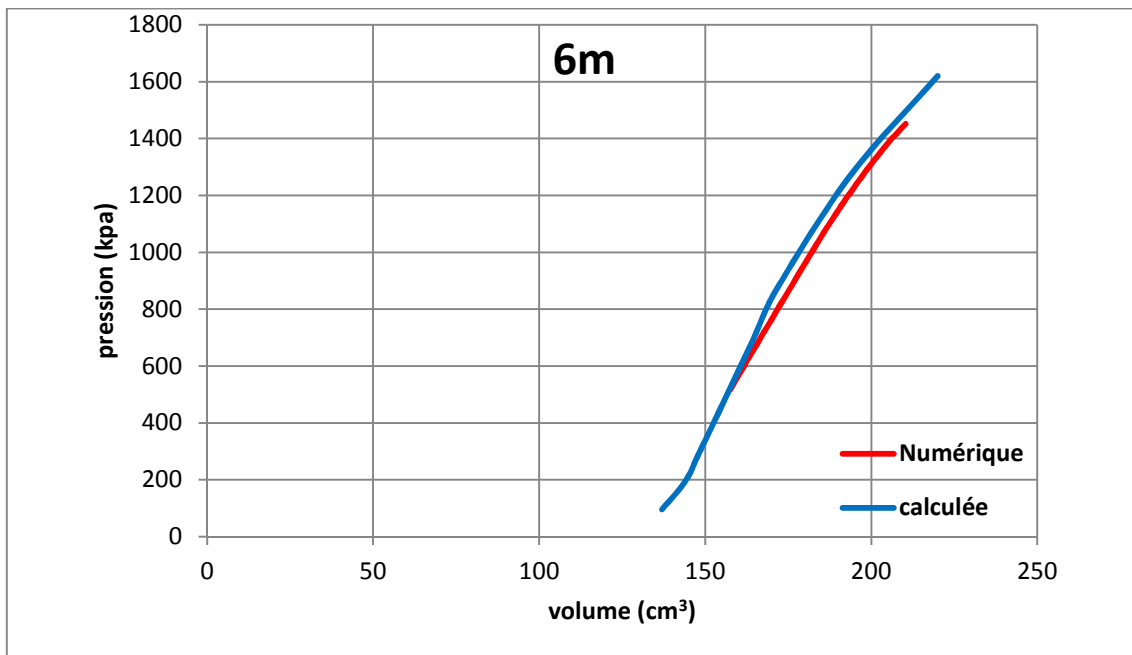


Figure VI.3 : Courbe simulée à 6m point1.

Tableau VI.3 : Paramètres de courbes simulées à 6m, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.51	60.88
Paramètres de sortie	5.5	410

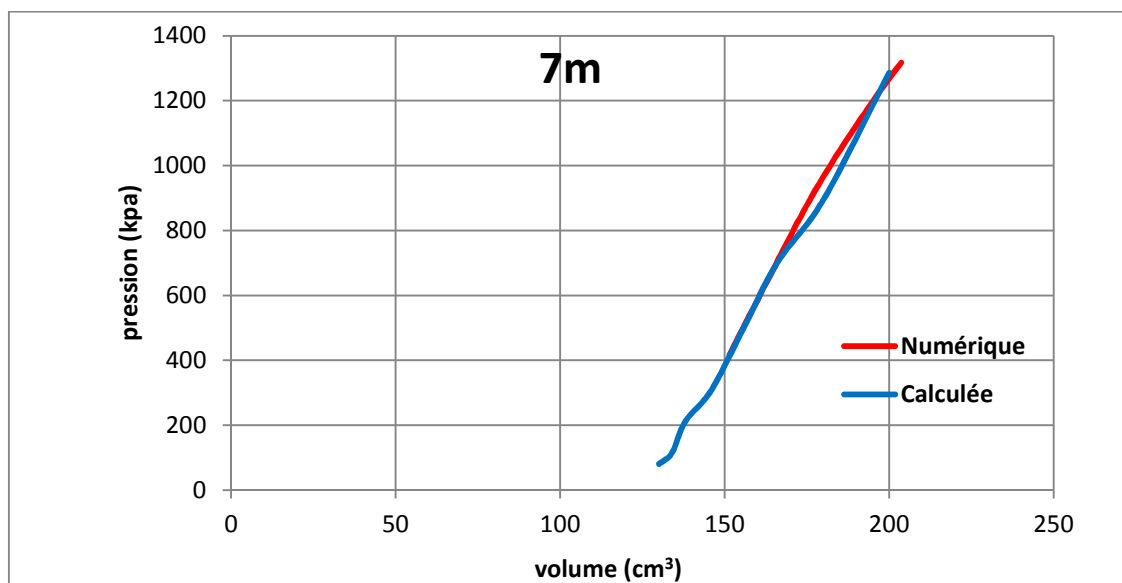


Figure VI.4 : Courbe simulée à 7m point1

Tableau VI.4 : Paramètres de courbes simulées à 7m, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.7	72.85
Paramètres de sortie	5.5	410

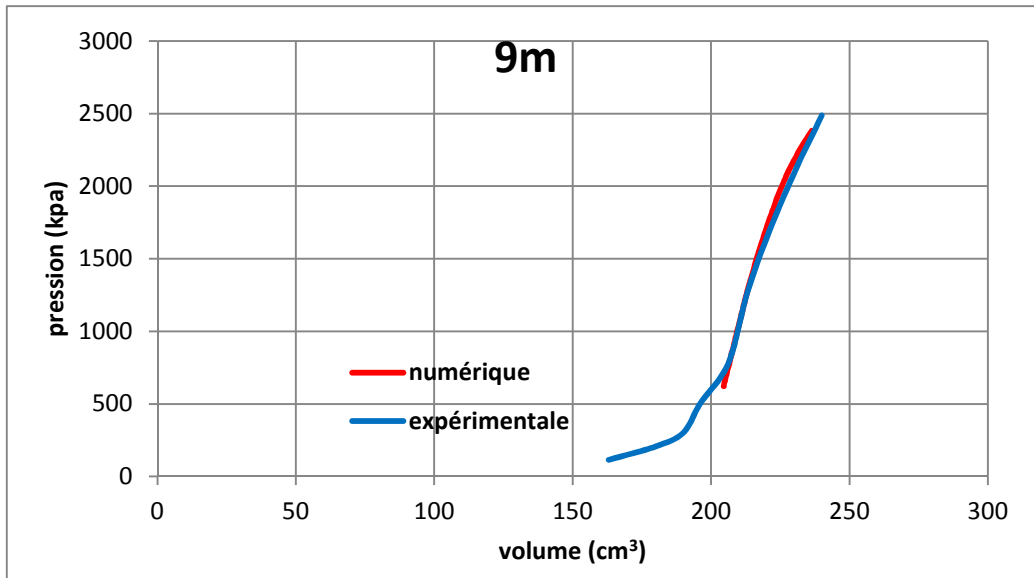


Figure VI.5: Courbe simulée à 9m point1.

Tableau VI.5 : Paramètres de courbes simulées à 9m, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.43	194.4
Paramètres de sortie	8	1600

➤ Point 2

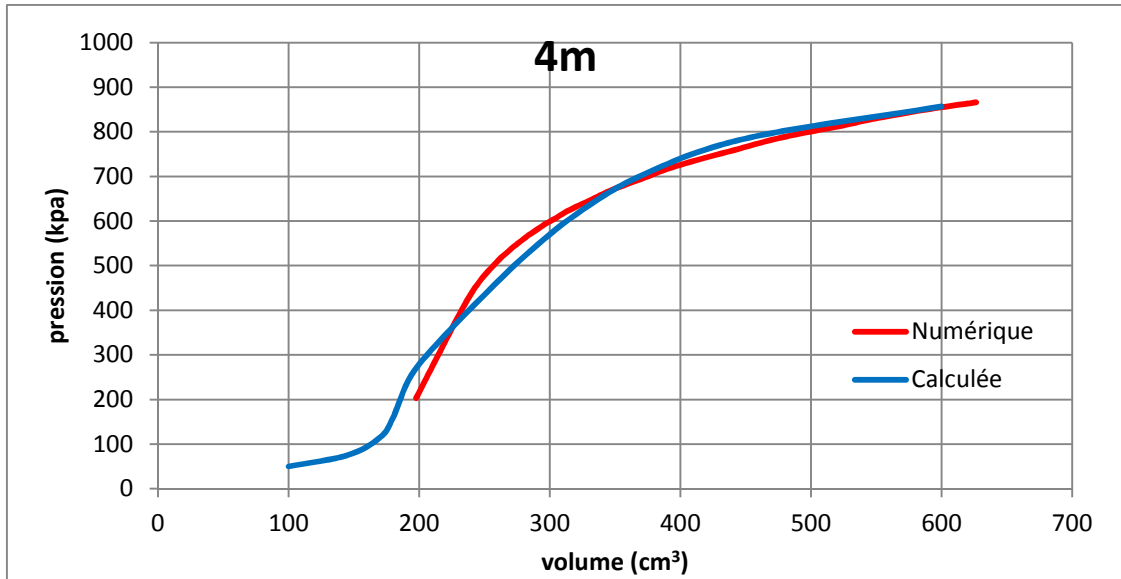


Figure VI.6 : Courbe simulée à 4m point 2.

Tableau VI.6 : Paramètres de courbes simulées à 4 m, point 2, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	1.21	10.02
Paramètres de sortie	1.8	120

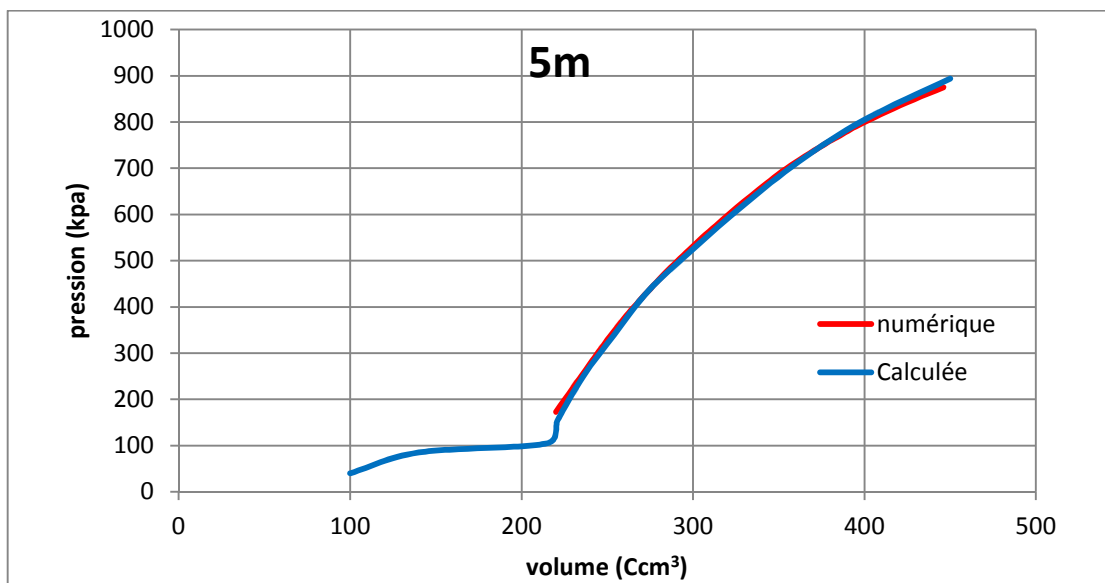


Figure VI.7 : Courbe simulée à 5m point 2.

Tableau VI.7 : Paramètres de courbes simulées à 5m, point 2, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	1.33	16
Paramètres de sortie	2.8	110

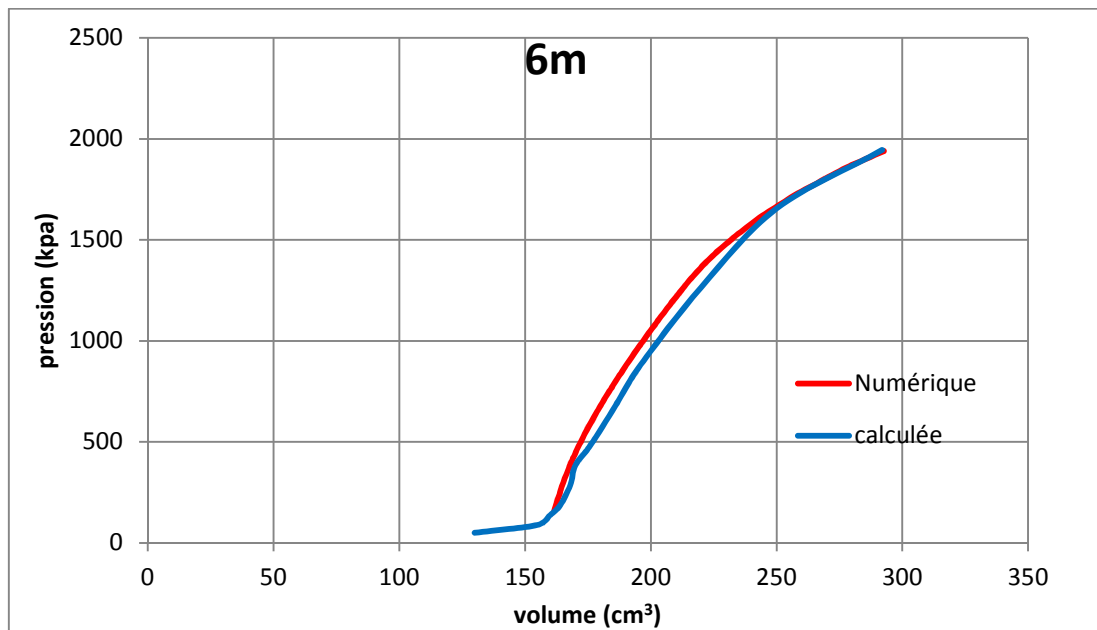


Figure VI.8 : Courbe simulée à 6m point 2.

Tableau VI.8 : Paramètres de courbes simulées à 6m, point 2, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.28	62.4
Paramètres de sortie	5.3	790

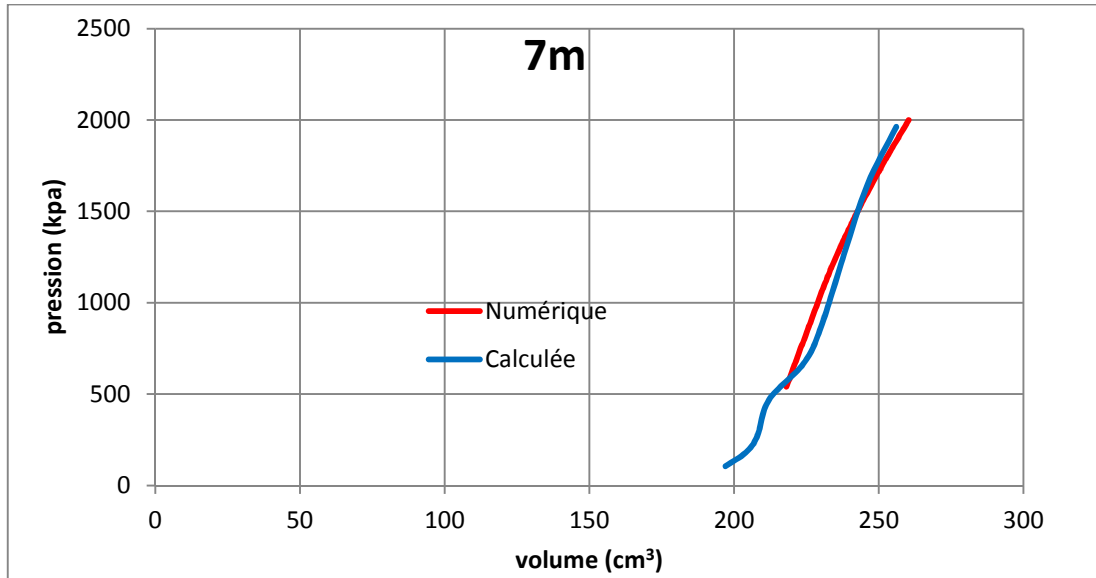


Figure VI.9 : Courbe simulée à 7m point 2.

Tableau VI.9 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point 2, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.52	194.13
Paramètres de sortie	9.5	895

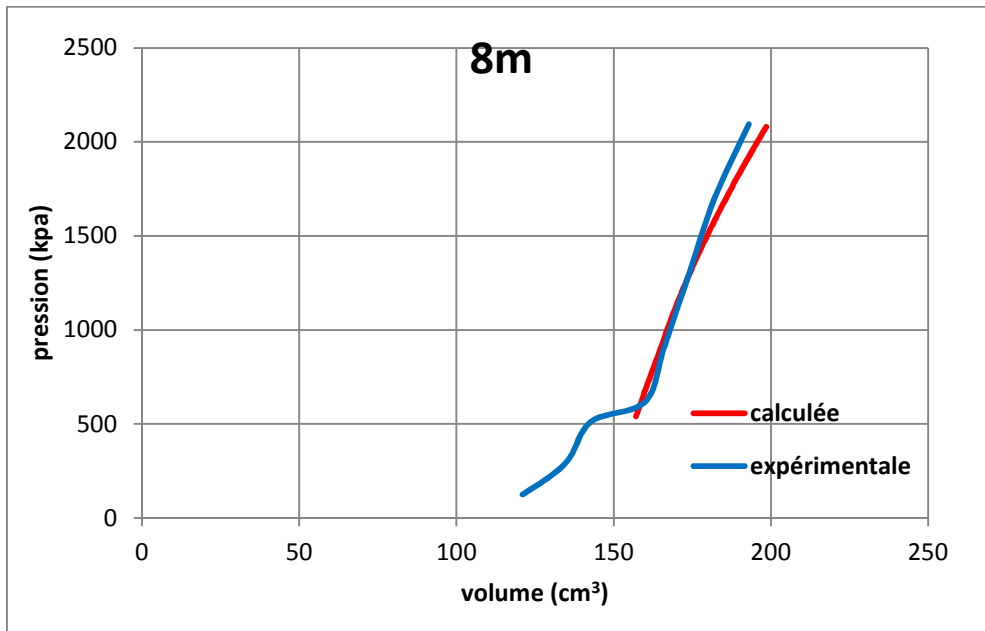


Figure VI.10 : Courbe simulée à 8m point 2.

Tableau VI.10 : Paramètres de courbes simulées à 8m, point 2, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.57	190.68
Paramètres de sortie	11	955

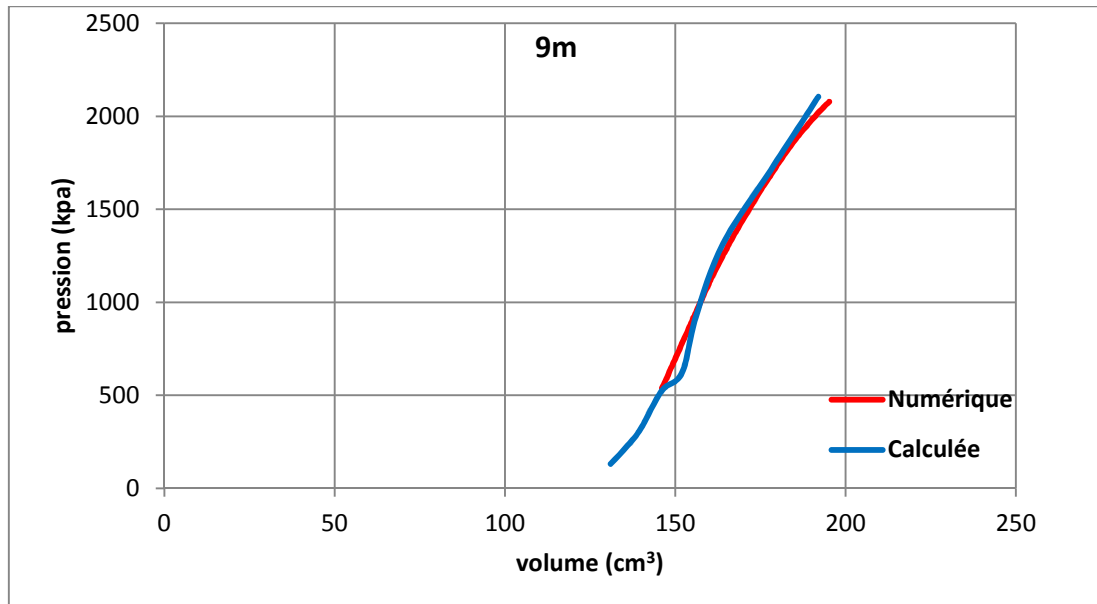


Figure VI.11 : Courbe simulée à 9m point 2.

Tableau VI.11 : Paramètres de courbes simulées à 9m, point 2, Tizi Ouzou

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	3.6	169.28
Paramètres de sortie	7.5	850

VI.2.2 Identification des paramètres de site de Bejaia :

On a considéré les mêmes étapes que précédemment (site de Tizi Ouzou) pour simuler les essais pressiométriques sur le site de Bejaia.

Les résultats de différentes simulations numériques sont représentés ci-dessous.

Les figures montrent les courbes numériques et expérimentales, et les tableaux donnent le premier jeu de paramètre et les paramètres de sortie.

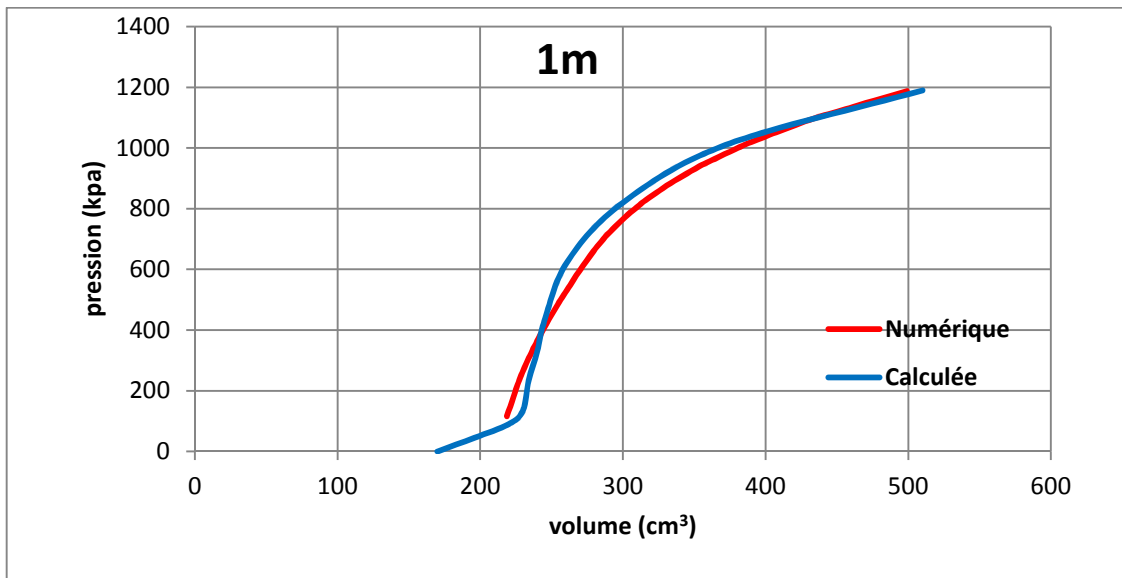


Figure VI.12 : Courbe simulée à 1m point1.

Tableau VI.12 : Paramètres de courbes simulées à 1m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	1.98	81.46
Paramètres de sortie	2.7	295

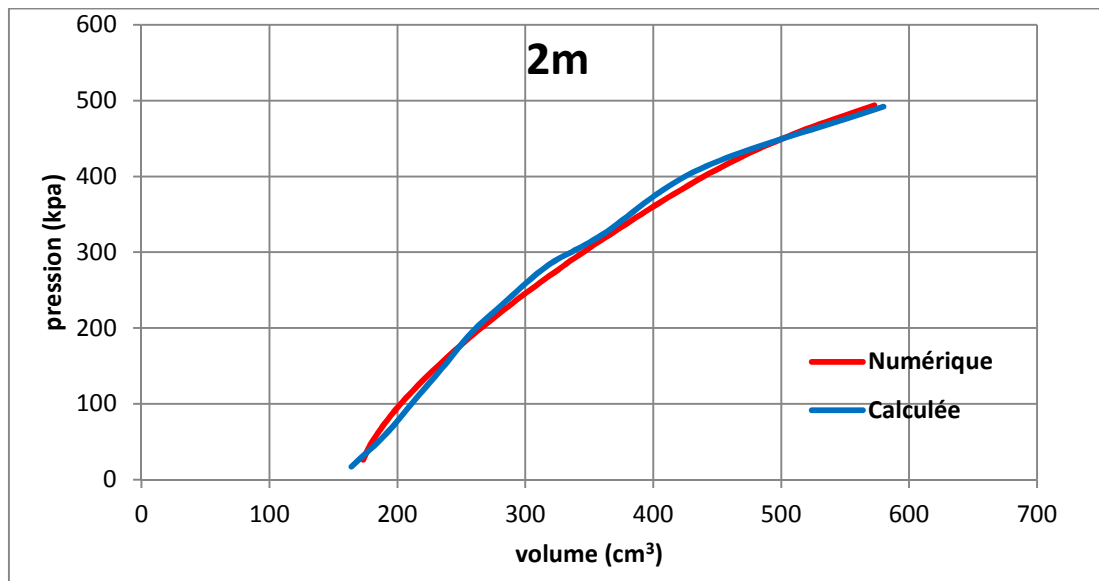


Figure VI.13 : Courbe simulée à 2m point 1.

Tableau VI.13 : Paramètres de courbes simulées à 2m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.86	13.06
Paramètres de sortie	1.7	79.5

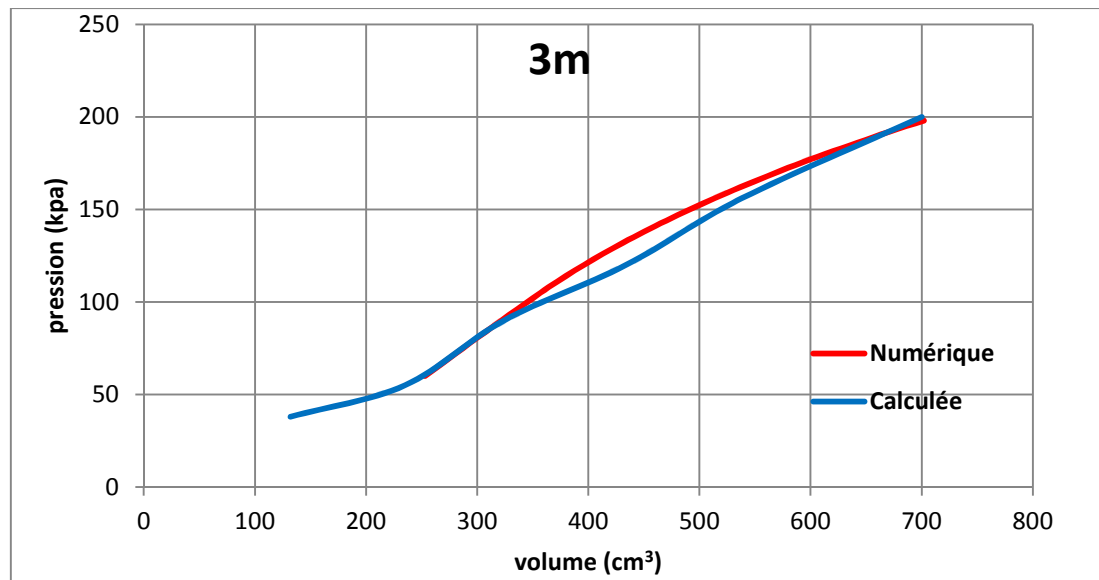


Figure VI.14 : Courbe simulée à 3m point 1.

Tableau VI.14 : Paramètres de courbes simulées à 3m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.27	2.03
Paramètres de sortie	2.8	9.5

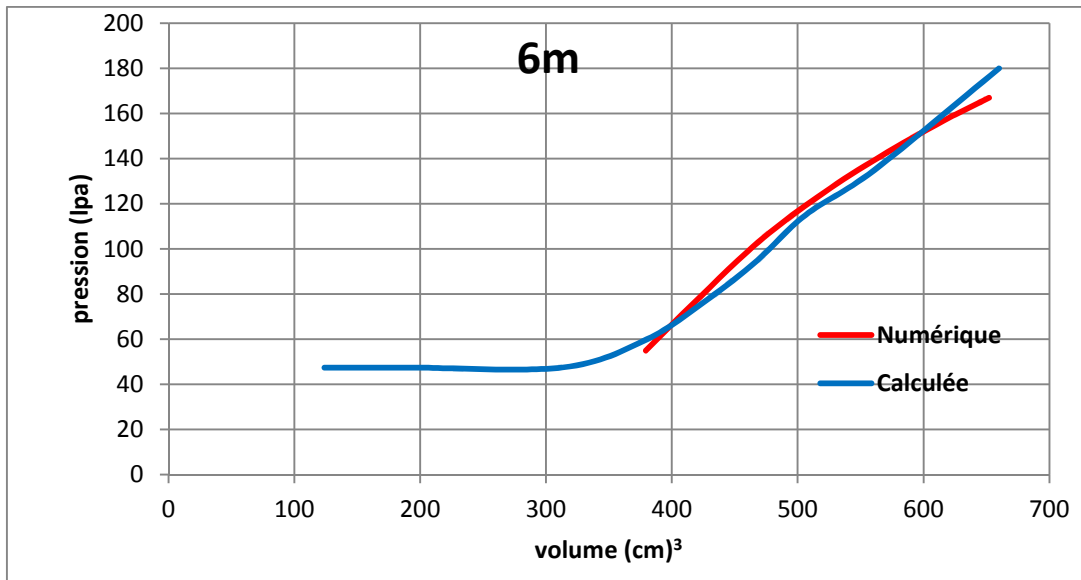


Figure VI.15 : Courbe simulée à 6m point 1.

Tableau VI.15 : Paramètres de courbes simulées à 6m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.24	3.72
Paramètres de sortie	3.3	12.5

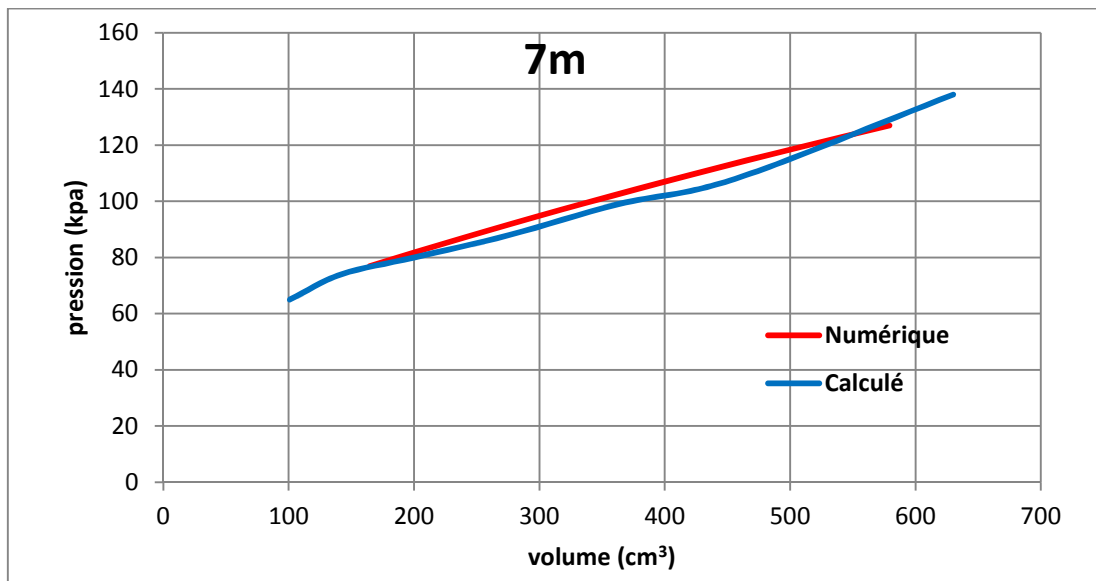


Figure VI.16 : Courbe simulée à 7m point 1.

Tableau VI.16 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.12	0.1
Paramètres de sortie	1.5	2.9

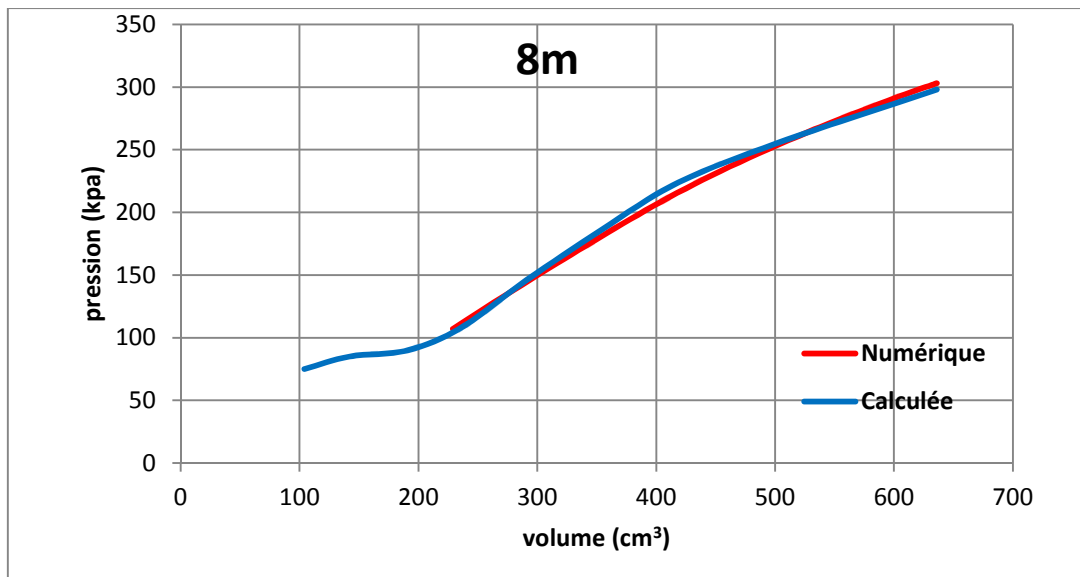


Figure VI.17 : Courbe simulée à 8m point 1.

Tableau VI.17 : Paramètres de courbes simulées à 8m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.36	3.23
Paramètres de sortie	1.8	13

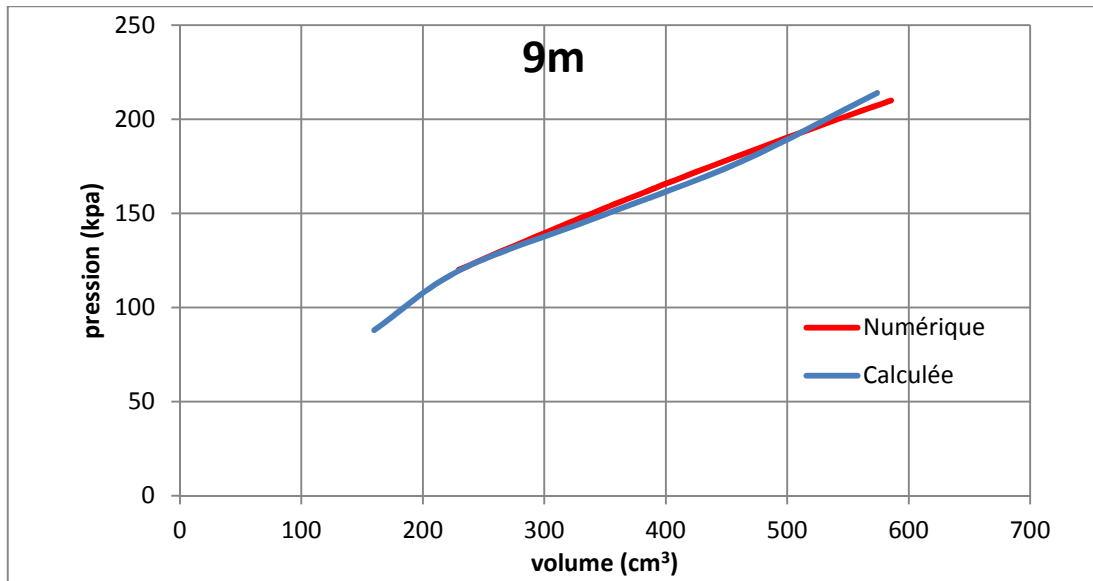


Figure VI.18 : Courbe simulée à 9m point 1.

Tableau VI.18 : Paramètres de courbes simulées à 9m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.42	1.66
Paramètres de sortie	2.5	6

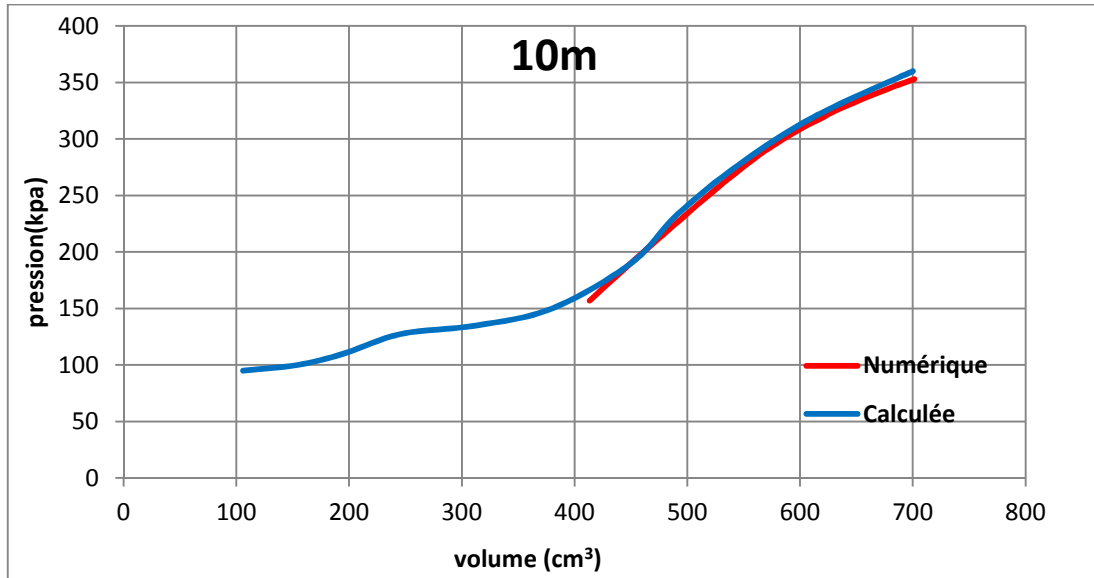


Figure VI.19 : Courbe simulée à 10m point 1.

Tableau VI.19 : Paramètres de courbes simulées à 10m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.38	6.76
Paramètres de sortie	0.96	20

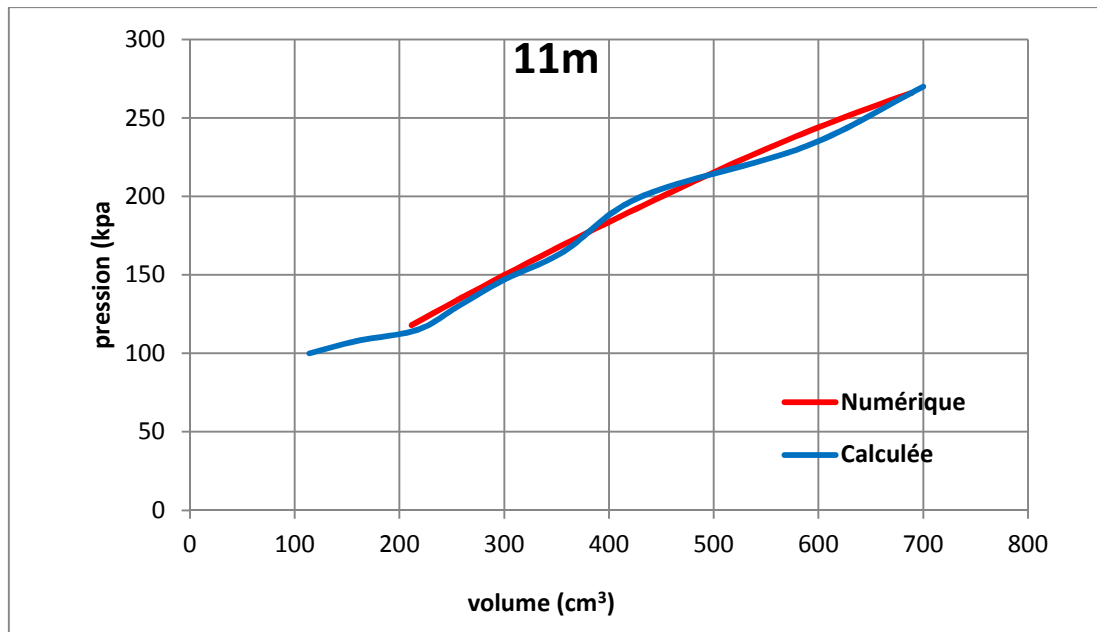


Figure VI.20: Courbe simulée à 11m point 1.

Tableau VI.20 : Paramètres de courbes simulées à 11m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.28	12.85
Paramètres de sortie	1.7	7.8

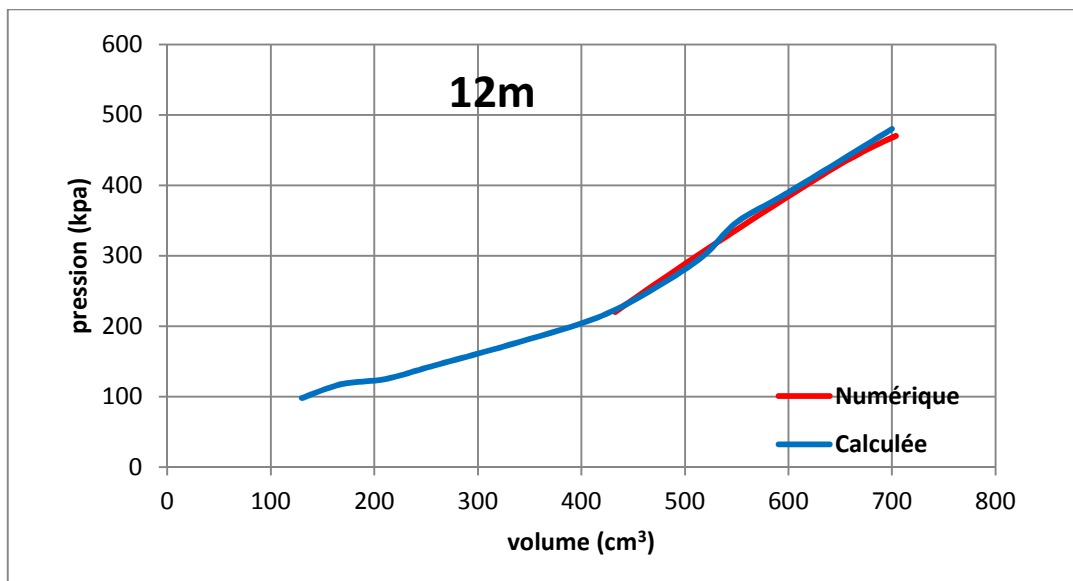


Figure VI.21 : Courbe simulée à 12m point 1.

Tableau VI.21 : Paramètres de courbes simulées à 12m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.5	10.33
Paramètres de sortie	1.8	22.8

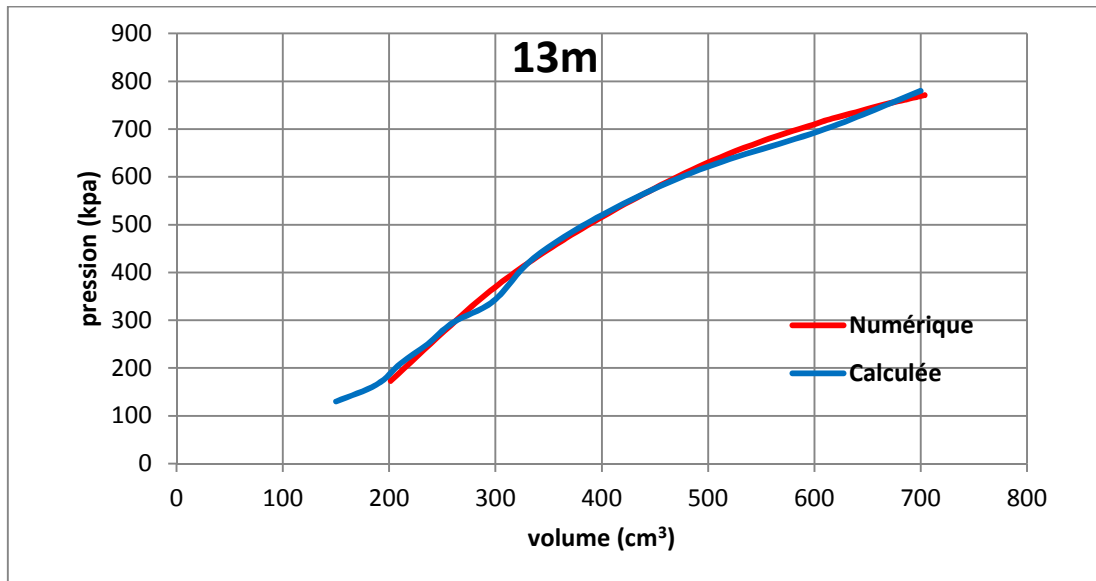


Figure VI.22 : Courbe simulée à 13m point 1.

Tableau VI.22 : Paramètres de courbes simulées à 13m, point 1, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	1.12	10.23
Paramètres de sortie	2.55	44

Point 2

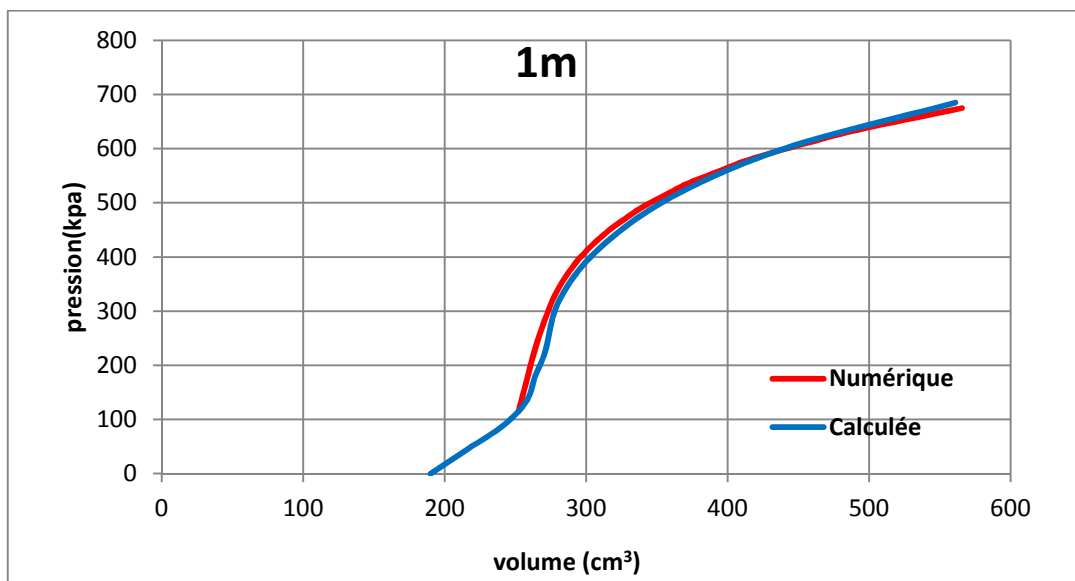


Figure VI. 23: Courbe simulée à 1m point 2.

Tableau VI.23 : Paramètres de courbes simulées à 1m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	1.05	27.82
Paramètres de sortie	1.3	210

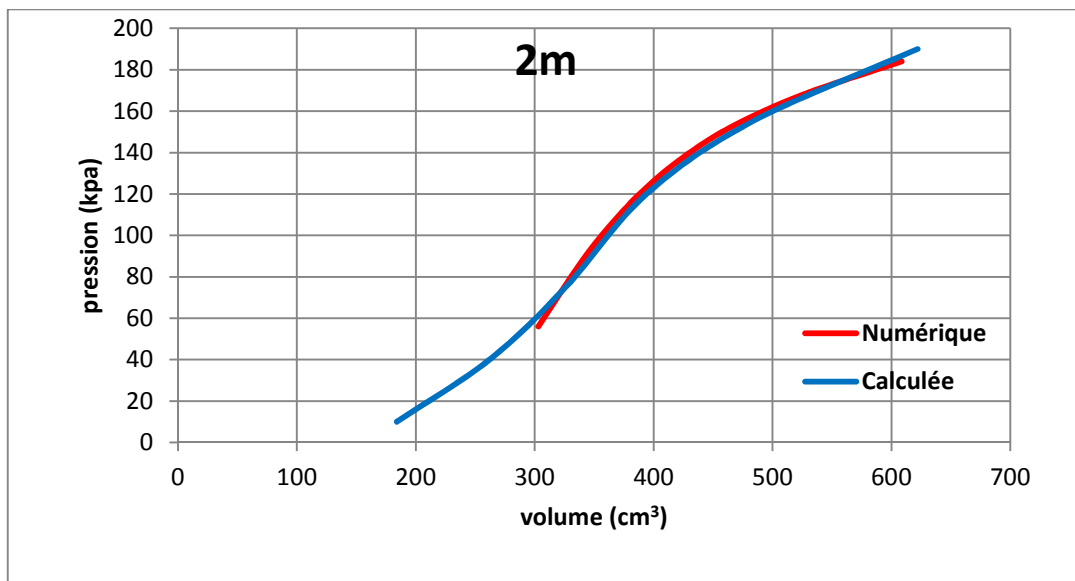


Figure VI.24 : Courbe simulée à 2m point 2.

Tableau VI.24 : Paramètres de courbes simulées à 2m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.27	3.7
Paramètres de sortie	0.5	19

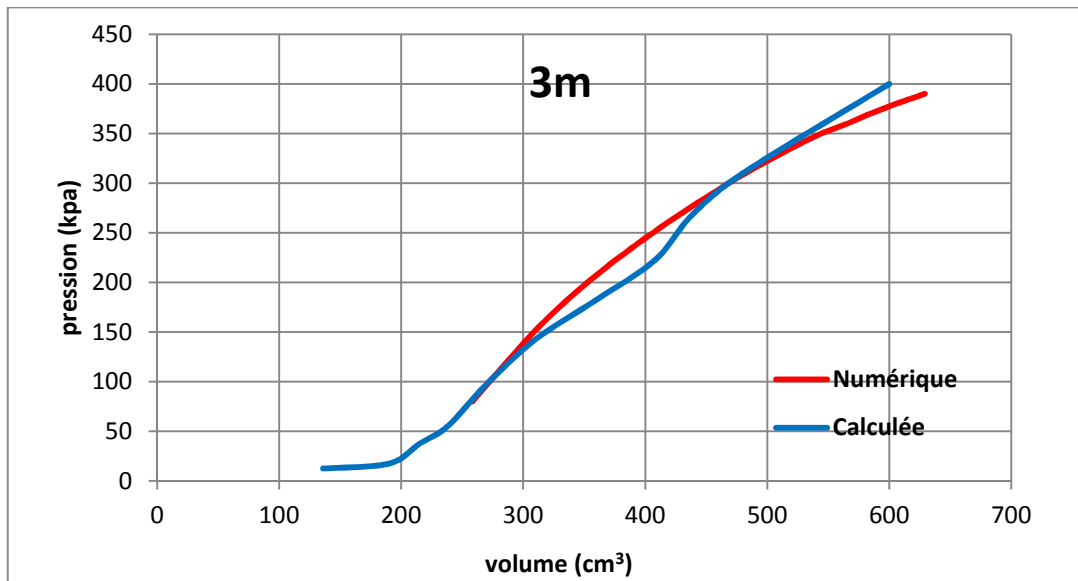


Figure VI.25 : Courbe simulée à 3m point 2.

Tableau VI.25 : Paramètres de courbes simulées à 3m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.7	5.34
Paramètres de sortie	1.2	30

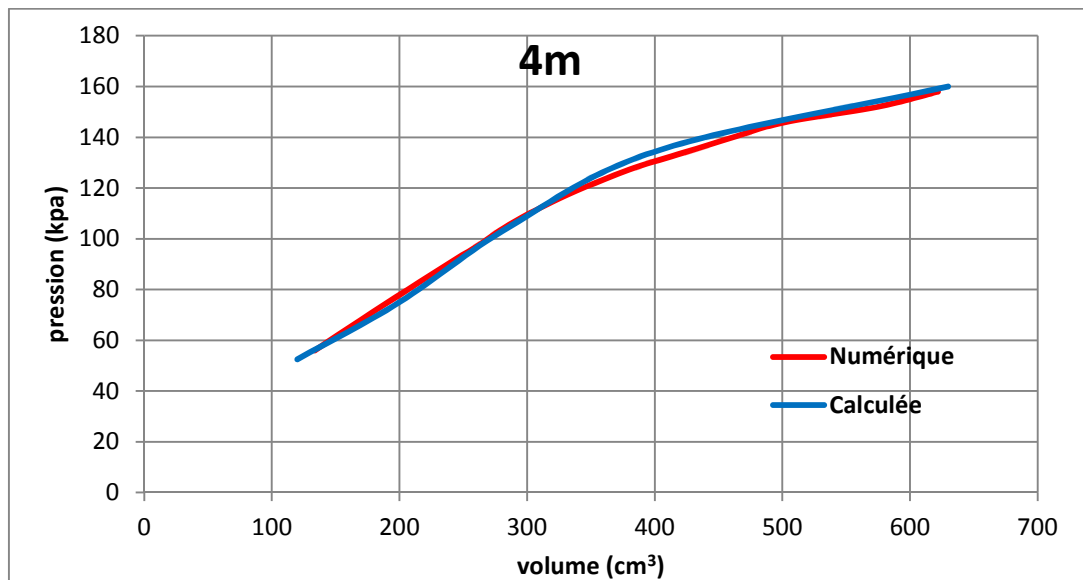


Figure VI.26 : Courbe simulée à 4m point 2.

Tableau VI.26 : Paramètres de courbes simulées à 4m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.2	1.05
Paramètres de sortie	0.4	7

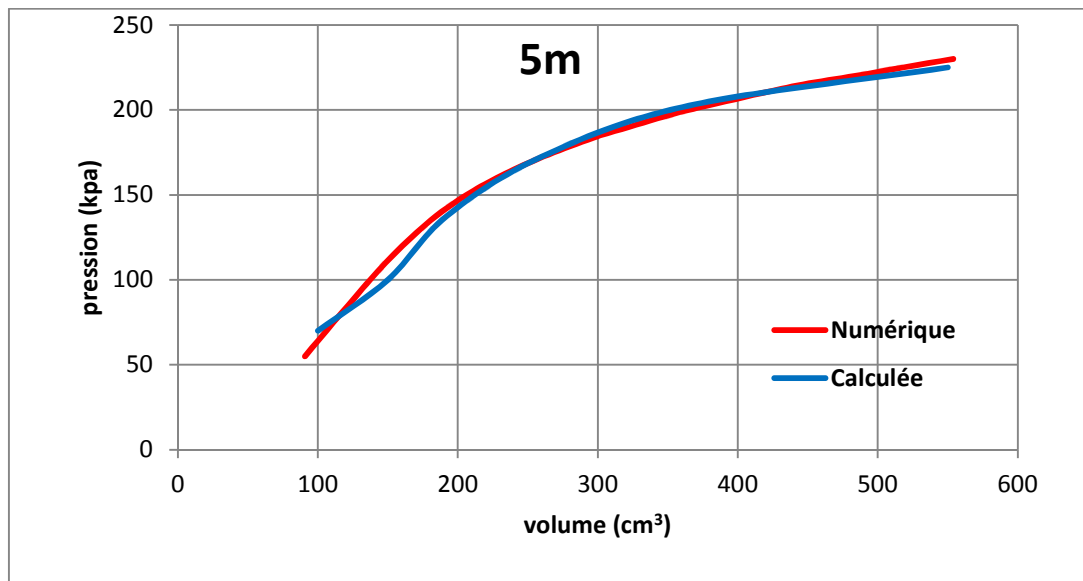


Figure VI.27 : Courbe simulée à 5m point 2.

Tableau VI.27 : Paramètres de courbes simulées à 5m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.32	1.36
Paramètres de sortie	0.54	20

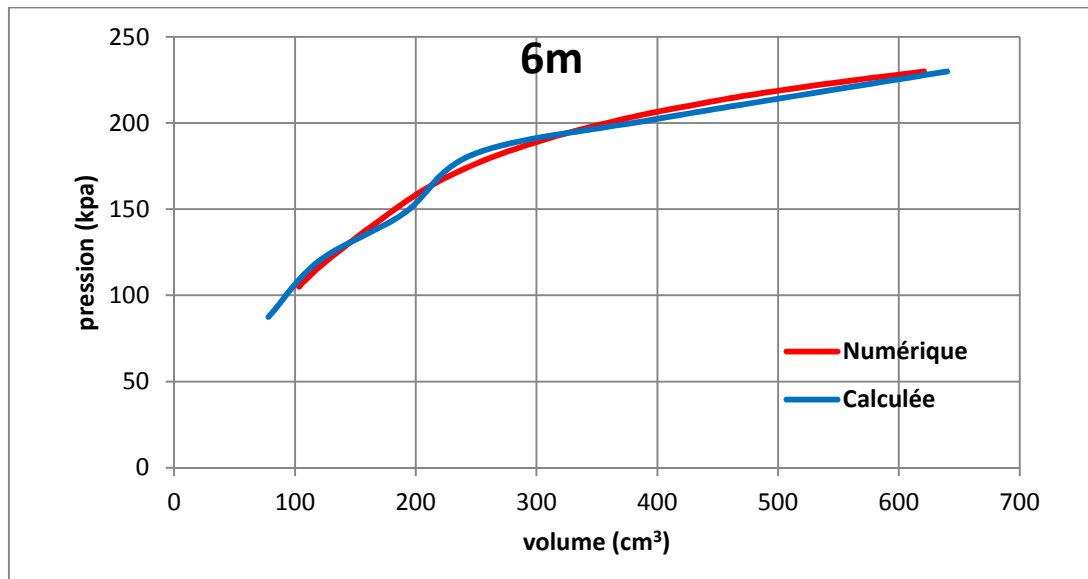


Figure VI.28 : Courbe simulée à 6m point 2.

Tableau V.28 : Paramètres de courbes simulées à 6m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée C_u	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.24	1
Paramètres de sortie	0.29	15

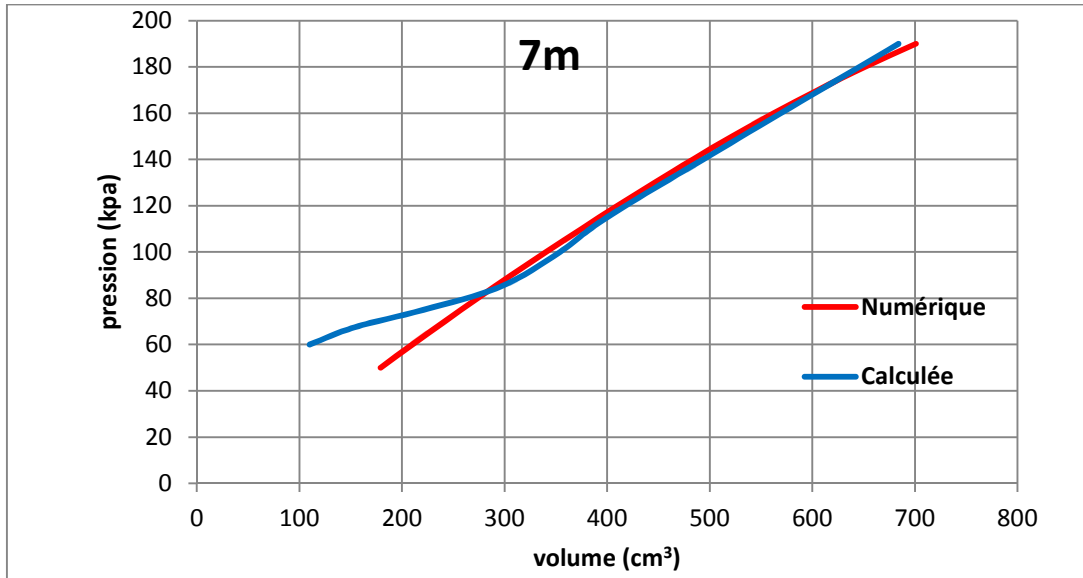


Figure VI.29 : Courbe simulée à 7m point 2.

Tableau VI.29 : Paramètres de courbes simulées à 7m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.2	5.36
Paramètres de sortie	2.5	6.5

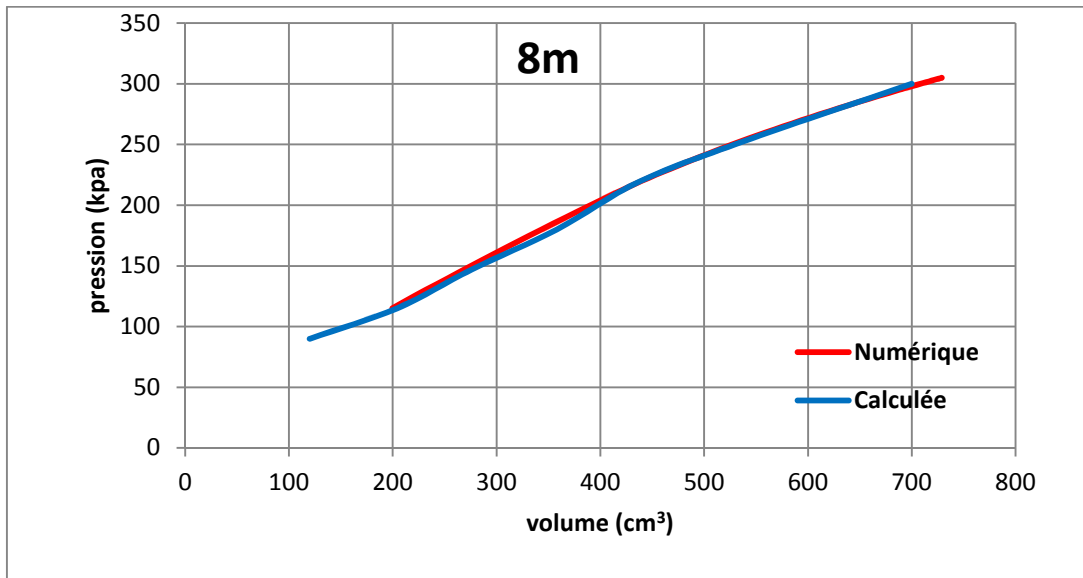


Figure VI.30: Courbe simulée à 8m point 2.

Tableau VI.30 : Paramètres de courbes simulées à 8m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	0.35	2.17
Paramètres de sortie	2	10

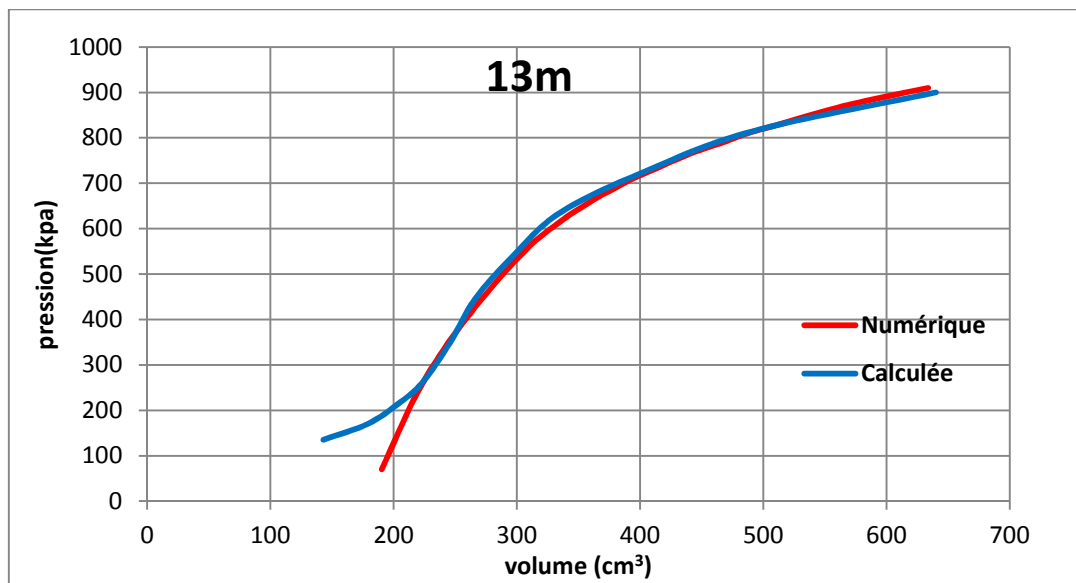


Figure VI.31 : Courbe simulée à 13m point 2.

Tableau VI.31 : Paramètres de courbes simulées à 13m, point2, Bejaia

	Cohésion non drainée Cu	Module de cisaillement G
Paramètres d'entrée	1.45	17.07
Paramètres de sortie	2.2	125

VI.3 Interprétations des résultats

➤ Site de Tizi Ouzou

Une fois les simulations numériques finis, les valeurs de la cohésion C_u et du module de cisaillement G , sont récapitulés dans les tableaux suivants, et tracées en fonction de la profondeur (figure VI.32,... VI.35).

Tableau VI.32 : identification de C_u à différentes profondeurs du point1, Tizi Ouzou

profondeur	C_u numérique
4	3,9
5	3,5
6	5,5
7	5,5
8	8
9	8

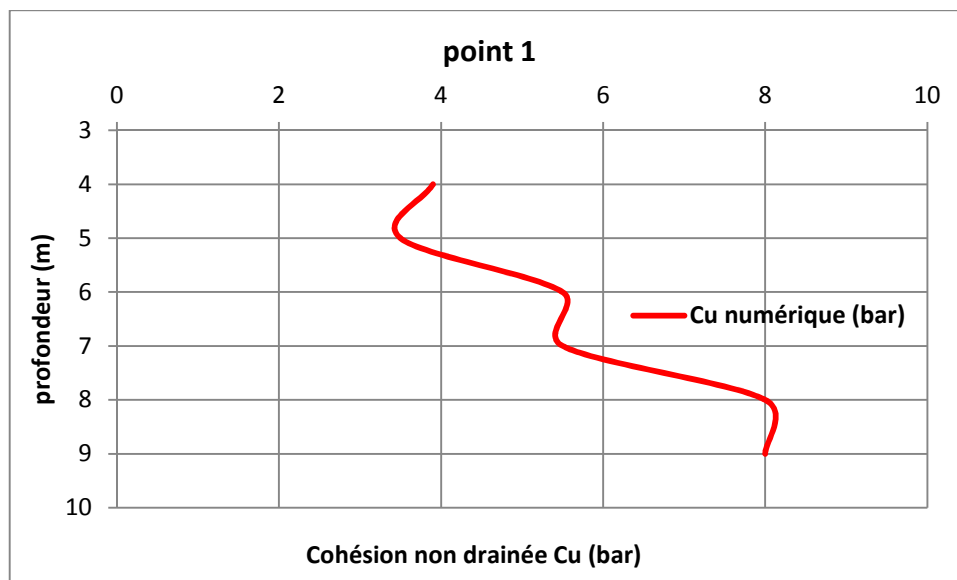


Figure VI.32 : Cohésion non drainée C_u identifiée au point1 site de Tizi Ozou

Tableau VI.33 : identification de G à différentes profondeurs du point1, Tizi Ozou

profondeur	G expérimentale	G numérique
4	24,16	210
5	84	290
6	60,88	410
7	72,85	410
8	23,22	1600
9	194,4	1600

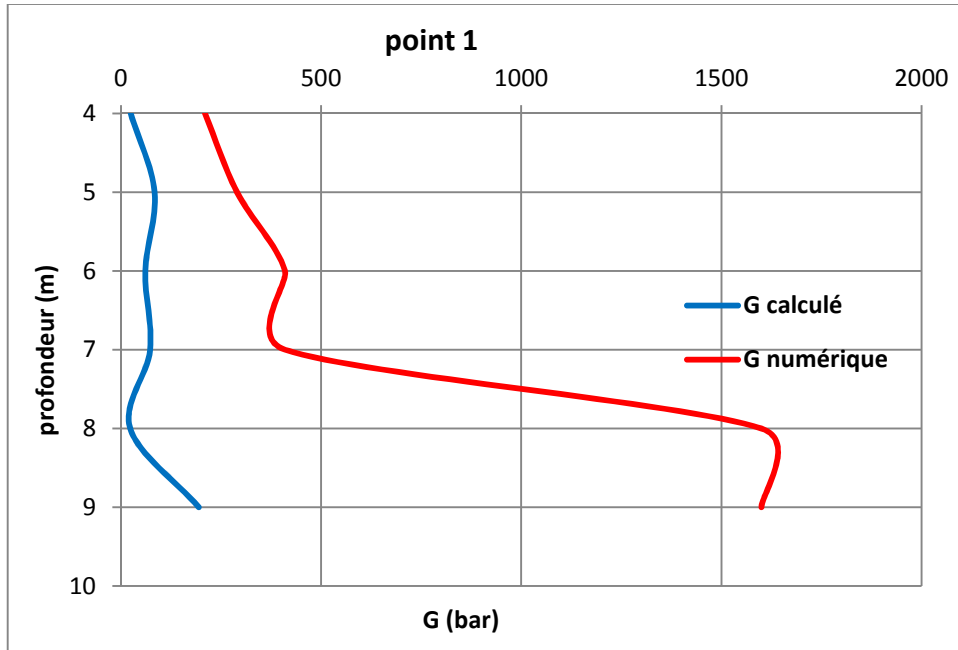


Figure VI.33 : Module de cisaillement G au point1, Tizi Ozou

Tableau VI.34 : identification de Cu à différentes profondeurs du point2, Tizi Ozou

profondeur	Cu expérimentale	Cu numérique	Ep
4	1,21	1,8	26,65
5	1,33	2,8	42,56
6	3,28	5,3	165,98
7	3,52	9,5	516,4
8	3,06	11	507,22
9	3	7,5	450,47

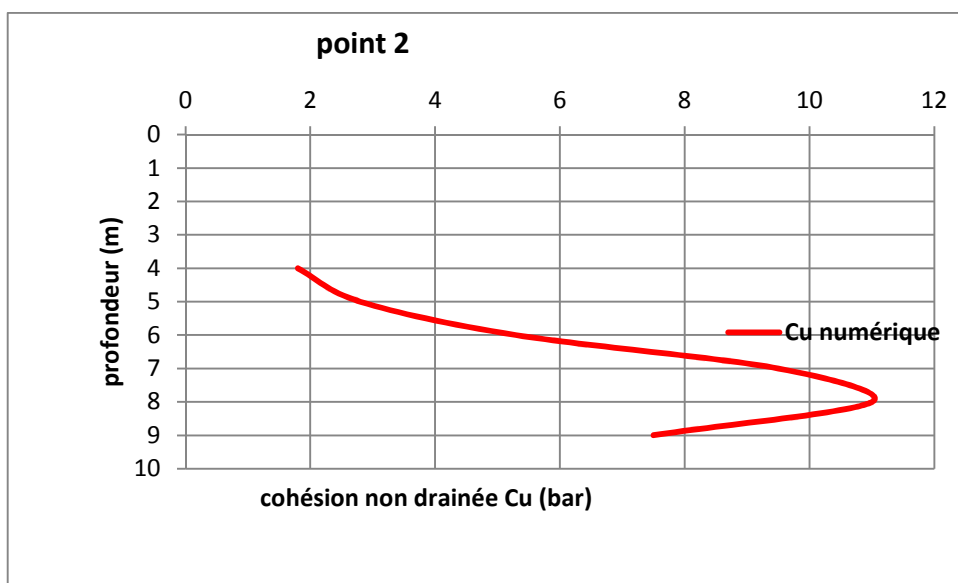


Figure VI.34 : Cohésion non drainée CU au point2, Tizi Ozou

Tableau VI.35 : identification de G à différentes profondeurs du point2, Tizi Ozou

profondeur	G expérimentale	G numérique	profondeur
4	10,02	120	4
5	16	110	5 </td
6	62,4	790	6
7	194,13	895	7
8	190,68	955	8
9	169,28	850	9

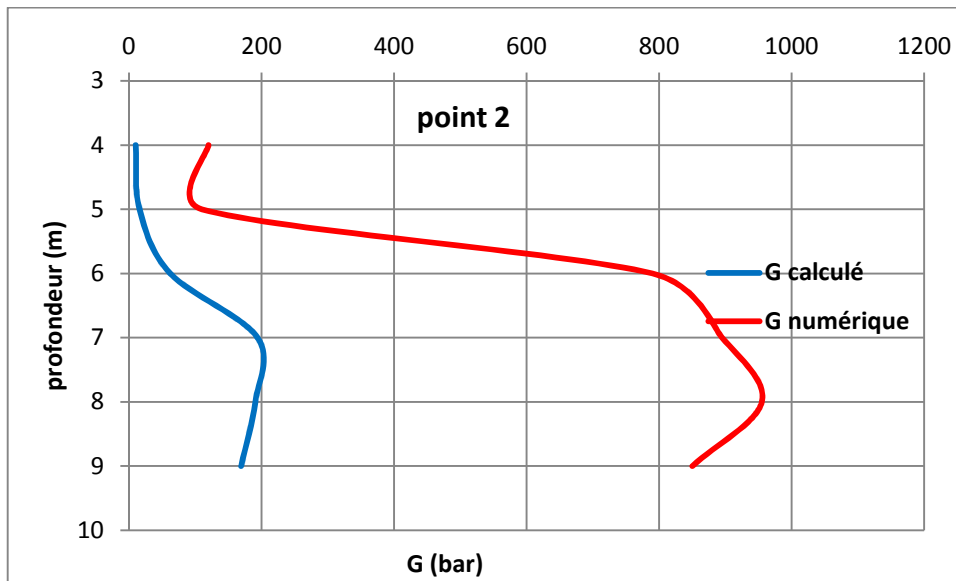


Figure VI.35 : Module de cisaillement G au point2, Tizi Ozou

VI.3.1 Interprétations des résultats de site de Tizi Ouzou :

Les résultats de la cohésion non drainée obtenue pour le point 1 et point 2 sont représentés aux figures (V.32) et (V.34), ces dernières montrent une variation de la cohésion non drainée C_u avec la profondeur, où on remarque une légère augmentation de la cohésion sur les premiers mètres, ensuite il y a une forte augmentation en profondeur.

Pour le module de cisaillement G identifié, on constate aussi qu'il varie avec la profondeur, où il est très important en allant en profondeur.

Les comparaisons du module G identifié au module G calculé à partir du module pressiométrique E_M , ($\nu = 0.33$), montre une légère différence en surface, cette différence va devenir très grande en profondeur.

➤ Site de Bejaia

Une fois les simulations numériques finies pour le site de Bejaia, les valeurs de la cohésion C_u et du module de cisaillement G , sont récapitulés dans les tableaux suivants, et tracés en fonction de la profondeur (figure VI.36,....VI.39).

Tableau VI.36 : identification de C_u à différentes profondeurs du point1, Bejaia

profondeur	C_u expérimentale	C_u numérique
1	1,98	2,7
2	0,86	1,7
3	0,27	2,8
5	0,076	1,5
6	0,24	3,3
7	0,12	1,5
8	0,36	1,8
9	0,42	2,5
10	0,38	0,96
11	0,28	1,7
12	0,5	1,8
13	1,12	2,55

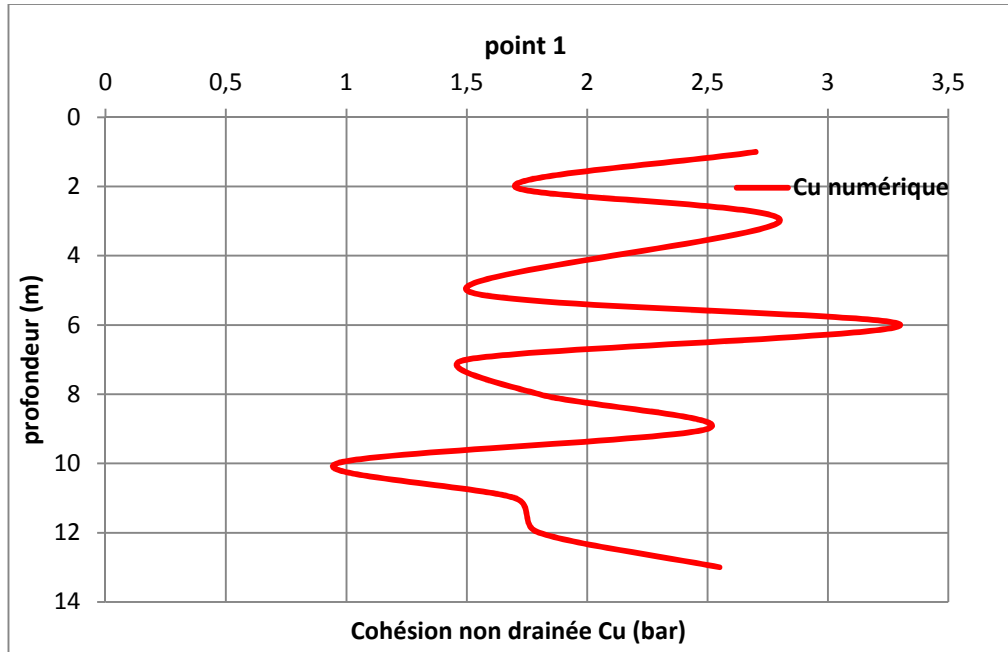


Figure VI.36: Cohésion non drainée Cu au point1, Bejaia

Tableau VI.37 : Identification de G à différentes profondeurs du point1, Bejaia

profondeur	G expérimentale	G numérique
1	81,46	295
2	13,06	79,5
3	2,03	9,5
5	0,2	5
6	3,72	12,5
7	0,1	2,9
8	3,23	13
9	1,66	6
10	6,76	20
11	12,85	7,8
12	10,33	22,8
13	10,23	44

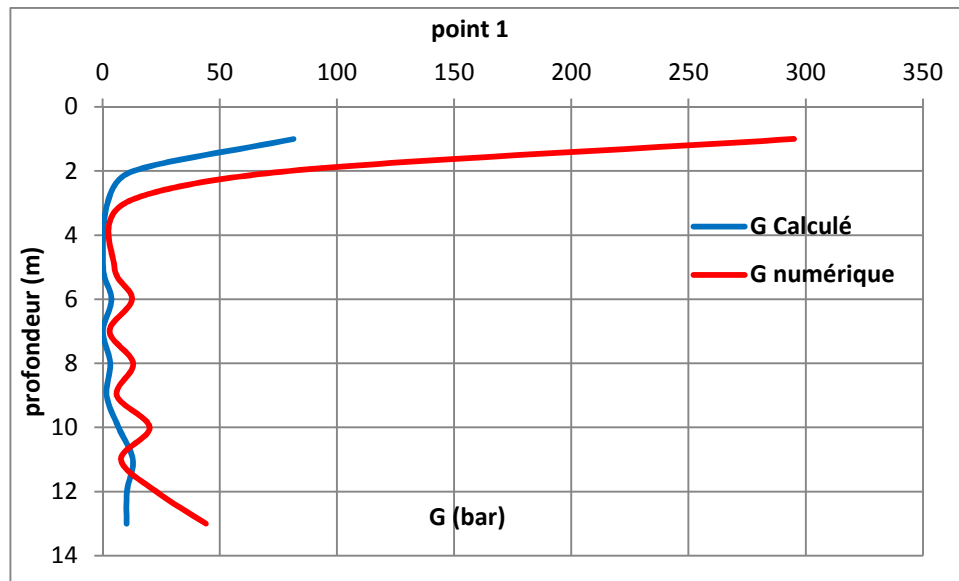


Figure VI.37 : module de cisaillement G au point1, Bejaia

Tableau VI.38 : Identification de Cu à différentes profondeurs du point2, Bejaia

profondeur	Cu expérimentale	Cu numérique
1	1,05	1,3
2	0,27	0,5
3	0,6	1,2
4	0,2	0,4
5	0,32	0,54
6	0,24	0,29
7	0,2	2,5
8	0,35	2
9	0,46	2,5
10	0,85	2,5
11	0,87	2,2
12	0,89	3
13	1,45	2,2

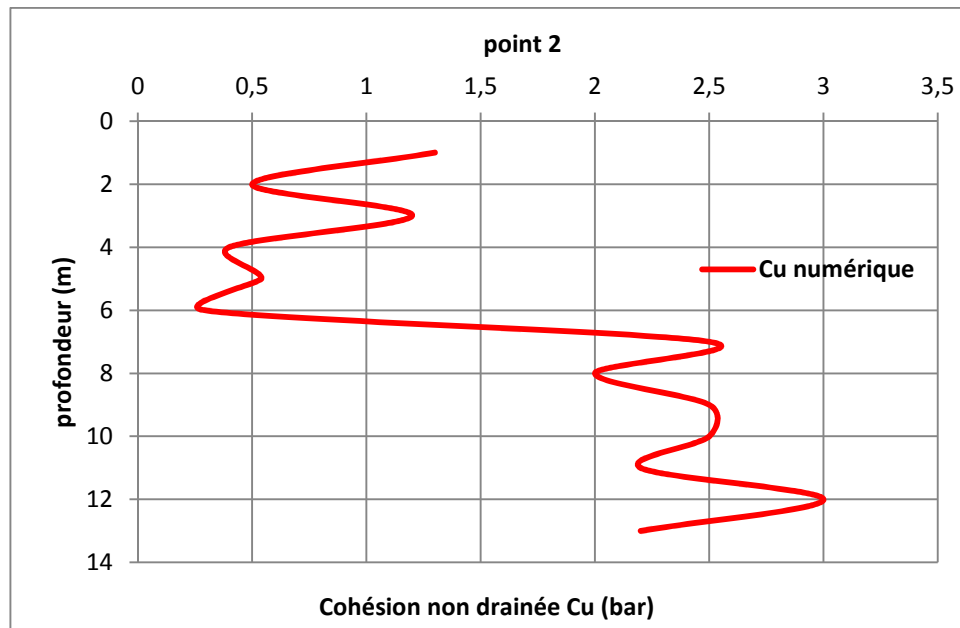


Figure VI.38 : Cohésion non drainée Cu au point2, Bejaia

Tableau V.39 : Identification de G à différentes profondeurs du point2, Bejaia

profondeur	G expérimentale	G numérique
1	27,82	210
2	3,7	19
3	5,34	30
4	1,05	7
5	1,36	20
6	1	15
7	5,36	6,5
8	2,18	10
9	2,9	14
10	6,42	36
11	3,6	38,2
12	4,33	42
13	17,07	125

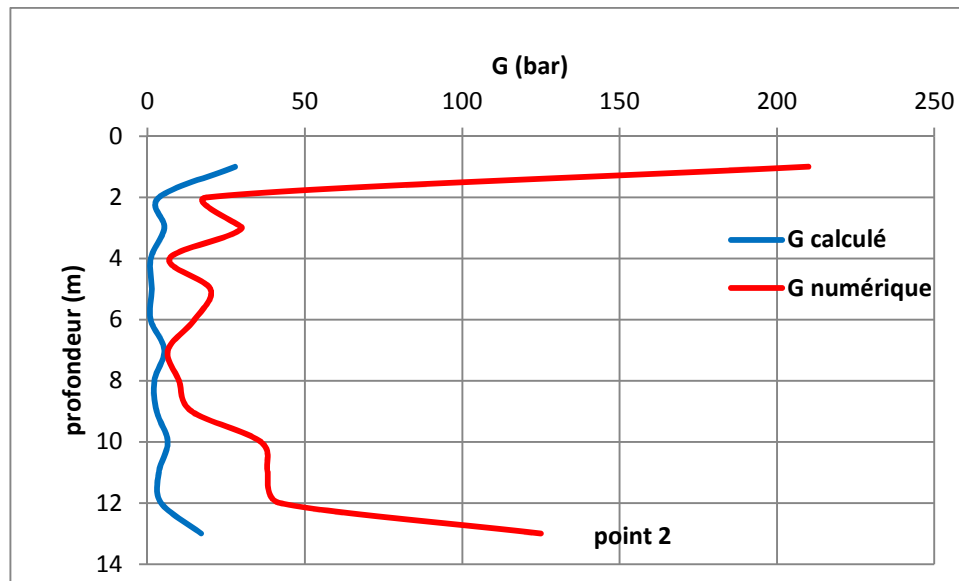


Figure VI.39 : Module de cisaillement G au point2, Bejaia

VI.3.2 Interprétations des résultats de site de Bejaia :

Les résultats de la cohésion non drainée obtenue pour le point 1 et point 2 sont représentés aux figures (V.36) et (V.38), ces dernières montrent une variation de la cohésion non drainée C_u avec la profondeur, où on remarque une légère augmentation de la cohésion sur les premiers mètres, ensuite il y a une forte augmentation en profondeur.

Pour le module de cisaillement G identifié, on constate aussi qu'il varie avec la profondeur, où il est très important pour les 2 mètres de surface.

Les comparaisons du module G identifié au le module G calculé à partir du module pressiométrique E_M , ($\nu = 0.33$), montre une légère différence de 2m à 12m, cette différence va devenir très grande au-delà de cette profondeur.

VI.4 Comparaisons et interprétations entre les méthodes empiriques et numériques :

VI.4.1 Site De Tizi Ouzou

On a fait une comparaison entre les valeurs de C_u identifiées numériquement, et celles calculées à partir des formules empiriques de Louis Ménard et Amar et Jezequel. Les différentes méthodes sont résumées dans le tableau (VI.40) et tracées selon la profondeur (figure VI.40, VI.41)

- $C_u = \frac{p_l - p_0}{10} + 25 \text{ kpa}$ (Cohésion non drainée donnée par Amar et Jezequel)
- $C_u = \frac{p_l - p_0}{5.5}$ (Cohésion non drainée donnée par Ménard)

Tableau VI.40 : Identification de C_u à différentes méthodes, site Tizi Ouzou

Point 1	Profondeur(m)	p_l	p_0	Cu Amar et Jezequel	CU Ménard	Cu numérique
	4	13,5	1,6	1,44	2,16	3,9
5	18,85	3	1,835	2,88	3,5	
6	24,33	5	2,183	3,51	5,5	
7	24,325	4	2,2825	3,7	5,5	
8	25,15	6	2,165	3,48	8	
9	24,875	6	2,1375	3,43	8	
Point 2	Profondeur(m)	p_l	p_0	Cu Amar et Jezequel	CU Ménard	Cu numérique
	4	4,14	1,9	0,474	1,21	1,8
5	8,94	1,6	0,984	1,33	2,8	
6	19,45	1,4	2,055	3,28	5,3	
7	24,6	5,2	2,19	3,52	9,5	
8	24,87	8	1,937	3,57	11	
9	24,98	8,5	1,898	3,6	7,5	

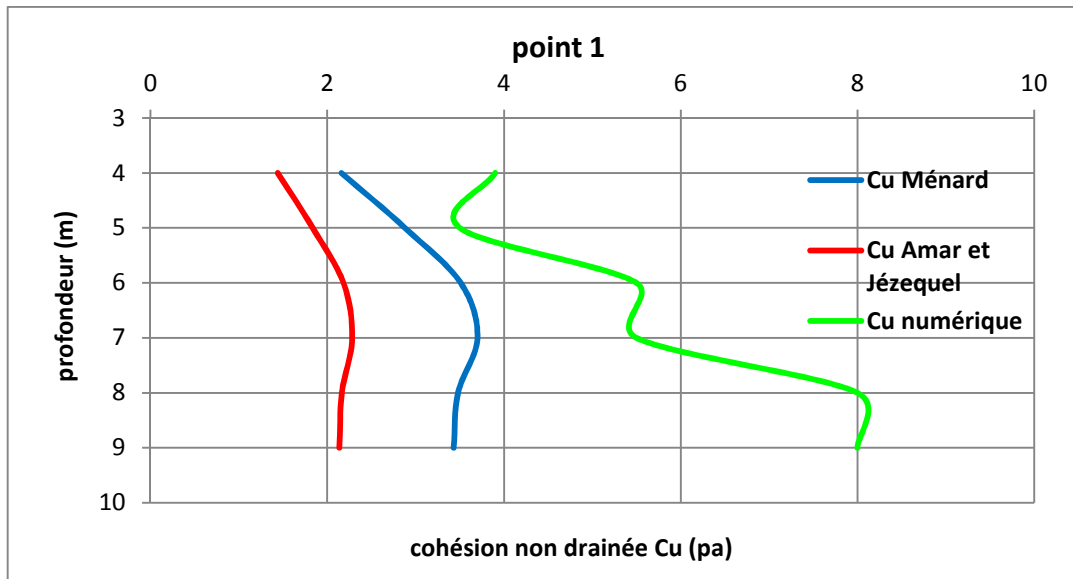


Figure VI.40 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Tizi Ouzou, point1

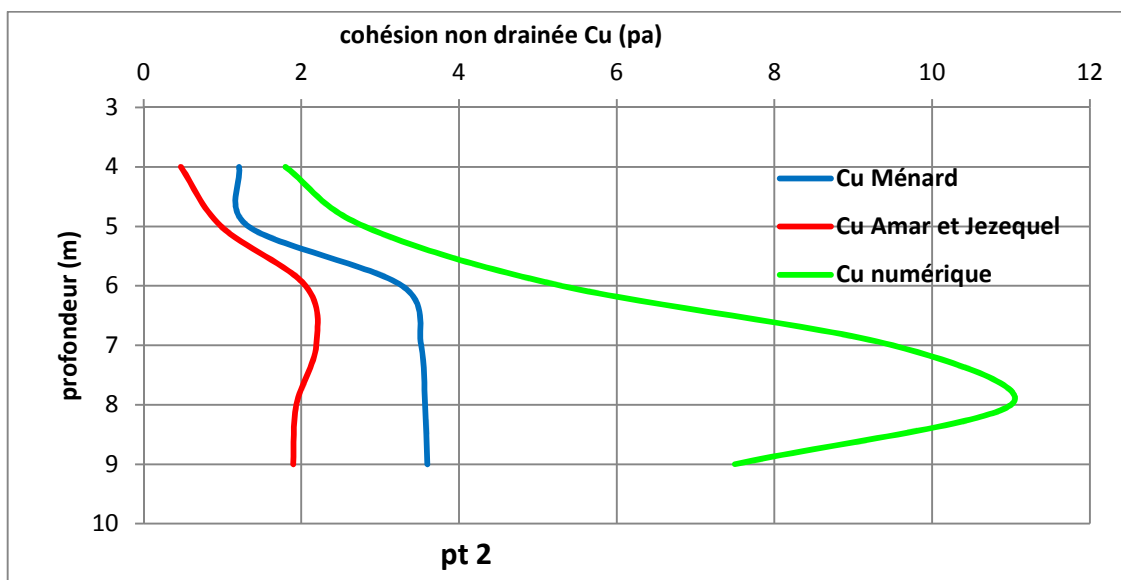


Figure VI.41 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Tizi Ouzou, point2

On remarque que les valeurs de C_u données par les différentes méthodes, varient selon la profondeur

La comparaison des cohésions non drainée obtenues à partir de la méthode numérique et celles obtenues par les méthodes de Ménard et Amar et Jezequel, figure (VI.40) et figure (VI.41) indique des résultats assez proches entre 4 et 6m et à partir de cette profondeur on remarque un écart entre les courbes, on constate que les valeurs obtenues par le logiciel (méthode numérique) sont plus grandes par rapport à celles obtenues par les méthodes empiriques Ménard et Amar et Jezequel.

VI.4.2 Site De Bejaia

On a fait une comparaison entre les valeurs de C_u identifié numériquement, et celles calculés à partir des formules empiriques de Louis Ménard et Amar et Jezequel. Les différentes méthodes sont résumées dans le tableau (VI.41) et tracées selon la profondeur (figure VI.42, VI.43)

- $C_u = \frac{p_l - p_0}{10} + 25 \text{ kpa}$ (Cohésion non drainée donnée par Amar et Jezequel)
- $C_u = \frac{p_l - p_0}{5.5}$ (Cohésion non drainée donnée par Ménard)

Tableau VI.41 : Identification de C_u à différentes méthode, site Bejaia

	Profondeur(m)	p_l	p_0	Cu Amar	CU	Cu
				et Jezequel	Ménard	numérique
Point 1	1	11,9	1	1,34	1,98	2,7
	2	4,92	0,17	0,725	0,86	1,7
	3	2	0,54	0,396	0,27	2,8
	5	0,67	0,25	0,292	0,076	1,5
	6	1,8	0,47	0,383	0,24	3,3
	7	1,38	0,72	0,316	0,12	1,5
	8	2,98	1	0,448	0,36	1,8
	9	3,5	1,15	0,485	0,42	2,5
	10	3,6	1,5	0,46	0,38	0,96
	11	2,7	1,14	0,406	0,28	1,7
	12	4,8	2,1	0,52	0,5	1,8
	13	7,8	1,6	0,87	1,12	2,55
	Point 2				Cu Amar	CU
				et Jezequel	Ménard	numérique
1		6,85	1,05	0,83	1,05	1,3
2		1,9	0,4	0,4	0,27	0,5
3		4	0,7	0,58	0,6	1,2
4		1,6	0,5	0,36	0,2	0,4
5		2,25	0,5	0,425	0,318	0,54
6		2,3	1	0,38	0,24	0,29
7		1,9	0,8	0,36	0,2	2,5
8		3	1,05	0,445	0,35	2
9		3,6	1,05	0,505	0,46	2,5
10		5,7	1	0,72	0,85	2,5
11		5,825	1	0,7325	0,87	2,2
12	5,9	1	0,74	0,89	3	
13	9	1	1,05	1,45	2,2	

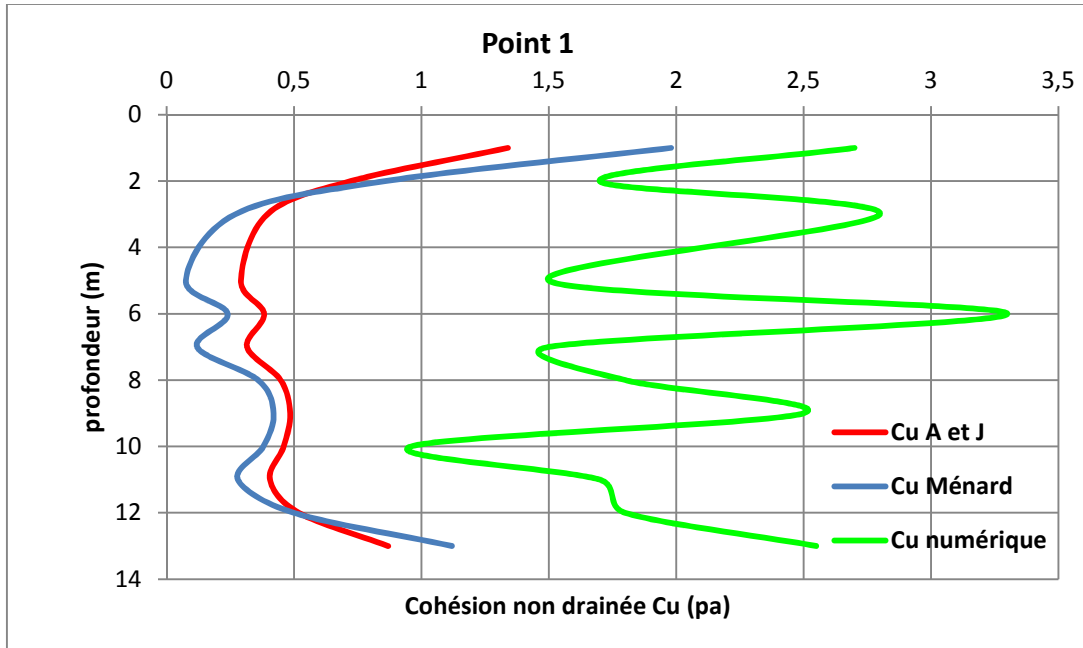


Figure VI.42 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Bejaia, point1

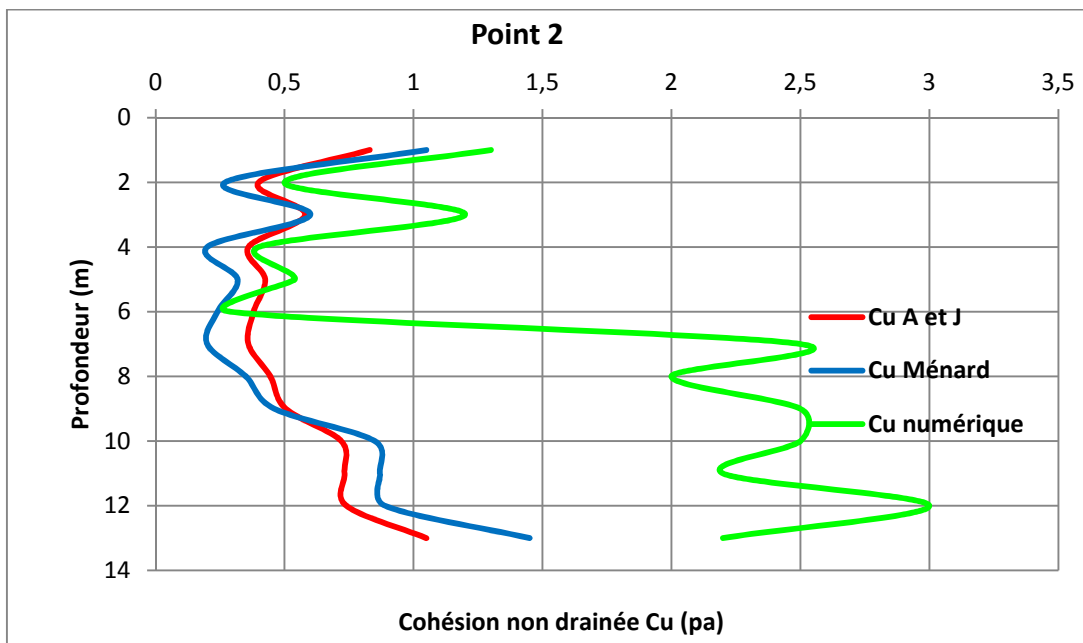


Figure VI.43 : Cohésion non drainée à différents méthodes, site Bejaia, point2

On remarque que les valeurs de C_u données par les différentes méthodes, varient selon la profondeur

On constate que les cohésions non drainée obtenues à partir des différentes méthodes, (figure VI.42, et figure VI.43) sont très proches sur les premiers mètres, au delà de 6m les valeurs de la cohésion identifiée numériquement, s'éloignent des valeurs de Ménard et Amar et Jezequel.

On constate aussi que les valeurs obtenues par le logiciel sont plus grandes par rapport à celles obtenues par les méthodes empiriques.

VI.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a identifié les paramètres de comportement de sol à partir de la modélisation de l'essai pressiométrique, sous le code numérique $FLAC^{2D}$, pour cela on a simulé les courbes pressiométriques, ensuite, on les a calées aux courbes corrigées.

Ensuite on a comparé ces paramètres identifié numériquement, à savoir la cohésion non drainée et le module de cisaillement, aux valeurs de la cohésion déterminées par la méthode de Louis Ménard et la méthode de Amar et Jezequel, et les valeurs de module de cisaillement G déterminés à partir de module préssiométrique E_M .

On peut constater, que la modélisation de numérique de l'essai pressiométrique, peut être considérée comme une étape supplémentaire pour la reconnaissance des sols, qui est réalisée soit en laboratoire soit in situ.

Bibliographie

- **AFETTOUCHE Mokrane et LARFi Aomar (1996)** « Détermination des paramètres de comportement des sols a partir de l'essai pressiometrique» Mémoire de fin d'étude. présentée à l'université Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou.
- **ALIMRINA Nassima (2009)** « Analyse des méthodes d'identification des paramètres de comportement des sols à partir d'essais in situ », mémoire de magistère. présentée à l'université Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou.
- **ALIOUA Sonia (2013)** « Etude numérique du comportement des sols de la zone portuaire de Bejaia soumis à la sollicitation sismique (FLAC^{2D}) » Mémoire de fin d'étude. présentée à l'université Mouloud MAMMERI Tizi Ouzou.
- **BELAHASSANI Ourda (2007)** «Modélisation de l'essai pressiométrique cyclique», Thèse de magistère. université des sciences et technologies Houari BOUMEDIENNE de BABA EZZOUAR
- **GUETTAFI Nesrine (2012)** « Comportement des sols mous lors d'un essai pressiometrique», Mémoire de magistère. Thèse présentée à l'université El Hadj Lakhdar, Batna.
- **Itasca Consulting Group, Inc** «Fast Lagrangian Analysis Of Continua (FLAC), Command Reference». Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2006.
- **Itasca Consulting Group, Inc** «Fast Lagrangian Analysis Of Continua (FLAC), Grid Generation». Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2006.
- **Itasca Consulting Group, Inc** «Fast Lagrangian Analysis Of Continua (FLAC), Dynamic analysis». Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc, 2006
- **Maurice CASSAN (1978)** « Les essais in Situ En Mécanique Des Sols, réalisation et interprétation ». Tome I. Editions EYROLLES.PARIS.
- **Maurice CASSAN (1978)** « Les essais in Situ En Mécanique Des Sols, Application aux méthodes de calcul ». Tome II. Editions EYROLLES.PARIS.

Bibliographie

- **MEGHLAT El-Mahdi (2006)** «Etude numérique du comportement des matériaux granulaire (Pegmatite Et Calcaire), Application Du Critère Druker Prager, Mohr-Coulomb et du modèle Strain Softening/Hadening», Thèse de magistère, présentée à l'université Mouloud MAMMERY Tizi Ouzou.
- **MELBOUCI Bachir (2009)** « Méthode de calcul de stabilité des fondations, des talus et des ouvrages de soutènement ». Editions Elamel.ALGERIE.
- **Mohammad AL HUSEIN (2001)** « Étude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques ». Thèse présentée à l'université Joseph FOURIER – Grenoble I.
- **Youssef BENTAIEBI (2011)** « Analyse théorique et numérique du comportement non drainé d'une argile surconsolidée lors d'un essai pressiométrique». Thèse présentée à l'école polytechnique de Montréal.

➤ **Correction de la courbe pressiométrique**

La pression P exercée réellement sur la paroi du forage est donnée par la relation suivante :

$$P = P_m - P_i + \gamma_w (Z + a)$$

Z : la profondeur au dessous de l'appui du pressiomètre.

P : La pression exercée sur la paroi de forage.

P_m : La pression lue sur le manomètre

P_i : est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité V_m

Z : la profondeur au dessous de l'appui du pressiomètre

a : la hauteur hydrostatique

γ_w : Poids volumique de l'eau

On opte pour un exemple pour bien expliquer, comment corriger la courbe pressiométrique brute :

pression brute	volume	Pression corrigée	pression étalonnage	volume étalonnage
0,5	190	0	0,2	50
1	216	0,45	0,45	100
1,5	242	0,9	0,6	150
2	258	1,35	0,8	225
2,5	264	1,8	1	310
3	271	2,25	1,2	435
4	281	3,2	1,4	600
5	309	4,15		
6	360	5,1		
7	440	6		
8	561	6,85		

Les données d'un essai pressiométrique sont les pressions brutes et volumes, et les données d'un essai d'étalonnage, sont les pressions et volumes d'étalonnage

Pour la formule utilisée

$$P = P_m - P_i + \gamma_w (Z + a)$$

P : est la pression corrigée.

P_m : la pression brute.

P_i : est déduite à partir de la courbe d'étalonnage,

On prend un exemple de volume de l'essai pressiometrique, et on cherche la pression qui lui correspond (p_i) dans les pressions d'étalonnage.

Exemple : a = 1m, hauteur piézométrique. Z= 1m pour cet exemple

Volume de l'essai pressiometrique V=561 cm³, lui correspond une pression (p_i) de 1.35 (bar) sur les pressions d'étalonnage.

Donc P corrigée= 8-1.35+0.1 (1m+1) = (6.85 bar)

On fait la même chose pour toutes les valeurs de pressions et volumes.

