

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou

Faculté de génie de la construction

Département de génie civil



Mémoire de master académique

Filière : Génie civil

Spécialité : Géotechnique

Thème

*Etude et exploitation de l'essai
pressiométrique.*

Présenté par :

RAMDANE Thanina

Devant le jury composé de :

M^r MELBOUCI Bachir

Professeur à l'UMMTO

Président

M^{me} BELHASSANI Ouarda

Maitre assistante

Promotrice

M^r GHOUUELEM Kamel

Maitre de conférences –A à l'UMMTO

Examineur

Promotion : 2019/2020

Remerciement

Tout d'abord, je remercie Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et le courage de mener à bien ce travail.

Mes sincères remerciements à ma promotrice M^{me} BELHASANI pour l'encadrement de ce mémoire, pour son grand aide, et pour la confiance qu'elle m'a accordée, et qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour sa digne disponibilité, ses conseils utiles et si précieux.

Mes respectueux remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté de faire partie du Jury de ce mémoire.

Je tiens également à remercier, ma famille, ma belle-famille, mes amis et tous ceux qui, de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents pour leurs sacrifices, soutiens et encouragements.

A mes sœurs et frères, et à mon fiancé.

A toute la promotion géotechnique 2019/2020.

Et à toute Personne ayant contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce travail.

Notations principales

P_L : pression pressiométrique limite

P_0 : pression horizontale des terres au repos

P_f : pression de fluage

V_0 : volume initial de sol au repos

V_f : volume de fluage

V_s : 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

V_r : le volume indiquer sur le CPV

V : volume corrigé

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta V}\right)$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe

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_r

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

h : la hauteur hydrostatique

γ_w : Poids volumique de l'eau

a : Coefficient de compressibilité

GP2 : Module de cisaillement sécant à 2% de déformation

GP5 : Module de cisaillement sécant à 5% de déformation

β : coefficient d'identification des sols

ν : coefficient de poisson

E : module de Young

E_p : module pressiométrique Menard

G : module de cisaillement

φ : l'angle de frottement

K_p : facteur de portance pressiométrique

K : facteur de compressibilité

C_u : cohésion non drainée

I_r : indice de rigidité

ε_r : déformation radiale

ε_θ : déformation circonférentielle

u : déplacement radial au point de rayon r

r_0 : Rayon de la cavité cylindrique

τ : Contrainte de cisaillement

C_u : cohésion non drainée

k : facteur de portance pressiométrique

q_1 : contrainte de rupture

q_0 : contrainte totale verticale des terres au niveau de la base de la fondation

k_0 : coefficient des pressions des terres au repos

D_e : la hauteur d'encastrement équivalente

P_{le}^* : la pression limite nette équivalente

P_l^* : la pression limite équivalente

S_c : tassement sphérique

S_d : tassement déviatorique

q : contrainte verticale appliquée au sol par la fondation .

σ'_{v0} : contrainte verticale totale avant travaux; au niveau de la base de fondation

Liste des figures

Figure I.1 : Pressiomètre Menard.

Figure I.2 : Contrôleur de pression volume.

Figure I.3 : Schéma du principe de l'essai pressiométrique Ménard (1955).

Figure I.4 : Courbe pressiométrique (PFP) avec les différentes phases.

Figure I.5 : Courbe pressiométrique de fluage.

Figure I.6 : Courbe pressiométrique corrigée.

Figure I.7 : Outil désagrégateur à étage (Rieffsteck et al,2005).

Figure I.8: Comparaison des courbes pressiométrique (PFP et PAF).

Figure I.9 : Courbe pressiométrique - pressiomètre autoforeur.

Figure II.1 : Déformation d'un secteur circulaire de sol dans le plan horizontal.

Figure II.2 : Dérivation de la courbe de déformation à partir de la courbe d'expansion (D'après Baguelin et al, 1972)

Figure II.3 : Comportement théorique du sol au cisaillement.

Figure II.4 :Variation de volume théorique en variation de volume.

Figure II.5 : état de contraintes autour du pressiomètre le long du rayon avec une plasticité verticale (Monnet, Chema,1995).

Figure II.6 : état de contraintes autour du pressiomètre le long du rayon sans plasticité verticale (Monnet, Chema,1995).

Figure II.7 : transformation de la courbe pressiométrique pour un essai à 13,20 m dans une argile (Monnet et Chema, 1995).

Figure II.8: méthode de Carrère, Maurice CASSAN (1978).

Figure II.1 : Déformation d'un secteur circulaire de sol dans le plan horizontal.

Figure II.2 : Dérivation de la courbe de déformation à partir de la courbe d'expansion (D'après Baguelin et al, 1972).

Figure II.3 : Comportement théorique du sol au cisaillement.

Figure II.4 :Variation de volume théorique en variation de volume.

Figure II.5 : état de contraintes autour du pressiomètre le long du rayon avec une plasticité verticale (Monnet, Chema,1995).

Figure II.6 : état de contraintes autour du pressiomètre le long du rayon sans plasticité verticale (Monnet, Chema,1995).

Figure II.7 : transformation de la courbe pressiométrique pour un essai à 13,20 m dans une argile (Monnet et Chema ,1995).

Figure II.8: méthode de Carrère, Maurice CASSAN (1978).

Figure III.1 : Courbe d'étalonnage de l'essai pressiométrique.

Figure III.2: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 2 m.

Figure III.3: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 4m.

Figure III.4: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 6 m.

Figure III.5: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 8 m.

Figure III.6: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 10 m.

Figure III.7: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 15 m.

Figure III.8 : Profil des pressions limite.

Figure III.9 : Profil des pressions de fluage.

Figure III.10 : Profil des modules pressiométrique.

Figure III.11 : Courbe de dérivation de la courbe pressiométrique.

Tableau III.12 : profils des cohésions non drainée.

Figure IV.1 : Dimension de la grille à modéliser .

Figure IV.2 : Fenêtre d'introduction des paramètres du sol.

Figure IV.3 : Maillage et conditions aux limites.

Figure IV.4 : Introduction des conditions initiale k_0 .

Figure IV.5 : Chargement appliqué.

Figure IV.6 : Fenêtre de déroulement du calcul.

Figure IV.7 : Les courbes de simulations à 2m.

Figure IV.8 : Les courbes de simulations à 4m.

Figure IV.9 : Les courbes de simulations à 6m.

Figure IV.10 : Les courbes de simulations à 8m.

Figure IV.11: Les courbes de simulations à 10 m.

Figure IV.12: Les courbes de simulations à 12,5 m.

Figure IV.13 : Les courbes de simulations à 15 m.

Figure V.1: Facteur de portance pressiométrique pour les semelles carrées et circulaire.(issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG).

Figure V.2 : Présentation du model.

Figure V.3: Génération du maillage.

Figure V.4 : Valeur par défaut du module K_0 .

Figure V.5 : Génération des contraintes effectives initiales.

Figure V.6 : Evolution des déplacements dans le sol.

Figure V.7 : Les Déplacements verticaux.

Figure V.8 : Evolution des déplacements verticaux en fonction du chargement à différents niveaux.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Valeur de β suivant la nature du sol (Baguelin et al. 1978).

Tableau III.1: Nature du sol .

Tableau III.2 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 2 m de profondeur.

Tableau III. 3 : Les paramètres pressiométriques obtenue.

Tableau III.4 : valeur des cohésions non drainée.

Tableau IV.1 : Paramètres du sol pour chaque profondeur.

Tableau IV.2 : cohésion non drainée déterminer dans le chapitre (3).

Tableau V.1: valeurs des coefficients de portance k (issues du Fascicule 62 -Titre V du CCTG)

Tableau V.2 : Valeurs des contraintes déterminées(issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

Tableau V.2 :Les valeurs de E/PL pour chaque profondeur.

Tableau V.3 : Les valeurs des coefficients rhéologique α (issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

Tableau V.4: Les valeurs des coefficients de forme(issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

Tableau V.5 :Les valeurs des tassements calculer

Tableau V.6 : Paramètres C_u et E pour chaque couche du sol.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Principale notation

Liste des figures

Liste des tableaux

Sommaire

Introduction générale..... 1

CHAPITRE I : Présentation de l'essai pressiométrique

I.1 Introduction..... 3

I.2 Historique..... 3

I.3 Définition de l'essai..... 4

I.4 Les différents types du pressiomètre..... 4

I.4.1 Le pressiomètre avec forage préalable (Le pressiomètre Ménard)..... 4

I.4.1.1 L'appareil standard est constitué des éléments suivants..... 5

I.4.1.2 Principe de mesure..... 6

I.4.1.3 Interprétation des résultats de l'essai..... 7

I.4.1.4 Détermination du module pressiométrique Ménard EM 9

I.4.1.5 Détermination de la pression de fluage P_f 9

I.4.1.6 Détermination de la pression limite P_l 10

I.4.1.7 Courbe pressiométrique corrigée..... 10

I.4.2 Le pressiomètre autoforeur..... 11

I.4.3 Les pressiomètres forcés..... 15

I.4.4 Le pressiomètre de fluage de longue durée (DIFLUPRESS)..... 15

I.5 Conclusion..... 15

CHAPITRE II : Méthodes d'interprétations de l'essai pressiométrique

II.1 Introduction

II.2 Méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique

II.2.1 Méthodes empiriques

II.2.2 Méthodes théoriques

II.2.2.1 Méthode admettant une déformation sans variation de volume

II.2.2.2 Méthode admettant une déformation avec variation de volume

II.2.3 Méthodes numériques

II. 3 Conclusion

CHAPITRE III : Correction des courbes pressiométrique et interprétation des résultats

III.1 Introduction

III.2 Présentation des résultats des essais pressiométriques

III.2.1 Les courbes pressiométriques

III.2.2 Détermination des paramètres pressiométrique

III.3 Détermination de la cohésion non drainée

III.4 Conclusion

CHAPITRE IV : Modélisation de l'essai pressiométrique

IV.1 Introduction

IV.2 Présentation du logiciel PLAXIS

IV.3 Simulation numérique de l'essai pressiométrique

IV. 3.1 Conditions aux limites

IV. 3.2 Conditions initiales

IV.3.3 Procédures de simulation numérique

IV.4 Résultats et interprétations

IV.5 Conclusion

CHAPITRE V : Calcul de la capacité portante et les tassements d'un radier

V.1 Introduction

V.2 Calcul de la capacité portante à partir de l'essai pressiométrique

V.3 Calcul des tassements

V.4 Procédure de la simulation numérique de la fondation avec PLAXIS 2D

V.4.1 Caractéristiques géotechniques des matériaux

V.4.2. Conditions aux limites

V.4.3. Conditions initiales

V.4.4. Résultats et interprétation

V.5 Comparaison des résultats

V.6 Conclusion

Conclusion générale.....59

Référence bibliographique.

Introduction générale

La réalisation de tout type d'ouvrages quelque soit leurs envergures, requièrent au préalable une reconnaissance du sol en place, en réalisant soit des essais in situ, soit des essais de laboratoire ou les deux types d'essais.

La reconnaissance des sols avec les essais de laboratoire permet la détermination de nombreuses caractéristiques du sol. En raison des difficultés rencontrées lors du prélèvement des échantillons dans certains sols, et les problèmes de remaniement rencontrés lors du transport au laboratoire, ont conduit à utiliser les essais in situ afin de déterminer les propriétés mécaniques des sols.

Au-delà de ces paramètres, s'ajoute l'identification des paramètres de comportement qui se détermine principalement, par l'interprétation des essais in situ, en particulier l'essai pressiométrique. Il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place effectué grâce à une sonde cylindrique dilatable radialement introduite dans un forage.

L'avantage de l'essai pressiométrique se résume à sa facilité d'exécution et à la nature des résultats qu'il permet d'obtenir, qui sont à interpréter par rapport aux autres essais in situ.

L'exploitation des résultats de l'essai pressiométrique peut-être direct en utilisant les paramètres pressiométriques E et P_L dans le calcul des fondations ainsi que l'estimation des tassements, ou indirectement pour la détermination des paramètres intrinsèque du sol (C et ϕ), mais cela à travers des méthodes soit empirique, analytique ou numérique.

Ce travail a pour objet d'évaluer quelques paramètres de comportement, en particulier la cohésion non drainée à partir des quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique empirique et analytique ainsi que numériquement par le logiciel PLAXIS 2D.

Ce mémoire consiste aussi, à calculer la capacité portante d'une fondation superficielle et sa déformation verticale induite, ensuite une modélisation numérique de cette fondation a été effectuée avec le code de calcul d'élément fini PLAXIS 2D, ce qui a permis la détermination de la capacité portante et les tassements.

Ce travail comporte cinq chapitres :

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

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

Le troisième chapitre est une présentation des courbes expérimentales de l'essai pressiométrique réalisé, ainsi que l'exploitation des résultats obtenues.

Le quatrième chapitre consiste en la modélisation de l'essai pressiométrique avec le logiciel PLAXIS 2D, en introduisant les paramètres de comportement déjà déterminés .

Le cinquième chapitre a pour objet, d'une part le calcul de la capacité portante d'une fondation superficielle, et les tassements induits sous un chargement appliqué, d'une autre part la détermination de ces déplacements par simulation numérique avec le logiciel PLAXIS 2D.

Chapitre I

Présentation de l'essai pressiométrique

I.1 Introduction

La détermination des caractéristiques des sols nécessite la réalisation des essais. L'extraction des échantillons intacts du sol peuvent se faire parfois au sein du massif à l'aide de carottiers spéciaux. Cependant, il est impossible d'éviter certains remaniements, soit lors du prélèvement, soit lors du transport au laboratoire. Les difficultés rencontrées pour récupérer un échantillon intact dans certains sols ont conduit à utiliser les essais in situ.

Parmi ces essais in-situ ; l'essai pressiométrique qui suscite un intérêt particulier de la part des géotechniciens. Ses avantages se résument essentiellement à sa facilité d'exécution et à la nature des résultats qu'il permet d'obtenir. En général, il est exploité dans les règles de calcul des ouvrages.

L'objet de ce chapitre est de présenter brièvement l'histoire de l'essai pressiométrique, sa définition, les différents types de pressiomètre existant.

I.2 Historique

Les premières tentatives de réalisation d'essais d'expansion cylindrique dans les sols en place ont été réalisées par l'ingénieur allemand Kögler, vers les années 1930, qui a proposé un appareil composé de deux demi-coques cylindriques, pouvant s'écarter pour appliquer une contrainte sur la paroi du forage. La déformation du sol pouvait être connue à partir du déplacement des demi-coques, et une courbe contrainte-déformation était ainsi générée. Mais l'appareil n'était pas opérationnel et il a été immédiatement abandonné.

En 1955 un ingénieur français de l'École des Ponts et Chaussées, Louis Ménard, invente le pressiomètre. Il a repris l'idée, en perfectionnant le cylindre gonflable de Kögler, en ajoutant 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.

D'autres types de pressiomètre, avec des modes opératoires différents, ont vu le jour depuis, notamment les pressiomètres autoforés et les pressiomètres foncés. L'essai pressiométrique permet d'obtenir la réponse du sol à partir d'une courbe d'expansion donnant le volume injecté en fonction de la pression dans la sonde. Il faut noter que les résultats obtenus sont fortement dépendants du pressiomètre utilisé.

I.3 Définition de l'essai

L'essai pressiométrique est un essai de chargement in situ, réalisé à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable, laquelle est déposée au sein du terrain.

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.

I.4 Les différents types du 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).
- Le pressiomètre autoforeur (PAF).
- Le pressiomètre foncé (PMF).
- Le pressiomètre de fluage de longue durée « DIFLUPRESS ».

I.4.1 Le pressiomètre avec forage préalable (Le pressiomètre Ménard)

Les pressiomètres avec forage préalable sont installés dans une cavité légèrement surdimensionnée. Ces appareils peuvent être mis en œuvre dans tous les types des sols et les roches tendres. L'exemple de ce type d'appareil, est le pressiomètre de Louis Ménard, il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place, effectué grâce à une sonde cylindrique dilatable radialement introduite dans un forage. L'essai permet d'obtenir une courbe de variation volumétrique du sol en fonction de la contrainte appliquée, et de définir une relation contrainte-déformation du sol en place.

Les résultats de l'essai sont représentés par la courbe $P = f(v)$ figure (I.5). De cette courbe on détermine trois paramètres :

- Le module de déformation du sol (module pressiométrique Ménard) E_M .
- La pression de fluage P_f .

- La pression limite P_L .



Figure I.1 : Pressiomètre Menard.

I.4.1.1 Les éléments constituant l'appareil standard

Le C.P.V (Le Contrôleur pression-volume) est un appareillage de mesure placé en surface du sol, permettant de régler avec précision la pression dans la sonde, et de mesurer la variation correspondante de volume de celle-ci.

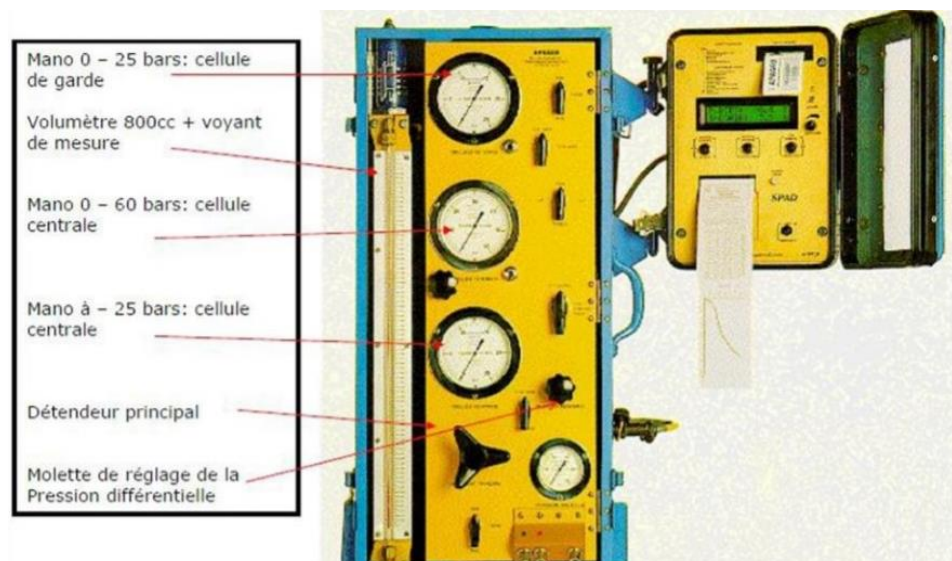


Figure I.2 : Contrôleur de pression volume.

La sonde pressiométrique est introduite dans une cavité pré-forée, légèrement surdimensionnée, réalisée soit à la tarière à main, soit de manière mécanique suivant la nature du sol. Elle comporte trois cellules :

➤ **Une cellule de mesure centrale**

Elle est 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. 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. L'une sert au passage de l'eau, l'autre sert au passage du gaz.

1.4.1.2 Principe de mesure

Tous les organes de mise en pression et de régulation sont pneumatiques. Les déformations du sol sont mesurées à partir du volume d'eau injecté dans la cellule centrale qui est lue sur un tube indicateur en fonction du temps pour des paliers de pression croissants de 1 minute.

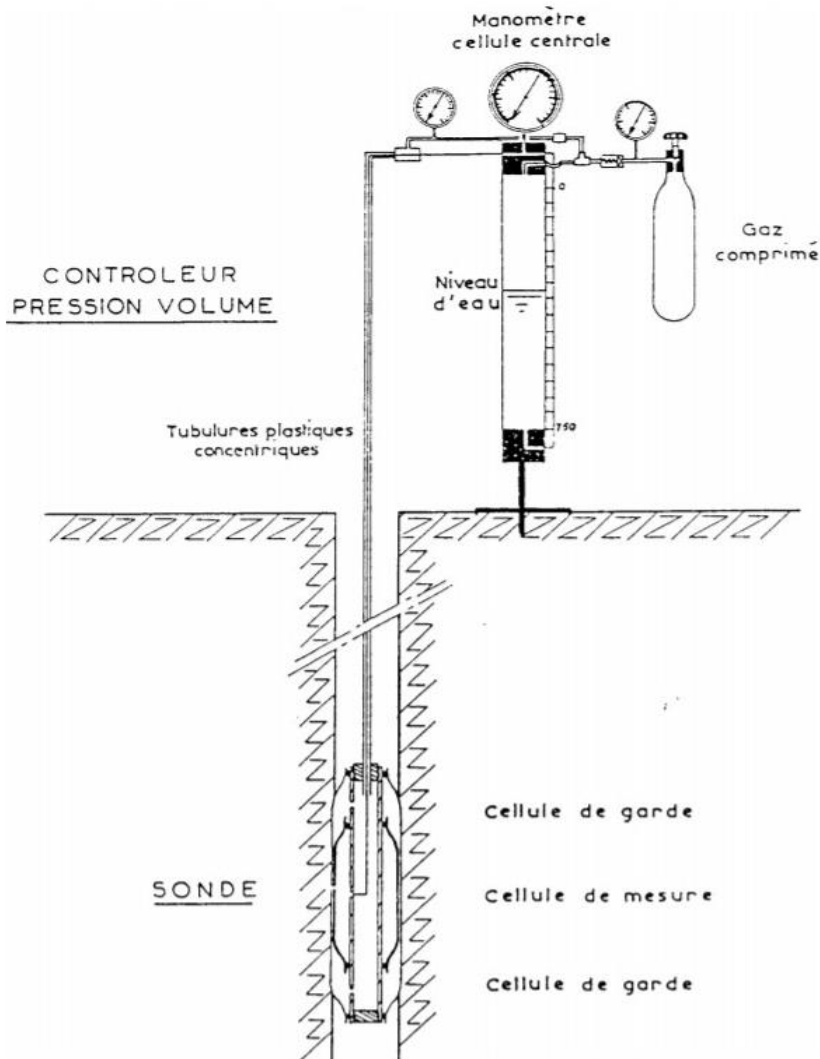


Figure I.3 : Schéma du principe de l'essai pressiométrique Ménard (1955).

1.4.1.3 Interprétation des résultats de l'essai

A l'aide de ces dispositifs, l'essai est réalisé à pression contrôlée et le chargement s'effectue de façon normalisée en dix paliers de pression, croissant en progression arithmétique. La variation de volume de la sonde est notée toutes les 15 secondes, 30 secondes et 1 minute après la fin de la mise en pression. L'essai est mené jusqu'à l'obtention d'une variation de volume de la sonde égale au volume initial.

Les résultats sont représentés par la courbe pression volume $\Delta V=f(P)$ dont l'allure est représentée sur la figure (I.4).

Elle est composée de trois parties :

- **La phase de recompactage** du sol autour de la sonde pressiométrique ($0 \leq P \leq P_0$; $0 \leq V \leq V_0$).

P_0 , la pression lue sur la courbe pressiométrique qui correspond au volume V_0 comme le début de la partie linéaire sur cette courbe.

Théoriquement P_0 est la pression horizontale totale des terres au repos. Ce recomptage permet de retrouver des conditions de contraintes analogues à celles existant avant la mise en place du forage.

- **La phase pseudo-élastique** du matériau ($P_0 \leq P \leq P_f$; $V_0 \leq V \leq V_f$).

P_f est la pression de fluage, elle limite de domaine "pseudo-élastique" du domaine des grandes déformations. Cette partie de la courbe permet de définir le module pressiométrique Ménard E_P donné par l'expression (I -1)

- **La phase des grandes déformations** ($P_f \leq P$; $V_f \leq V$).

Cette phase présente en général une asymptote verticale et qui caractérise la rupture du sol. La pression limite obtenue est notée p_l par convention cette pression correspond au doublement du volume initial de la sonde ($V_1=2V_0$).

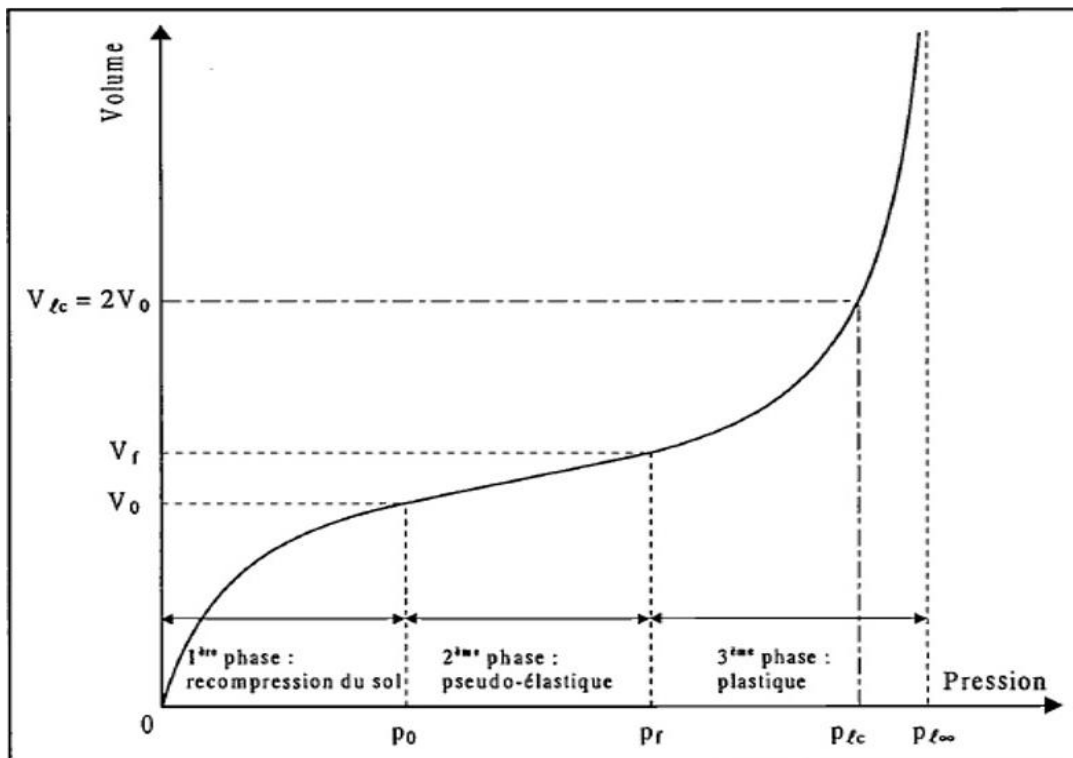


Figure I.4 : Courbe pressiométrique (PFP) avec les différentes phases.

1.4.1.4 Détermination du module pressiométrique Ménard E_M

Le module pressiométrique E_M est déterminé à partir de la pente de la droite pseudo-élastique, il est calculé selon la relation [I. 1]:

$$EP = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right) \quad [I. 1]$$

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.

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right)$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

1.4.1.5 Détermination de la pression de fluage P_f

D'après Cassan (1978) la pression de fluage est la limite supérieure de la phase élastique. C'est aussi la pression pour laquelle les déformations différées du sol deviennent importantes par rapport aux déformations immédiates. Elle s'évalue soit à partir de la courbe pressiométrique, soit à partir de la courbe de fluage.

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

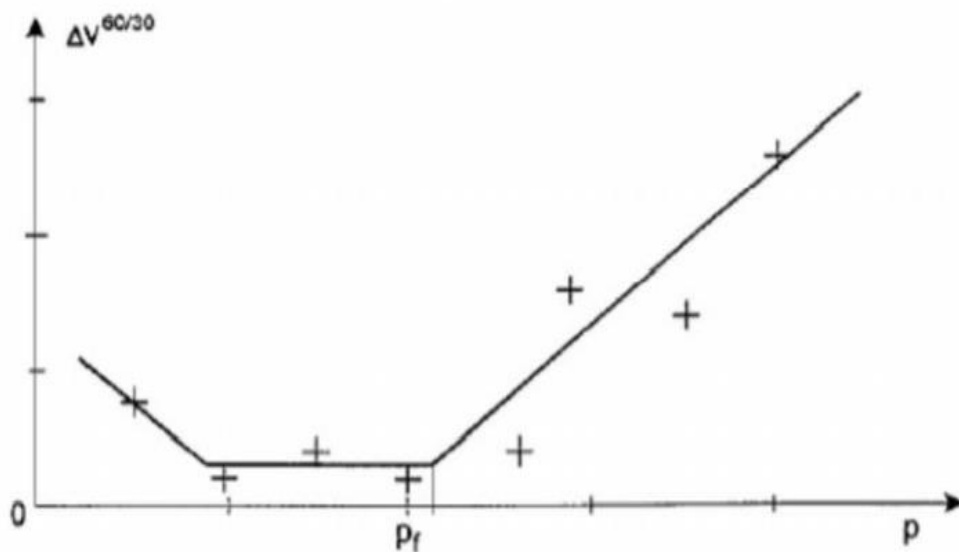


Figure I.5 : Courbe pressiométrique de fluage.

1.4.1.6 Détermination de la pression limite P_l

La pression limite théorique correspond à la pression pour laquelle la sonde arrive à un volume infini, c'est-à-dire la pression appliquée sur les parois du forage par la sonde dépasse la pression de fluage P_f , le sol entre en plastification. Dans la pratique, cette pression est difficile à atteindre, et par convention, la pression limite est la pression qui entraîne le doublement de la cellule centrale de mesure après la pression P_0 . Elle correspond à un volume injecté.

$$V_L = V_s + 2V_0 \quad [I. 2]$$

1.4.1.7 Courbe pressiométrique corrigée

Les valeurs de pression P_m lues au manomètre et de volume V lues au CPV sont corrigées et permettent de tracer la courbe pressiométrique corrigée (Figure I.6)

➤ Correction des pressions

La pression réelle P appliquée par la cellule centrale au sol est égale à :

$$P = P_m - P_i + \gamma_w(Z + h) \quad [I. 3]$$

Avec :

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_r .

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

h : la hauteur hydrostatique.

γ_w : Poids volumique de l'eau.

➤ Correction de volumes

Le volume corrigée est donné par l'équation suivante :

$$V = V_r - a P_m \quad [I. 4]$$

$$a = \frac{\Delta V}{\Delta P} \quad [I. 5]$$

Avec :

V_r : le volume lue sur le CPV.

V : volume corrigé.

a : Coefficient de compressibilité.

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.

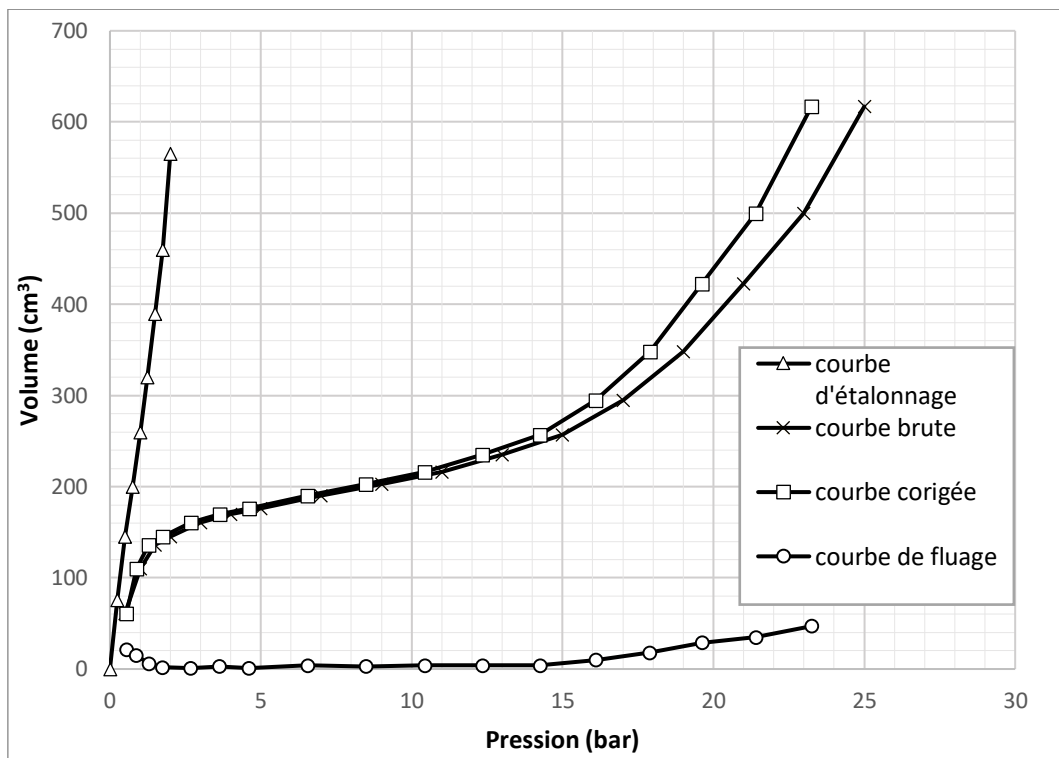


Figure I.6 : Courbe pressiométrique corrigée.

I.4.2 Le pressiomètre autoforeur

Les premiers pressiomètre autoforeur (PAF), ont été développés indépendamment au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) en 1972 (Baguelin et al. 1972 ; Baguelin et al, 1978) et l'université de Cambridge en 1973 (Worth et Hugues, 1973 ; Hugues et al., 1977). Le but de ces appareils est de s'affranchir des problèmes liés au préforage.

Cet appareil est construit pour réaliser son propre forage et par conséquent pour remanier le moins possible le sol. Pour cela une trousse coupante est installée à la base de l'appareille et coupe le sol au diamètre juste nécessaire au passage du pressiomètre.

Un outil désagrégateur détruit la structure du sol et un liquide d'injection emmène le liquide de marinage (boue de forage et sol désagrégé) jusqu'à la surface (Figure I.7).

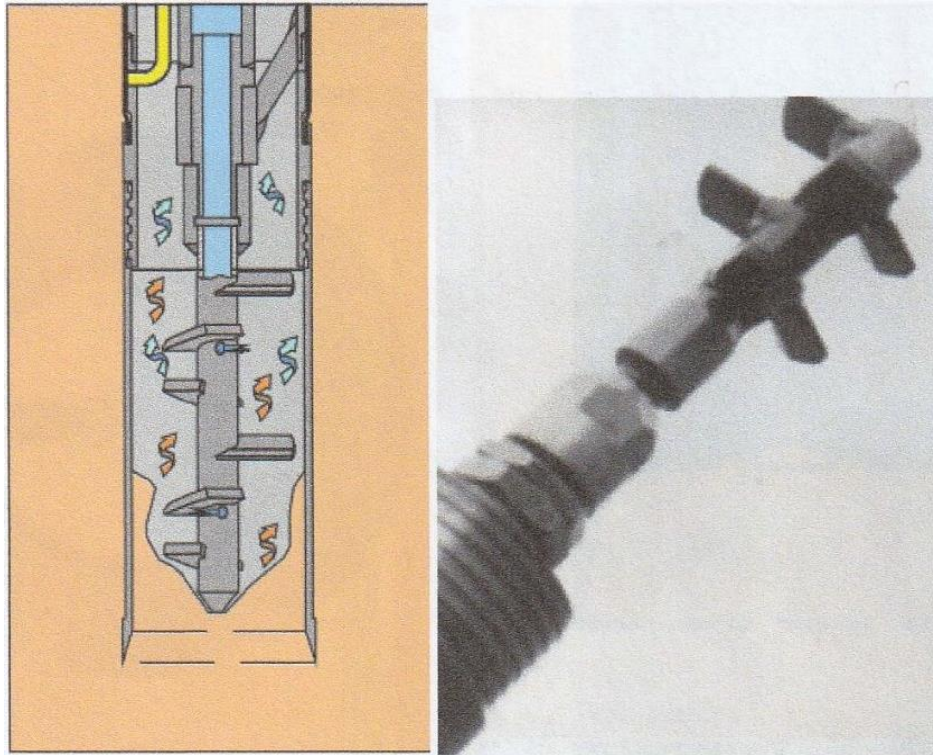


Figure I.7 : Outil désagrégateur à étage (Rieffsteck et al,2005).

Les résultats de l'essai donnent la courbe pressiométrique représentée sur la (figure I.8). Sur cette courbe seules les phases pseudo-élastiques et de grandes déformations apparaissent. La concavité de la courbe est monotone.

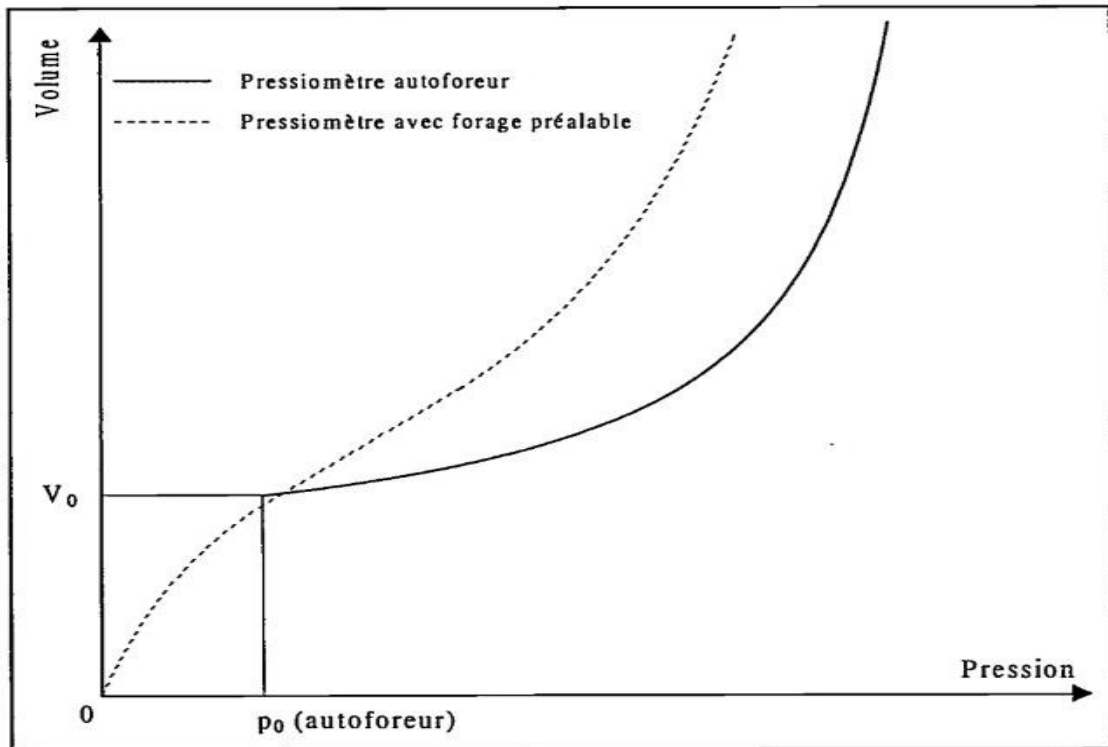


Figure I.8: Comparaison des courbes pressiométrique (PFP et PAF).

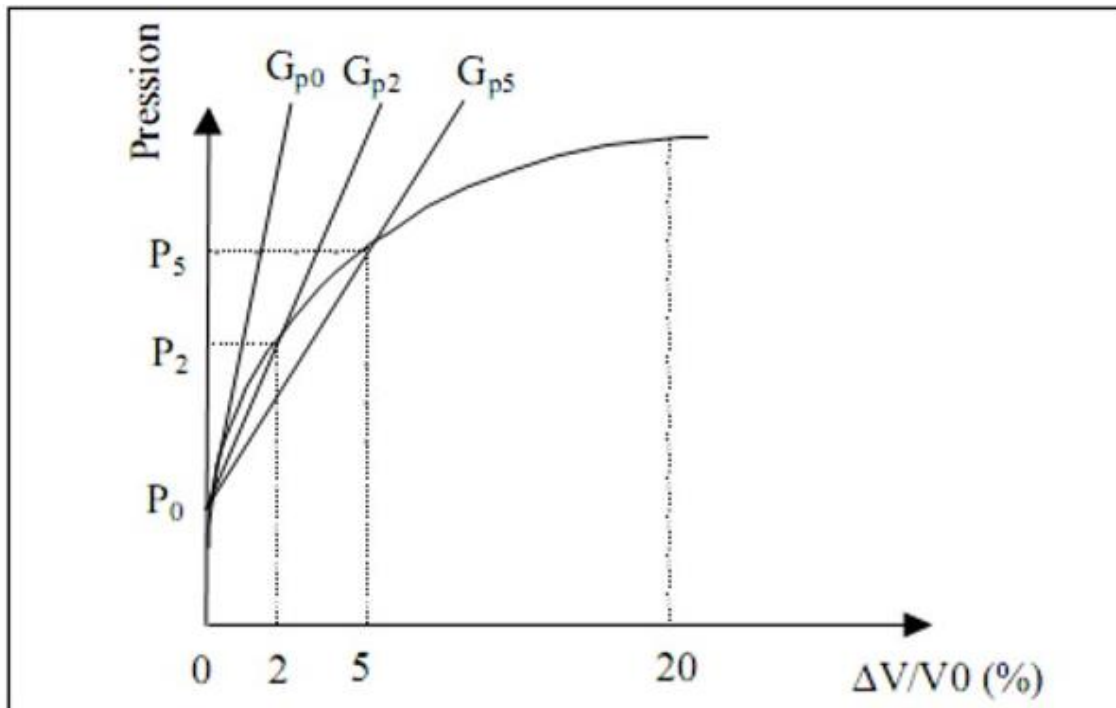


Figure I.9 : Courbe pressiométrique - pressiomètre autoforeur.

Pour une utilisation pratique de la courbe pressiomètre (PAF) Baguelin et al. (1978), ont été amenés à définir plusieurs modules :

G_{p0} : module initial tangent.

G_{p2} et G_{p5} : deux modules de cisaillement sécants 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 de Lamé :

$$E = 2(1 + \nu)G \quad [I. 6]$$

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

Le coefficient d'identification caractérisant le type de sol est défini en fonction des pressions P_0 , P_5 et P_{20} par la relation suivante.

$$\beta = \frac{P_{20} - P_5}{P_{20} - P_0} \quad [I. 7]$$

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 (1978) donnent la classification présentée sur le tableau suivant :

Tableau I.1 : Valeur de β suivant la nature du sol (Baguelin et al. 1978).

	Argiles sensibles	Argiles	Sables compressibles	Sables dilatants	Sables très dilatants
$\beta\%$	< 25	[25,40]	[35,50]	[25,40]	> 60

I.4.3 Les pressiomètres foncés

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

I.4.4 Le pressiomètre de fluage de longue durée (DIFLUPRESS)

Le Diflupress L.D, Dispositif de Fluage au Pressiomètre Longue Durée, a été développé par EDF (électricité de France) dans le but d'étudier les tassements à très long terme des fondations des centrales nucléaires (Leidwanger C, 1993).

Cet appareil est conçu sur le même principe que le pressiomètre classique. 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 pendant un temps très long pouvant aller jusqu'à plusieurs semaines tandis que, la charge est appliquée en moyenne pendant une minute, pour l'essai pressiométrique.

Le système de mise en pression de la sonde est de type "Dashpot" : 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.5 Conclusion

L'essai pressiométrique actuellement est devenu très répandu, car il est facile à utiliser et permet de donner une relation contrainte-déformation. L'apport de Louis Menard se base non seulement sur le plan technique mais aussi sur le plan d'exploitation et interprétation des résultats de l'essai.

L'appareil a connu des progrès considérables depuis son invention, mais le grand mérite revient à L. Menard.

Les résultats pressiométriques permettent la détermination de E_P et P_L (PFP) et G_{p0} , G_{p2} et G_{p5} (PAF), ces paramètres sont utilisés dans le calcul des fondations, et la détermination des paramètres du sol, cela se fait à travers des méthodes d'interprétation.

Chapitre II
Méthodes d'interprétation de l'essai
pressiométrique

II.1 Introduction

L'avantage de l'essai pressiométrique se résume essentiellement à sa facilité d'utilisation, Il permet d'étudier la phase des petits déplacements du sol en déterminant le module pressiométrique, et celle des grands déplacements en déduisant la pression limite.

Afin d'identifier ces paramètres, des chercheurs ont mis en œuvre de nombreuses méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique pour exploiter les résultats de cet essai.

Dans cette partie, On présente en premier les méthodes empiriques qui consiste à déterminer directement les paramètres de dimensionnement et les paramètres du sol. En deuxième lieu les des méthodes théoriques, où on distingue les méthodes admettant une déformation sans variation de volume, et celle admettant une variation de volume dans la phase plastique. A la fin on présente quelques méthodes numériques proposé par différents chercheurs.

II.2 Méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique

Les différentes méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique peuvent être séparées en trois catégories : les méthodes empiriques, les méthodes analytiques et les méthodes numériques.

II.2.1 Méthodes empiriques

Plusieurs auteurs ont proposé des règles empiriques en s'appuyant sur des études expérimentales menée, essentiellement, sur des argiles. On peut citer principalement les travaux de Menard (1957), Amar et Jézéquel (1972).

Ces méthodes permettent d'estimer la valeur de la cohésion non drainée C_u à partir de la pression limite P_l .

La relation proposée par Menard est :

$$C_u = \frac{P_L - P_0}{5,5} \quad [\text{II. 1}]$$

La relation proposée par Amar et Jézéquel est :

$$C_u = (P_l - P_0)/10 + 25 \text{ (Kpa)} \quad [\text{II. 2}]$$

Pour $(P_l - P_0) > 350 \text{ Kpa}$

Avec :

P_l : pression limite pressiométrique.

P_0 : pression horizontale des terres au repos.

C_u : cohésion non drainée.

Pour d'autres problèmes comme le soutènement, Menard proposa des estimations de l'angle de frottement φ mais à partir de la pression limite.

II.2.2 Méthodes théoriques

Les méthodes théoriques sont principalement basées sur un calcul analytique de type élastoplastique de l'expansion d'une cavité cylindrique en milieu infini élasto-plastique.

On distingue des méthodes ; celles prenant en compte une déformation sans variation de volume dans la phase plastique (Gibson et Anderson 1961 ; Baguelin et Al 1972 ; Monnet 1995) et celles prenant en compte une déformation avec variation de volume (Salençon, 1966).

II.2.2.1 Méthode admettant une déformation sans variation de volume

➤ 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 Tresca. L'analyse proposée aboutit à une relation exprimant la pression limite P_l en fonction de la cohésion non drainée C_u .

$$P_l = P_0 + C_u (1 + \ln I_r) \quad [\text{II. 3}]$$

$$I_r = \frac{G}{C_u} \quad [\text{II. 4}]$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad [\text{II. 5}]$$

Avec :

I_r : indice de rigidité.

G : module de cisaillement.

E : module de Young.

ν : coefficient de poisson.

P_0 : pression des terres au repos.

➤ **Méthode de Baguelin et Al 1972**

Baguelin et Al proposent une méthode d'interprétation de l'essai pressiométrique dans un sol avec un comportement non drainé, le sol supposé ne subir aucune variation de volume.

Cette méthode repose sur le principe de dérivation de la courbe pressiométrique en utilisant les grandes déformations.

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad [\text{II. 6}]$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad [\text{II. 7}]$$

Avec :

ε_r : déformation radiale.

ε_θ : déformation circonférentielle.

u : déplacement radial au point de rayon r .

Les auteurs ont pris en considération l'étude d'équilibre d'une portion de sol limité par les rayons r_0 et r avant déformations et par les rayons ρ_0 et ρ après déformation Figure (II.1)

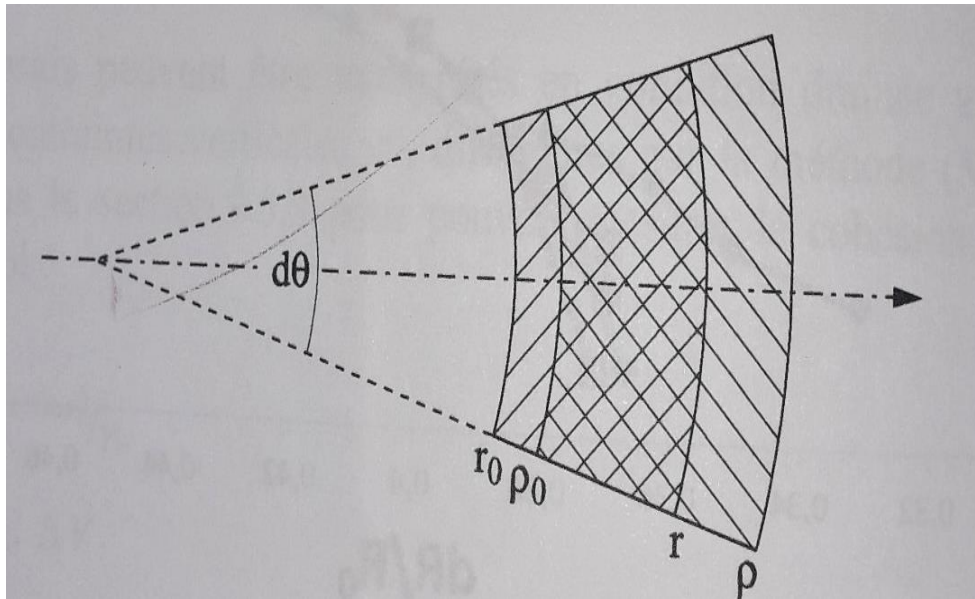


Figure II.1 : Déformation d'un secteur circulaire de sol dans le plan horizontal.

$$\rho_0 = r_0 + u_0 \quad [\text{II. 8}]$$

$$\rho = r + u \quad [\text{II. 9}]$$

Baguelin et al proposent l'expression suivante qui permet d'approximer la courbe pressiométrique par la formule analytique suivante :

$$P = P_0 + \frac{1}{2b} a [\log(1 + \varepsilon_0^2) + 2\text{Arctg}\varepsilon_0] \quad [\text{II. 10}]$$

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

ε_0 est connue en fonction du déplacement de la parois u_{r_0} et du rayon r_0

Après dérivation de l'équation [II. 10] on obtient :

$$\tau = \frac{1}{b} \frac{a\varepsilon_0^2 + \varepsilon_0}{\varepsilon_0^2 + 1} (1 + \varepsilon_0) \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{2}\right) \quad [\text{II. 11}]$$

Ou en petites déformations :

$$\tau = \frac{1}{b} \frac{a\varepsilon_0^2 + \varepsilon_0}{\varepsilon_0^2 + 1} \quad [\text{II. 12}]$$

- La partie plastique du comportement est liée à la cohésion non drainée C_u . L'écoulement plastique standard utilise le scalaire ξ (qui définit la longueur de la déformation plastique standard) :

$$d\varepsilon^p = \xi \frac{dF(\sigma)}{d\sigma} \quad [\text{II. 15}]$$

- L'équilibre limite est atteint quand le critère de Mohr-Coulomb s'annule [I. 34] :

$$F(\sigma) = (\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin\varphi - 2C \cos\varphi = 0 \quad [\text{II. 16}]$$

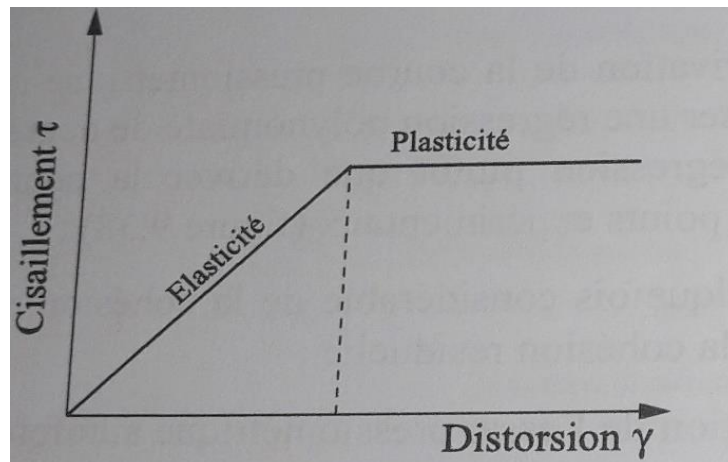


Figure II.3 : Comportement théorique du sol au cisaillement.

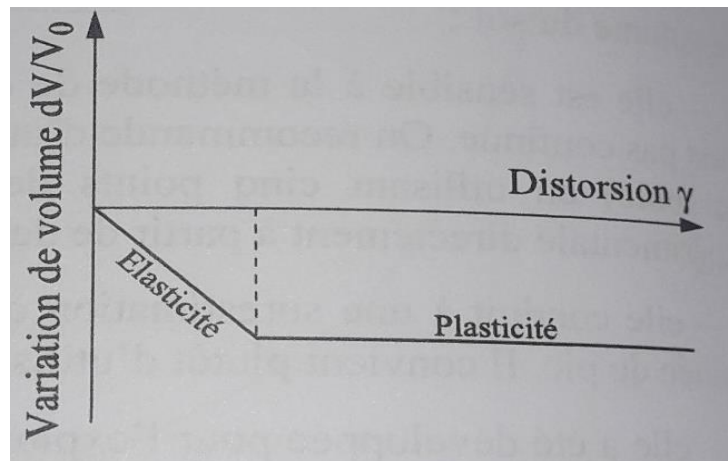


Figure II.4 : Variation de volume théorique en variation de volume.

D'après la théorie de Monnet et Chemaï (1995), trois zones différentes de sol sont prises en considération en partant de l'axe du forage, figures (II.5) et (II.6).

- Une première zone plastique qui est limitée par le rayon a du forage et b (rayon externe de la première zone plastique).

- une seconde zone plastique se développe entre la contrainte verticale et la contrainte circonférentielle.
- Une zone élastique qui se développe au-delà du rayon c.

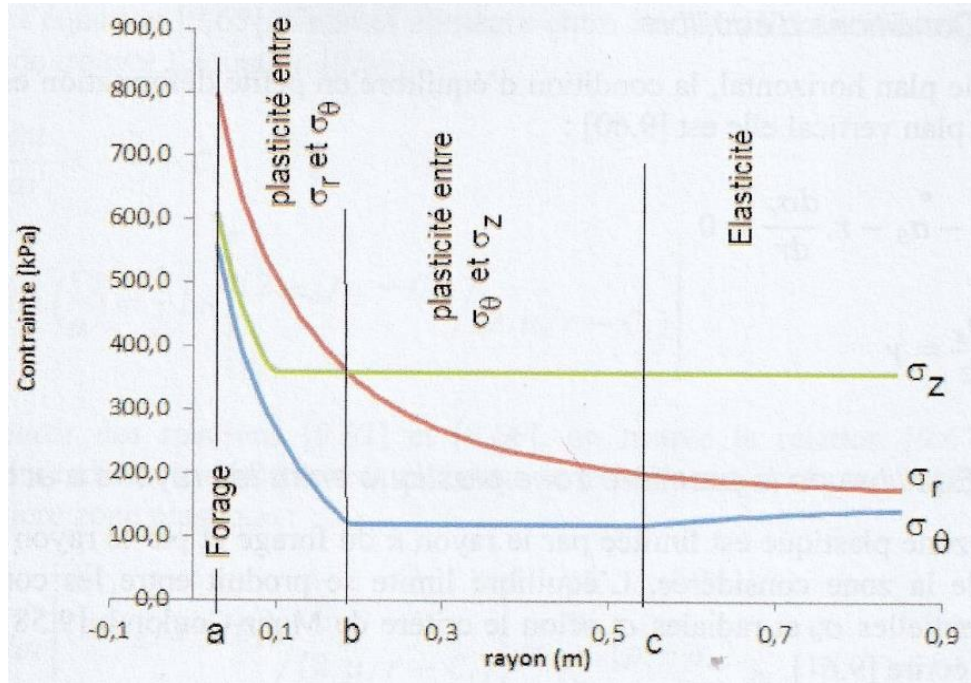


Figure II.5 : état de contraintes autour du pressiomètre le long du rayon avec une plasticité verticale (Monnet, Chema,1995).

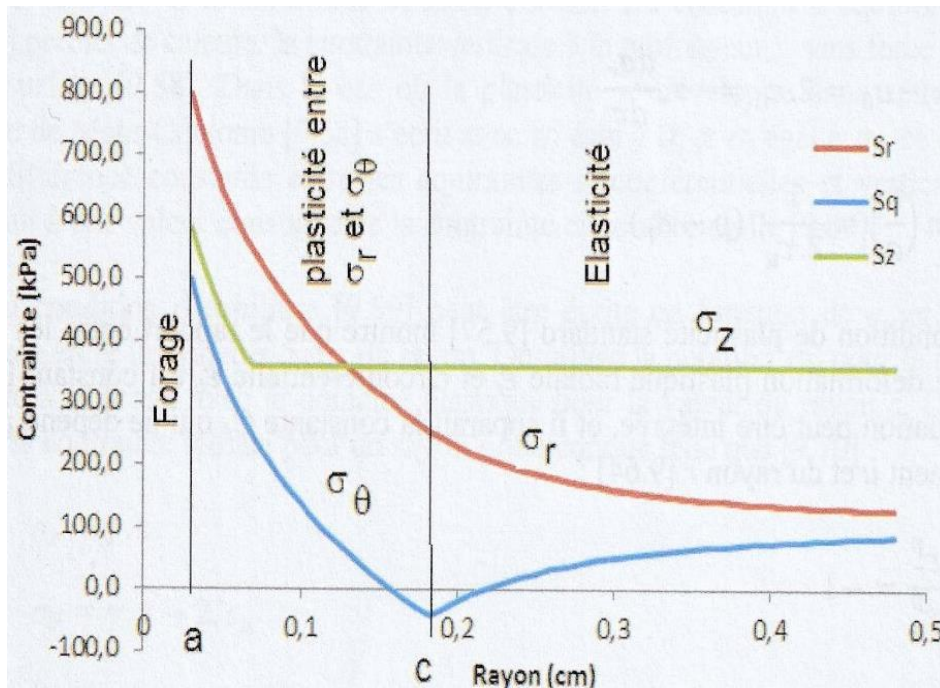


Figure II.6 : état de contraintes autour du pressiomètre le long du rayon sans plasticité verticale (Monnet, Chema,1995).

❖ **Détermination de la pression de fluage pf**

- Dans le cas de deux zones plastiques : un écoulement plastique se produit entre les axes verticaux et circonférentielles. Figure (II.5).

$$P_f = \sigma_{rc} = 2C_u + \gamma z(2k_0 - 1) \quad [\text{II. 17}]$$

- Dans le cas d'une seule zone plastique : dans cette catégorie il suscite qu'une seule zone de rayon r .

$$P_f = \sigma_{rc} = C_u + k_0 \cdot \gamma \cdot z \quad [\text{II. 18}]$$

❖ **Détermination de la pression limite pl**

- Dans le cas de deux zones plastique :

La pression limite conventionnelle est atteinte lorsque la sonde double de volume. L'expression analytique de la pression limite conventionnelle est déterminer par l'équation [II. 19] :

$$P_{LM} = \gamma z + C_u \ln \left[\frac{C_u + 2\mu(\sqrt{2-1})}{C_u + \gamma z(1 - k_0)} \right] \quad [\text{II. 19}]$$

- Dans le cas d'une seule zone plastique :

La pression limite est proportionnelle à la cohésion non drainée.

$$P_{LM} = k_0 \cdot \gamma \cdot z + C_u \left\{ 1 + \ln \left[\frac{E(\sqrt{2-1})}{C_u(1 + \nu)} \right] \right\} \quad [\text{II. 20}]$$

❖ **Mesure de la cohésion non drainée**

La détermination de la cohésion non drainée se fait par la transformation semi logarithmique de la courbe pressiométrique (figure II.7). La mesure de la pente de la droite donne l'inverse de la cohésion C_u .

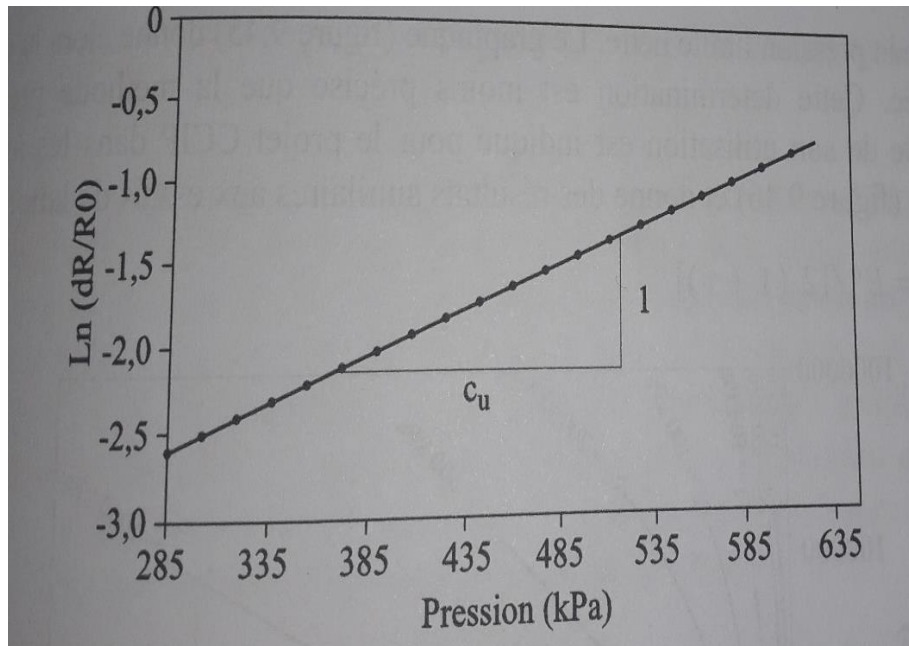


Figure II.7 : transformation de la courbe pressiométrique pour un essai à 13,20 m dans une argile (Monnet et Chemaa ,1995).

➤ **Méthode de Carrère**

Carrère 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 :

- Un coefficient de compressibilité K défini de la manière suivante

$$K = \frac{\text{variation de volume}}{\text{volume initiale}} \quad [\text{II. 21}]$$

- 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.

Carrère propose alors, pour un matériau pulvérulent l'expression suivante de la courbe pressiométrique.

$$P_L = (1 + \sin\varphi) P_0 \left[\frac{(1 - K)P_0}{\mu} + K \left[\frac{P_{mc}}{P_0} \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{-a} \quad [\text{II. 22}]$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad [\text{II. 23}]$$

$$a = \frac{\sin\varphi}{(1 + \sin\varphi)} \quad [\text{II. 24}]$$

- Terrain incompressible (K=0), Carrère propose la relation suivante :

$$P_L = P_0 + C_u \left[1 - \text{Log} \left[\frac{(1 - K)C_u}{\mu} + K e^{-\left[\frac{q_{me} - P_0}{C_u} \right]} \right] \right] \quad [\text{II. 25}]$$

- Terrain compressible (K=1), l'expression de PL devient :

$$P = P_m - C_u \quad [\text{II. 26}]$$

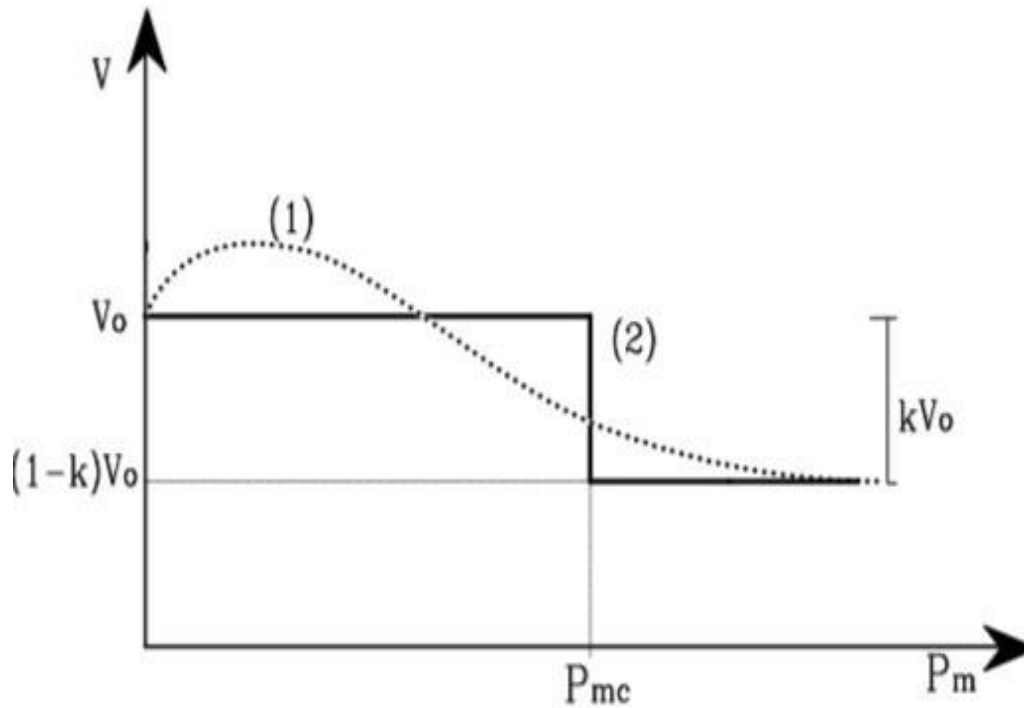


Figure II.8: méthode de Carrère, Maurice CASSAN (1978).

II.2.3 Méthodes numériques

L'évolution des lois de comportement du sol ainsi que le développement des méthodes numériques et de l'outil informatique ont poussé les chercheurs à s'orienter vers la modélisation numérique de l'essai pressiométrique. On donne, ci-après, une synthèse des travaux réalisés dans ce domaine.

- Un logiciel d'identification de paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique a été développé et a été appliqué à différents modèles (Cambou et Boubanga, 1989 ; Cambou et al. 1990 ; Cambou et Bahar, 1993).
- De la même manière, Michali et Hicher (1994) utilisent les résultats d'essais pressiométriques et de laboratoire pour déterminer les paramètres d'une loi élastoplastique (Hujeux).
- Zanier (1985) a utilisé le modèle cyclique "CYCLADE" implanté dans un programme de simulation par éléments finis. Il a par ailleurs utilisé le modèle de Von-Mises pour étudier l'influence des dimensions de la sonde pressiométrique sur la pression limite.
- Fawaz (1993) a utilisé le logiciel de simulation PLAXIS. Il a validé son étude sur des essais pressiométriques réalisés en chambre de calibration. L'analyse de ces résultats a conduit l'auteur à conclure que l'utilisation d'une sonde pressiométrique d'éclatement fini ($L/D=5$) et le raisonnement avec l'hypothèse de déformation plane sous-estiment le déplacement au milieu de la membrane pressiométrique d'environ 20%. Il montre que le champ de déplacement autour de la sonde n'est pas cylindrique et la membrane prend la forme d'un tonneau.
- 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 modifié) à partir de résultats d'essais pressiométriques. Le processus d'identification utilisé met à contribution deux outils numériques : le code de calcul aux éléments finis CESAR_LCPC (Laboratoire Central des Ponts et chaussées) pour simuler l'essai et le logiciel d'optimisation SiDOLO pour identifier les paramètres.

II.2.4 Conclusion

L'essai pressiométrique est un essai de chargement de la paroi du forage jusqu'à la rupture. Cet essai pressiométrique est, en général, le seul essai qui permet de fournir une courbe effort déformation à différentes profondeurs et donc de donner ainsi des paramètres essentiels d'un matériau en place.

Les paramètres pressiométriques obtenus ont pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques du sol (cohésion non drainée) en utilisant des méthodes empiriques, des méthodes théoriques ou des méthodes numériques.

Dans ce qui suit, on présente les résultats de différents essais pressiométriques pour identifier les paramètres pressiométriques E_p , P_1 et P_f , ainsi on déduit la cohésion non drainée à partir de quelques méthodes d'interprétation citées ci-dessus.

Chapitre III
Interprétation des courbes pressiométrique

III.1 Introduction

Les résultats expérimentaux enregistré par le pressiomètre se traduise pour une profondeur z donnée, par des courbes pressiométriques bruts $v=f(p)$, certes il est impossible de déterminer les paramètres pressiométrique (E_m , P_l et P_f). Ces courbes bruts doivent subir des corrections d'inertie, des corrections de pressions et de volumes.

On présente dans cette partie les résultats d'une série d'essai pressiométrique qui ont été effectuer dans la wilaya de Tipaza, on procède ensuite à des corrections des courbes bruts pour déterminer les valeurs du module pressiométrique E_m , les valeurs des pressions limite P_l et des pressions de fluage P_f , ces paramètres sont ensuite présentés sur un profil en fonction de la profondeur.

III.2 Présentation des résultats des essais pressiométriques

La Détermination des paramètres pressiométrique est basé sur des résultats des essais pressiométriques réalisés sur un terrain sur lequel sera réaliser un réservoir de 30000m^3 a Mahelma dans la wilaya de Tipaza. Ces résultats ont été fourni par le laboratoire de travaux publics et de la construction de la wilaya de Bouira << LTPC LARBI >>.

Les premières observations des essais, montre le profil suivant (tableau III.1).

Tableau III.1: Nature du sol .

Profondeur (m)	Nature Lithologique
00 - 2,5	Argile limoneuse brunâtre compacte
2,5 - 7,0	Argile limono-sableuse rougeâtre compacte avec des passages gréseux centimétriques
7,0 - 8,0	Sables fin consolidé par endroit, avec un passage alluvionnaire métrique (graves, alluvions...)
8,0 - 15,0	Marne argileuse limoneuse compacte

III.2.1 Les courbes pressiométriques

Les résultats des essais pressiométriques obtenues sont bruts et nécessite des corrections.

Ces corrections concernent la hauteur piézométriques et l'inertie (donnée dans le chapitre I par la relation [I.3]). Pour effectuer ces corrections, un essai d'étalonnage de la membrane est réalisé, les résultats sont montrés par la courbe (Figure III.1).

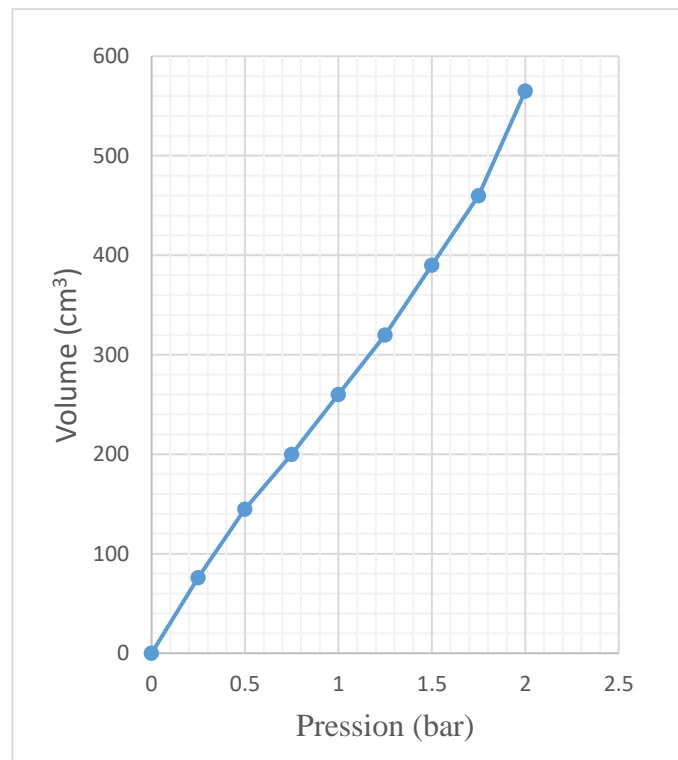


Figure III.1 : Courbe d'étalonnage de l'essai pressiométrique

Les corrections effectuées permettent de tracer la courbe pressiométrique corrigée. Ces corrections concernent le site sur des profondeurs de 2 m, 4 m, 6 m, 8 m, 10 m, 12,5 m et 15 m, un exemple est montré sur le tableau (III.1) ainsi que toutes les courbes correspondant aux différentes profondeurs.

Tableau III.2 : Résultats de l'essai pressiométrique et correction à 2 m de profondeur

Pm	P	Pi	Σw (Z+h)	Volume à 30s	Volume à 60s	Volume de fluage
0,5	0,55	0,2	0,25	40	61	21
1	0,88	0,37	0,25	95	110	15
1,5	1,285	0,465	0,25	130	136	6
2	1,75	0,5	0,25	143	145	2
3	2,675	0,575	0,25	160	161	1
4	3,635	0,615	0,25	167	170	3
5	4,61	0,64	0,25	175	176	1
7	6,55	0,7	0,25	186	190	4
9	8,485	0,765	0,25	200	203	3
11	10,435	0,815	0,25	212	216	4
13	12,35	0,9	0,25	231	235	4
15	14,26	0,99	0,25	253	257	4
17	16,1	1,15	0,25	285	295	10
19	17,895	1,355	0,25	330	348	18
21	19,625	1,625	0,25	394	423	29
23	21,41	1,84	0,25	465	500	35
25	23,25	2	0,25	570	617	47

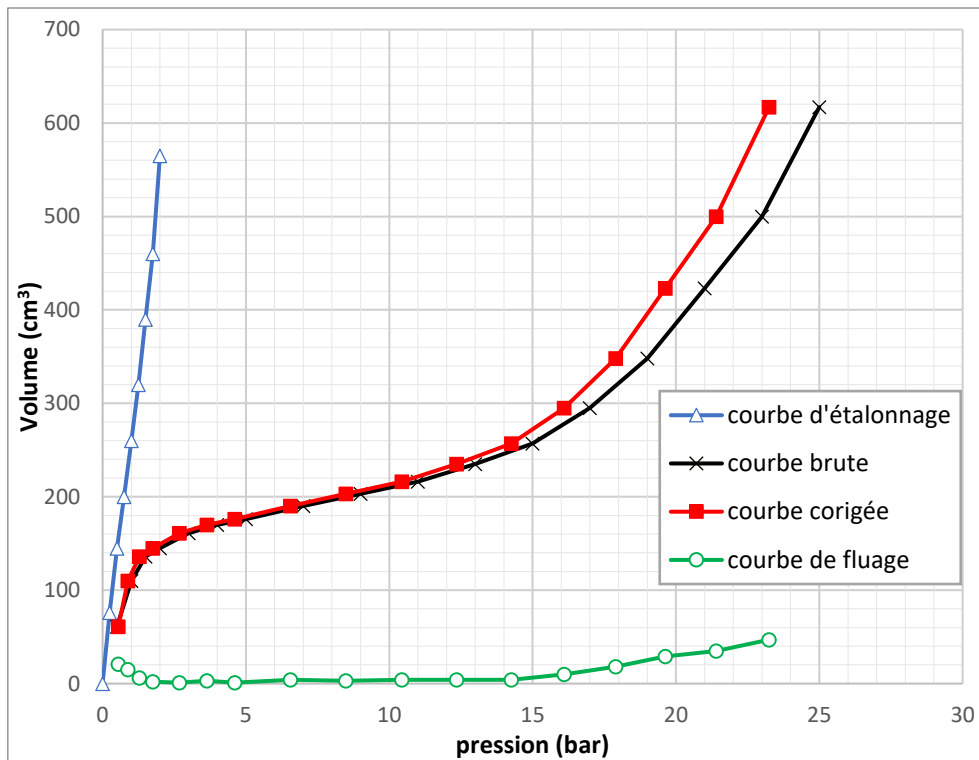


Figure III.2: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 2 m.

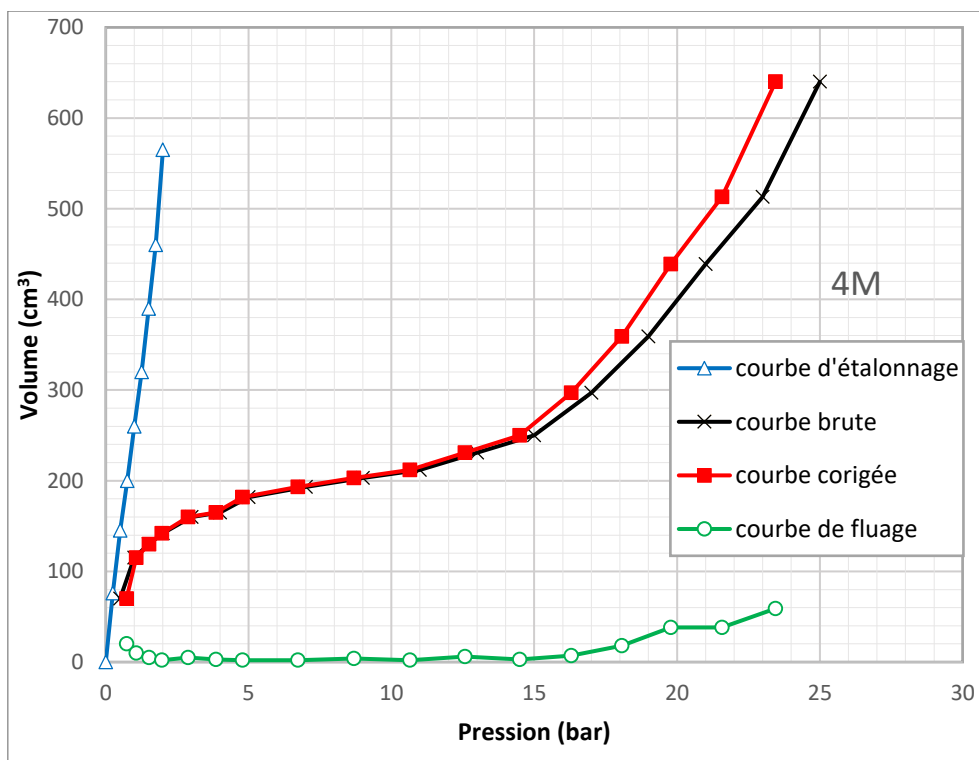


Figure III.3: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 4m.

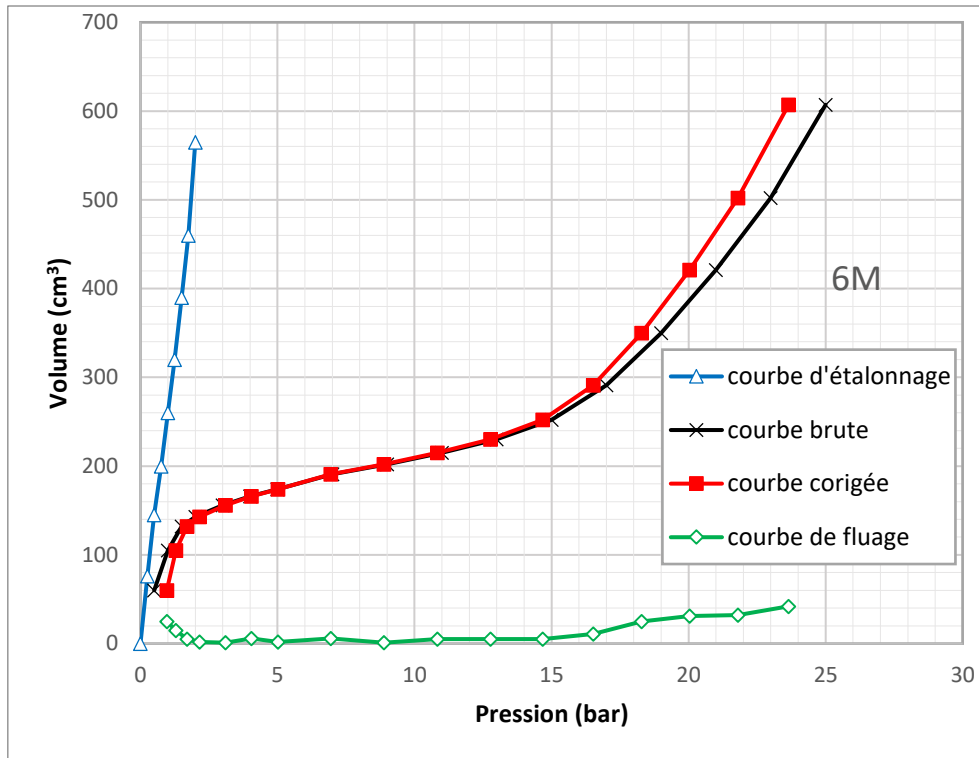


Figure III.4: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 6 m.

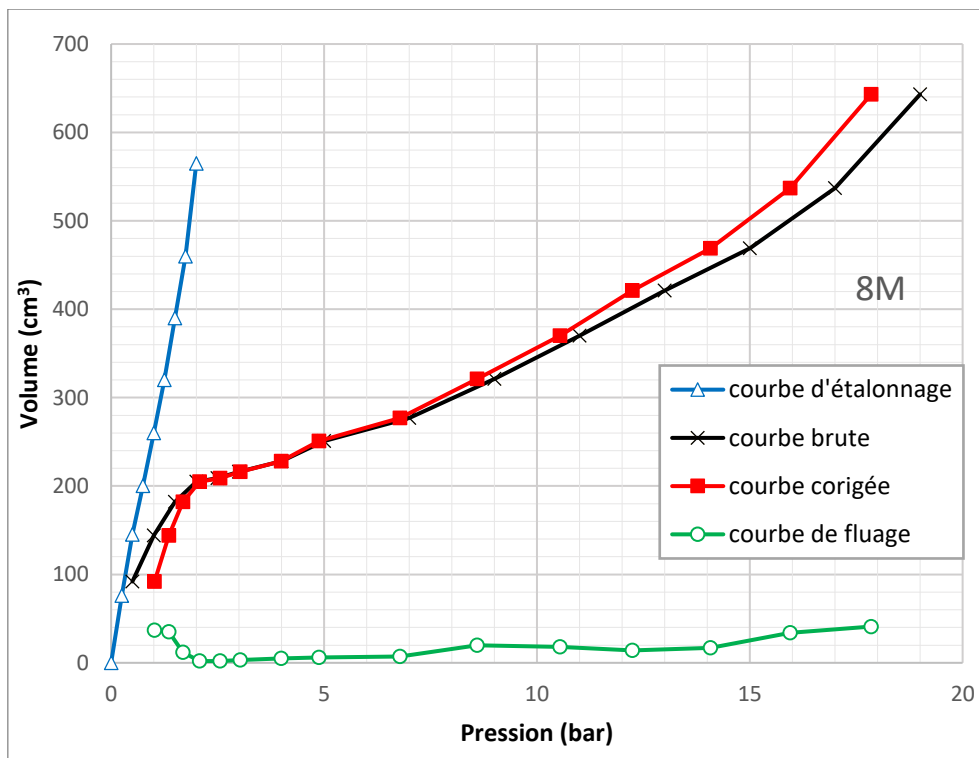


Figure III.5: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 8 m.

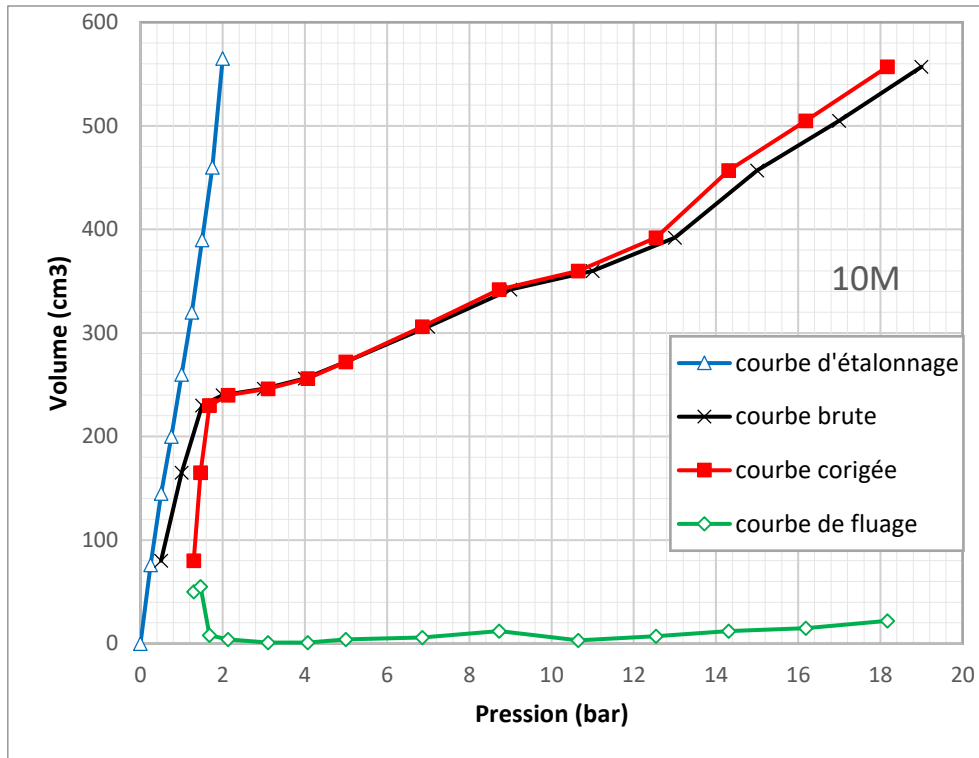


Figure III.6: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 10 m.

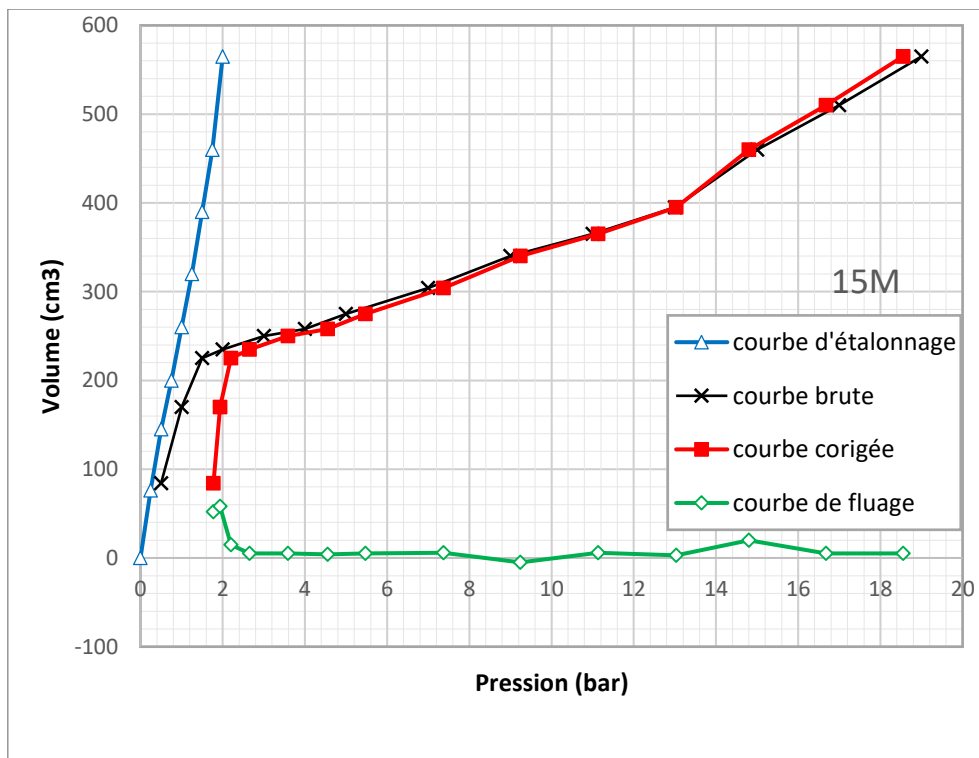


Figure III.7: Courbe expérimentale de l'essai pressiométrique à 15 m.

On peut remarquer à travers ces courbes la diminution du volume injecté pour une même pression quand la profondeur augmente.

III.2.2 Détermination des paramètres pressiométrique

Les courbes corrigées permettent l'exploitation de l'essai en déterminant les modules pressiométriques E_p , les pressions limite P_L et pressions de fluage P_f .

Le module pressiométrique E_p est déterminé par la formule suivante :

$$E_p = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right) \quad [\text{III. 1}]$$

Avec :

ν : Coefficient de poisson ($\nu = 0,33$).

V_0 : Volume initiale de la sonde au repos ($V_0=750 \text{ cm}^3$).

V_m : variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique ($V_m = V_0 + \frac{V_1 + V_2}{2}$).

$\left(\frac{\Delta P}{\Delta V} \right)$: L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.

La détermination de E_p , P_L et P_f a été effectuée sur les résultats précédents, sur différentes profondeurs, les paramètres sont donnés par le tableau (III-2), ou sur les profils donnés par les figures (III.6), (III.7), (III.8).

Tableau III. 3 : Les paramètres pressiométriques obtenue.

Profondeur(m)	E(bars)	P_L (bars)	P_f (bars)
02,00	282,55	24,18	14,26
04,00	328,26	23,87	14,49
06,00	358,86	24,55	14,68
08,00	151,34	17,45	8,595
10,00	191,8	20,89	12,54
12,50	209,06	19,85	12,78
15,00	179,65	20,67	13,03

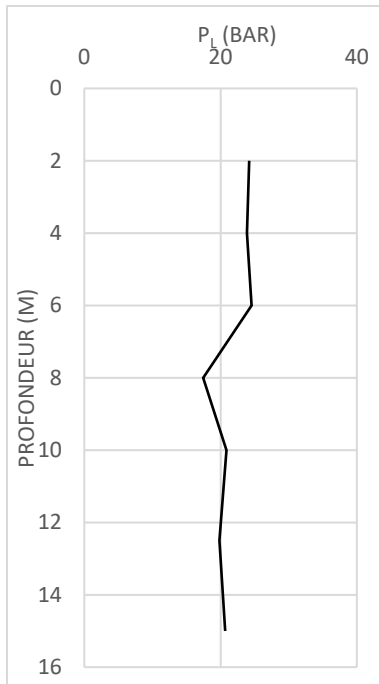


Figure III.8 : Profil des pressions limite.

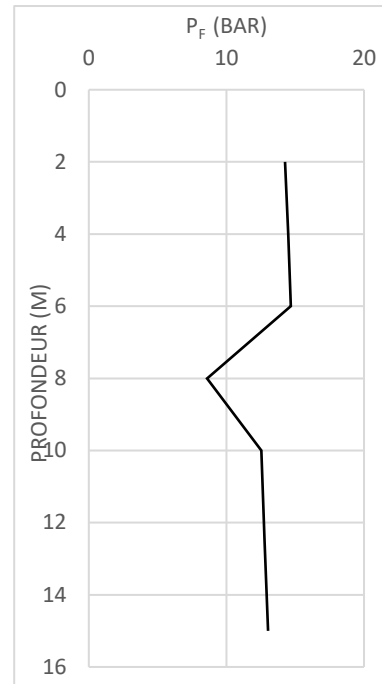


Figure III.9 : Profil des pressions de fluage.

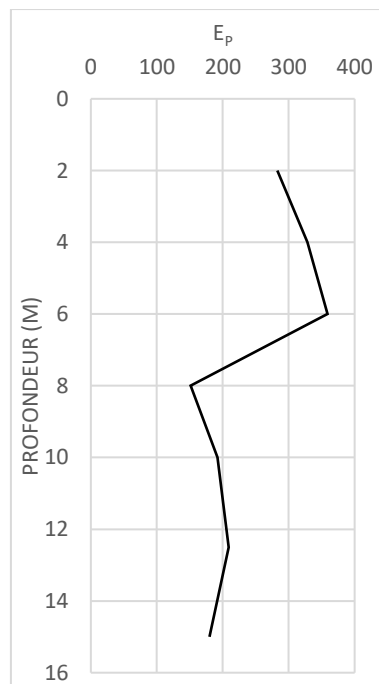


Figure III.10 : Profil des modules pressiométrique.

Ces courbes illustrent la variation des paramètres pressiométriques (E_p et P_i , P_f) en fonctions de la profondeur. En remarque aussi qu'il existe des fortes valeurs ce qui signifié présence des couches de sol de bonne résistance mécanique.

III.3 Détermination de la cohésion non drainée

Après avoir réalisé l'essai pressiométrique et calculer les paramètres E_p , P_l et P_f pour chaque profondeur, ces résultats permettent de déterminer la cohésion non drainée avec les différentes méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique présenter dans le chapitre (II).

On commence par déterminer C_u avec les méthodes de Menard, Amar et Jezequel ensuite avec la méthode de Gibson et Anderson et on termine avec la méthode de Baguelin et Al.

Afin de déterminer la cohésion non drainée avec la méthode de Baguelin et Al on procède à l'ajustement de la courbe théorique sur la courbe expérimentale, ensuite on dérive la courbe pressiométrique pour obtenue la courbe de cisaillement, et ça pour chaque profondeur ce qui amène à identifier les différentes C_u , un exemple des courbes d'ajustement est montré par la figure (III.11).

Les déférentes cohésion non drainée déterminer sont présenter en fonction de la profondeur dans le tableau (III.4), ainsi que la courbe correspondante montrés par la courbe (Figure III.12).

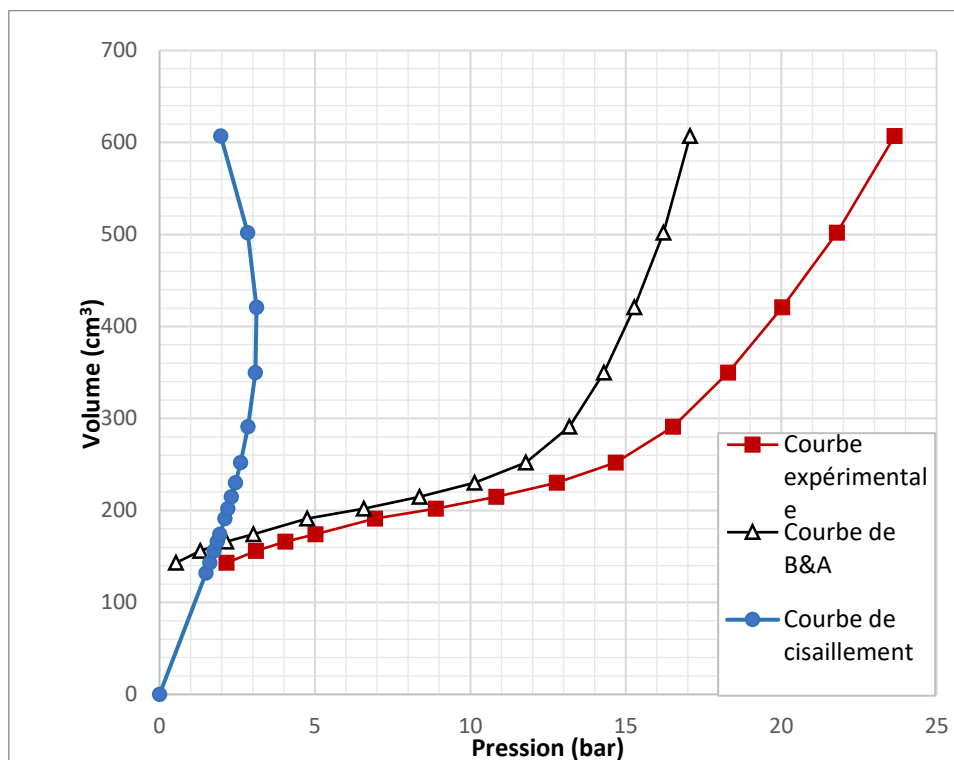


Figure III.11 : Courbe de dérivation de la courbe pressiométrique.

Tableau III.4 : valeur des cohésions non drainée.

Profondeur (m)	Cu avec la méthode de Menard.L	Cu avec la méthode de A&J	Cu avec la méthode de G&A	Cu avec la méthode de B&A
2	4,08	2,268	24,183	4,22
4	3,82	2,126	23,866	3,07
6	4,07	2,26	24,55	3,12
8	2,79	1,562	17,45	2,25
10	3,49	1,946	20,88	1,72
12,5	3,26	1,82	19,85	1,22
15	3,36	1,872	20,672	1

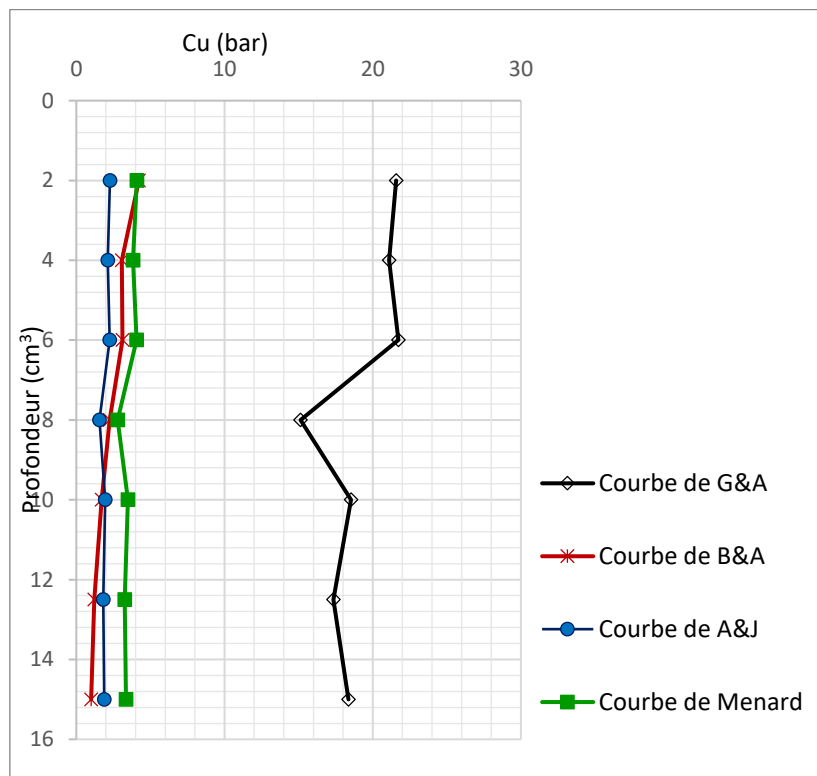


Tableau III.12 : profils des cohésions non drainée.

III.4 Conclusion

Après avoir effectué les différentes corrections sur les courbes pressiométriques brutes, et calculer les modules pressiométriques, les pressions limites et les pressions de fluage, on a présenté ces paramètres sous forme de profils pressiométrique en fonction de la profondeur.

L'exploitation de ces résultats a permis de déterminer la cohésion non drainée en utilisant quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique à citer la méthode de Menard, la méthode de Amar et Jezequel, la méthode de Baguelin et Al et celle de Gibson et Anderson.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation du code de calcul par éléments finis PLAXIS 2D et à la modélisation de l'essai pressiométrique en utilisant les modules pressiométriques et les cohésions non drainées déterminées par les différentes méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique cités ci-dessus.

Chapitre IV
Modélisation de l'essai pressiométrique

IV.1 Introduction

L'exploitation de l'essai pressiométrique a été effectuée par plusieurs méthodes ; méthodes analytiques (chapitre (II) et (III)), et méthodes numériques . Ces dernières ont connu un grand développement vu le progrès des ordinateurs.

Plusieurs études numériques ont été réalisées , en étudiant les différents paramètres affectant l'essai pressiométrique , tel que les dimensions du maillage, l'élancement de la sonde ainsi que le coupage sol-fluide .

Dans cette partie, on procède à la modélisation de l'essai pressiométrique avec le logiciel PLAXIS 2D qui est basé sur la méthode des éléments finis, en utilisant les différentes valeurs de cohésions trouvées dans le chapitre précédent.

IV.2 Présentation du logiciel PLAXIS

PLAXIS est un programme d'éléments finis, Conçu par des géotechniciens numériques de l'université de Delft aux Pays-Bas dans les années 1980, dont le but est de réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques.

Ce programme permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastique, élasto-viscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements . Très fiable sur le plan numérique, ce code fait appel à des éléments de haute précision, tels que les triangles à 15 nœuds, ainsi qu'à des pilotages de résolution récents.

Ce logiciel a connu une grande utilisation grâce à sa simplicité et son interface graphique, il permet d'analyser plusieurs problèmes de géotechniques, comme les calculs de fondations , stabilité des pontes, calculs des tunnels.

IV.3 Simulation numérique de l'essai pressiométrique

La modélisation de l'essai pressiométrique est très simple vu la simplicité des conditions aux limites qui le régissent.

La modélisation de l'essai pressiométrique se fait en axisymétrie (autour de l'axe vertical), le volume du sol est modélisé avec des éléments de 15 nœuds.

Le choix des dimensions de la grille est basé sur des études intérieurs où il a été trouvé qu'à partir de ces valeurs ,aucunes variation n'est observées (Bahar, 1992 ,Zanier 1985,Belhassani 2007).

On procède à la modélisation de chaque essai selon la géométrie donnée par la figure (IV.1) et avec les paramètres déterminés dans le chapitre (III) donnés dans le tableau (IV.1) et (IV.2). Le modèle de comportement utilisé pour la modélisation de ces essais est le modèle de Mohr-Coulomb.

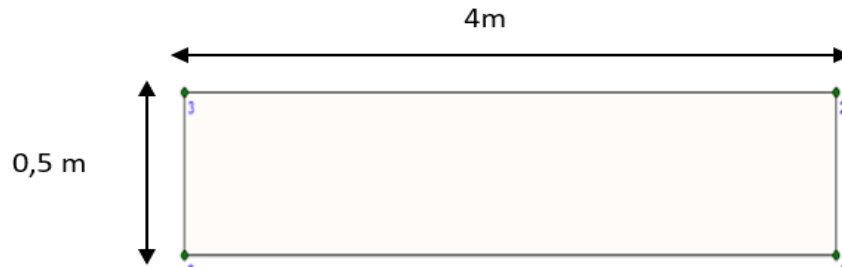


Figure IV.1 : Dimension de la grille a modéliser .

Tableau IV.1 : Paramètres du sol pour chaque profondeur.

Profondeur	γ (kn/m ²)	γ_{sat} (kn/m ²)	E (bars)
2	15	18	282,55
4	14	17,5	328,26
6	14	17,5	358,86
8	18	20	151,34
10	20	22	191,8
12,5	20	22	209,06
15	20	22	179,65

Pour la simulation de ces essais on a utilisé les cohésions déterminées par quelques méthodes d'interprétation de l'essai pressiométrique montrées dans le tableau (IV.2).

Tableau IV.2 : cohésion non drainée déterminer dans le chapitre (3).

Profondeur (m)	Cu avec la méthode de Menard.L (bar)	Cu avec la méthode de A&J (bar)	Cu avec la méthode de B&A (bar)
2	4,08	2,268	4,22
4	3,82	2,126	3,07
6	4,07	2,26	3,12
8	2,79	1,562	2,25
10	3,49	1,946	1,72
12,5	3,26	1,82	1,22
15	3,36	1,872	1

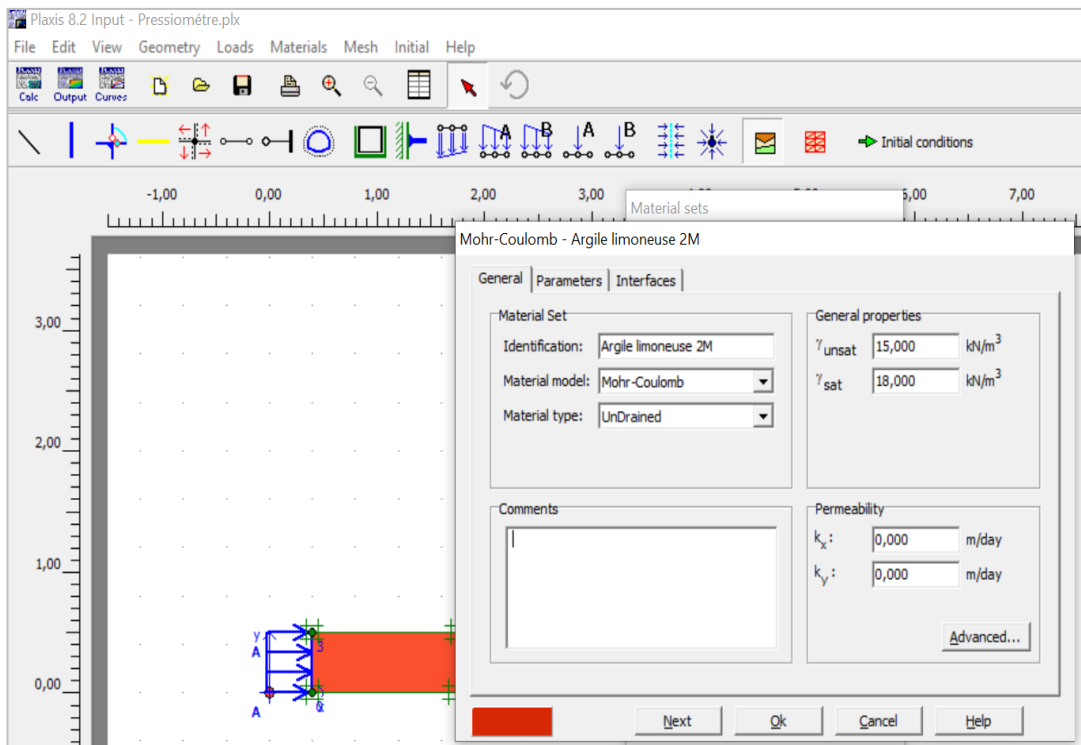


Figure IV.2 : Fenêtre d'introduction des paramètres du sol.

IV. 3.1 Conditions aux limites

Afin de simuler numériquement l'essai pressiométrique, nous avons imposé les conditions aux limites de la figure (IV.3). le sol est libre sur les parois verticales du forage où le chargement sera appliqué par la sonde pressiométrique.

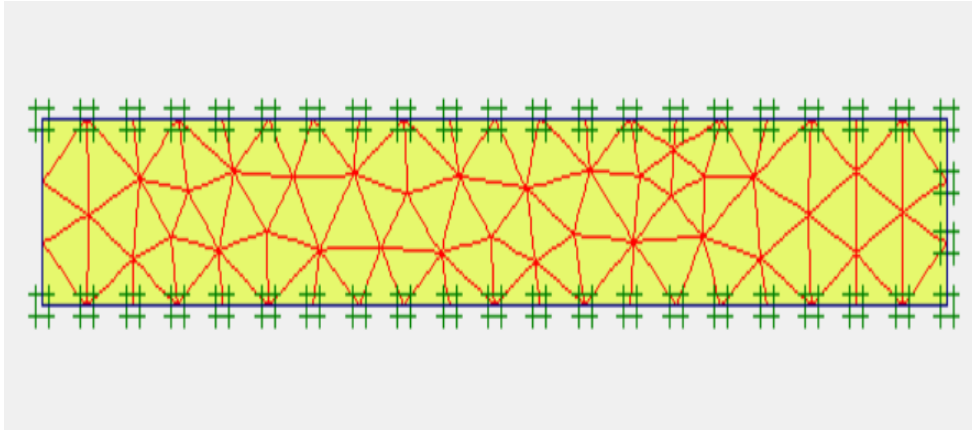


Figure IV.3 : Maillage et conditions aux limites.

IV. 3.2 Conditions initiales

Pour tous les essais, les différentes couches des sols considérées sont affectées des conditions initiales suivantes :

$$\sigma_{yy} = \gamma h \quad [IV.1]$$

$$\sigma_{xx} = k_0 \sigma_{yy} \quad [IV.1]$$

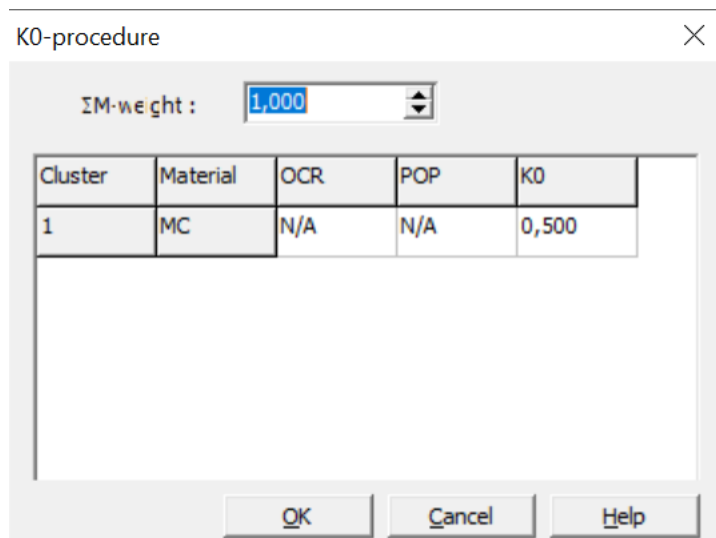


Figure IV.4 : Introduction des conditions initiale k_0 .

IV.3.3 Procédures de simulation numérique

L'expansion de la sonde pressiométrique est modélisée avec un chargement uniforme. Ce chargement est appliqué radialement sur une longueur égale à la longueur de la sonde, en fond de forage, en augmentant les pressions de $P_0 = 3 \text{ kn/m}^2$ jusqu'à atteindre une pression limite.

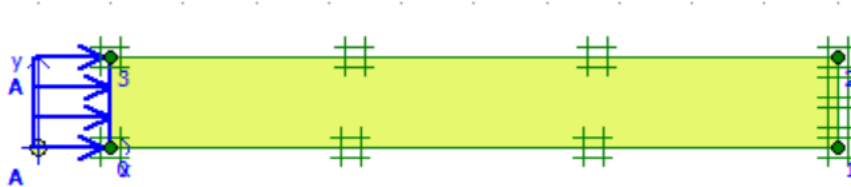


Figure IV.5 : Chargement appliqué.

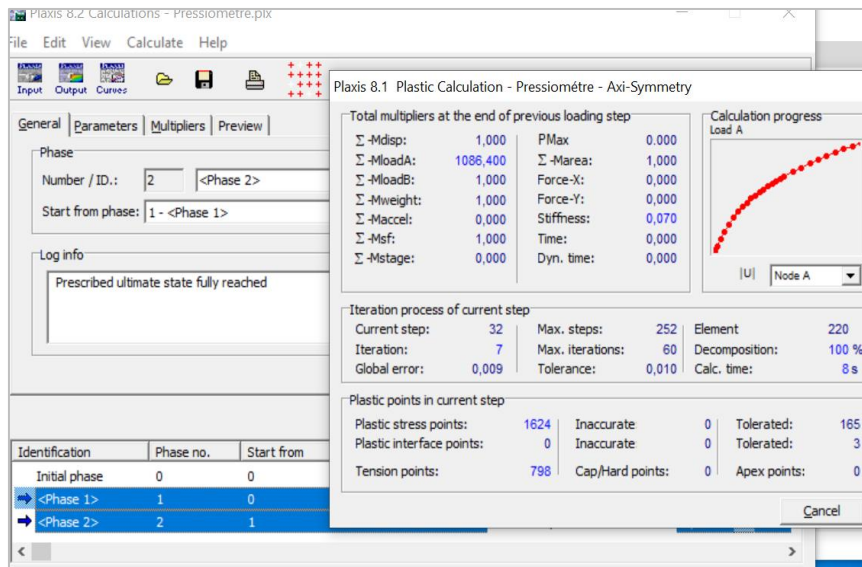


Figure IV.6 : Fenêtre de déroulement du calcul.

IV.4 Résultats et interprétations

Après interprétation du maillage, le CAL et le modèle de comportement, le calcul est exécuté pour les différentes profondeurs et en considérant les valeurs de cohésion des trois méthodes (Menard, Amar et Jezequel, et Baguelin).

Les résultats des modélisations sont illustrés par les figures (IV.7) ; 8, 9, 10, 11, 12, 13.

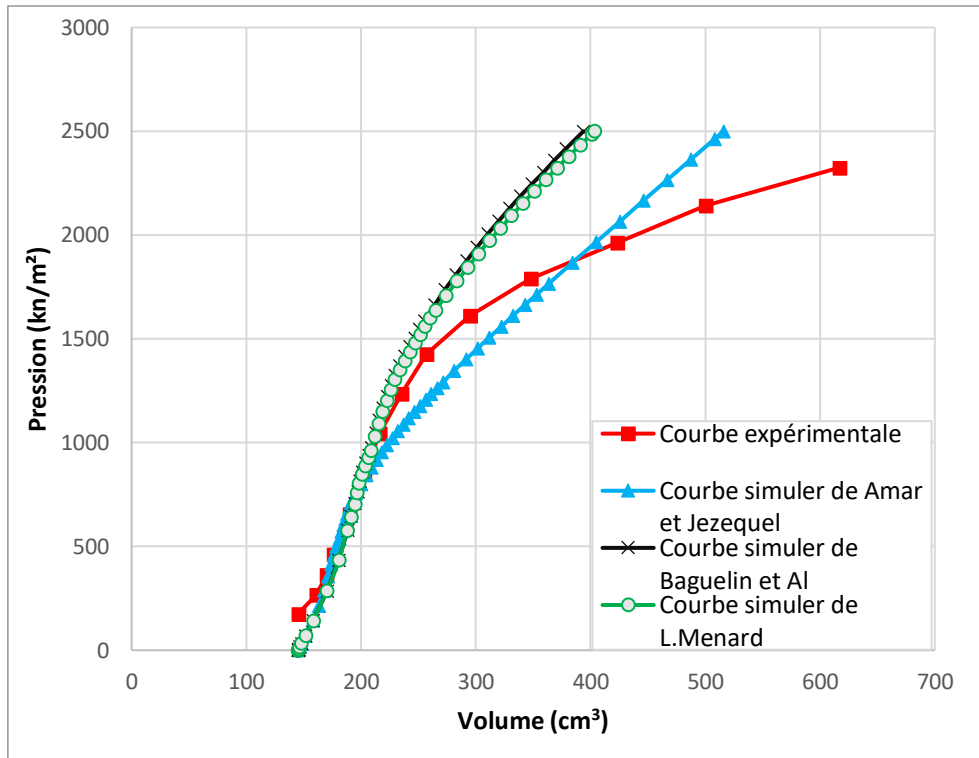


Figure IV.7 : Les courbes de simulations à 2m.

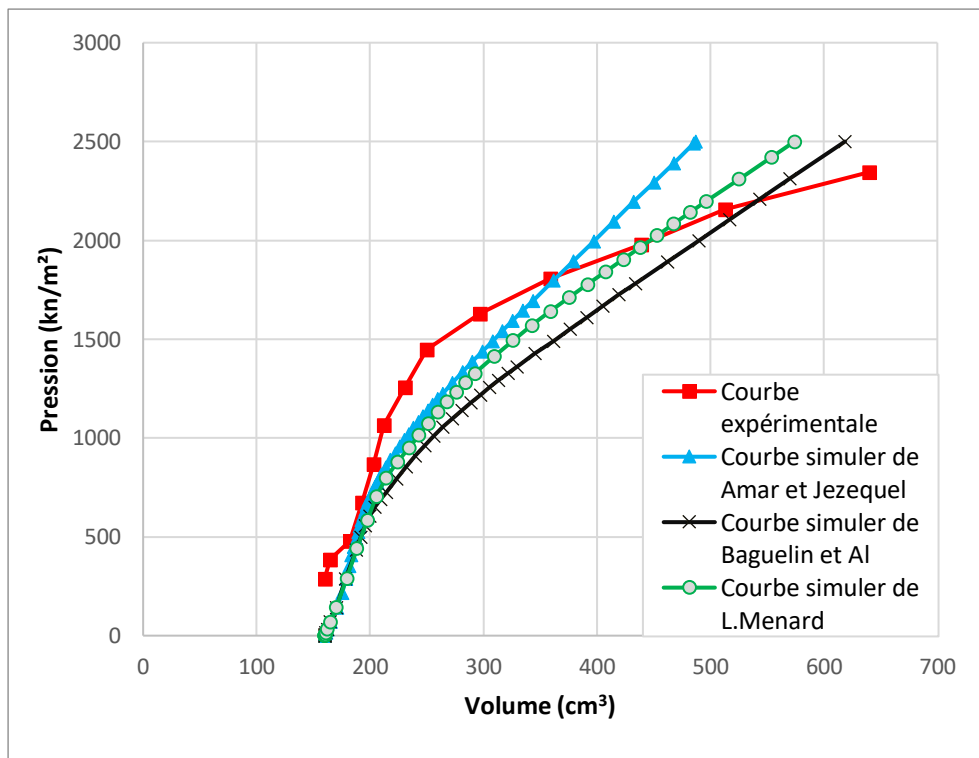


Figure IV.8 : Les courbes de simulations à 4m.

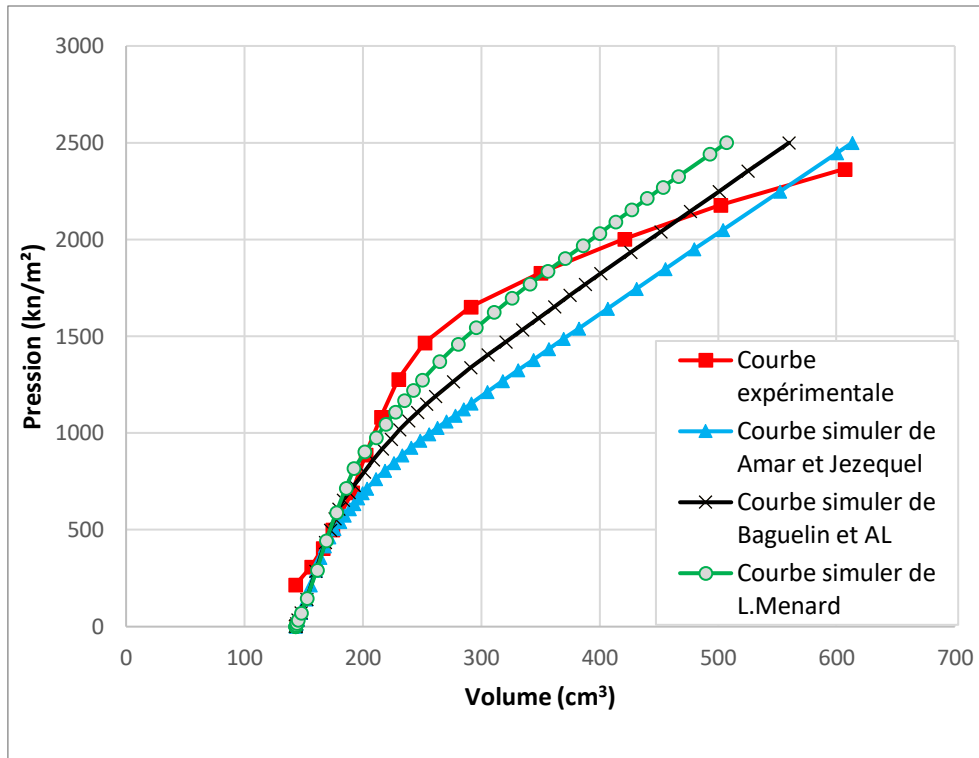


Figure IV.9 : Les courbes de simulations à 6m.

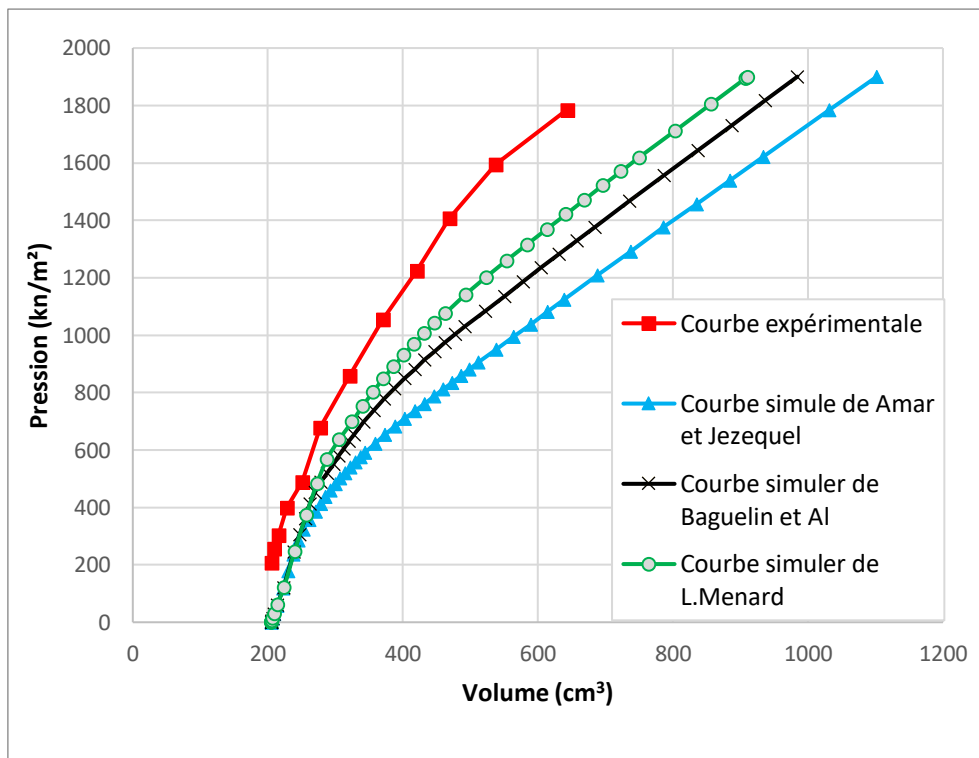


Figure IV.10 : Les courbes de simulations à 8m.

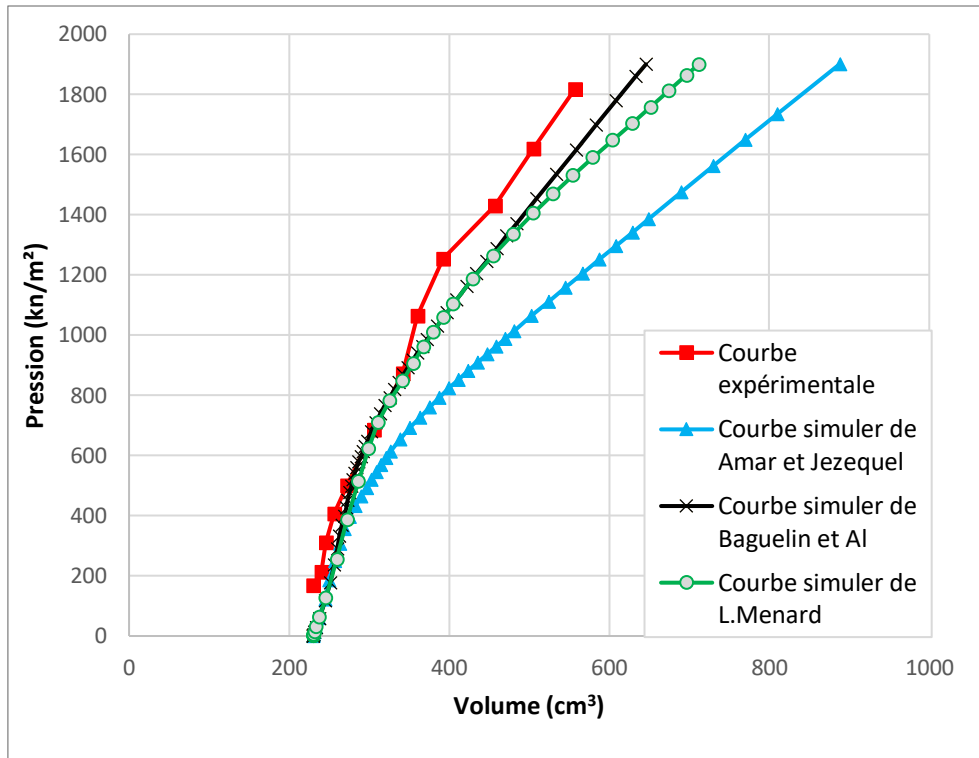


Figure IV.11: Les courbes de simulations à 10 m.

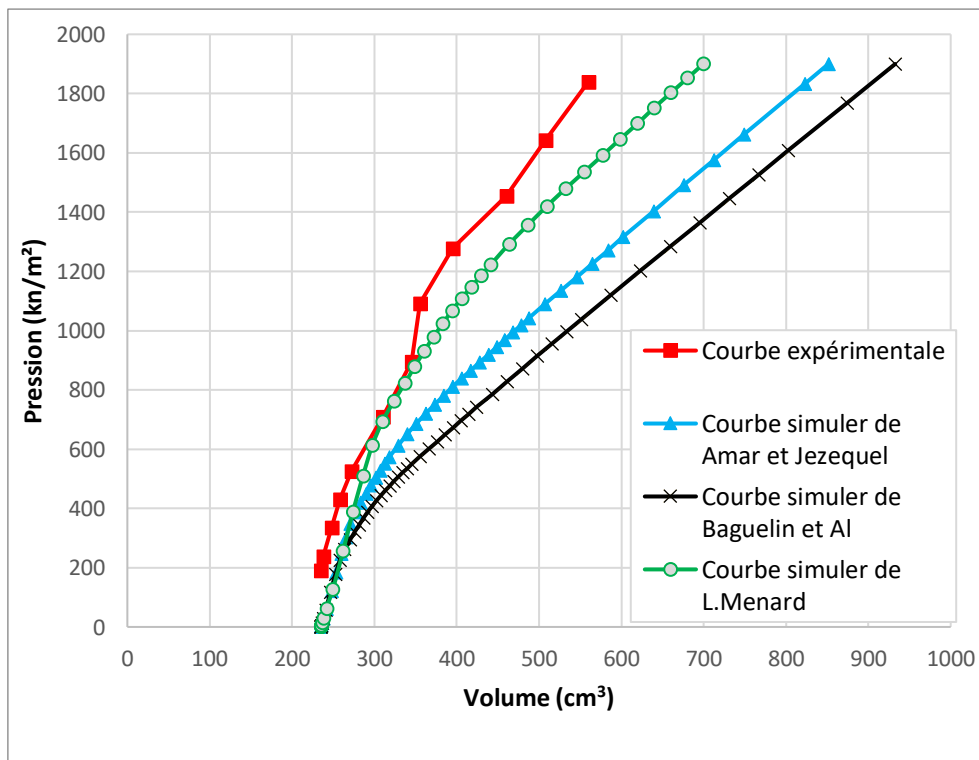


Figure IV.12: Les courbes de simulations à 12,5 m.

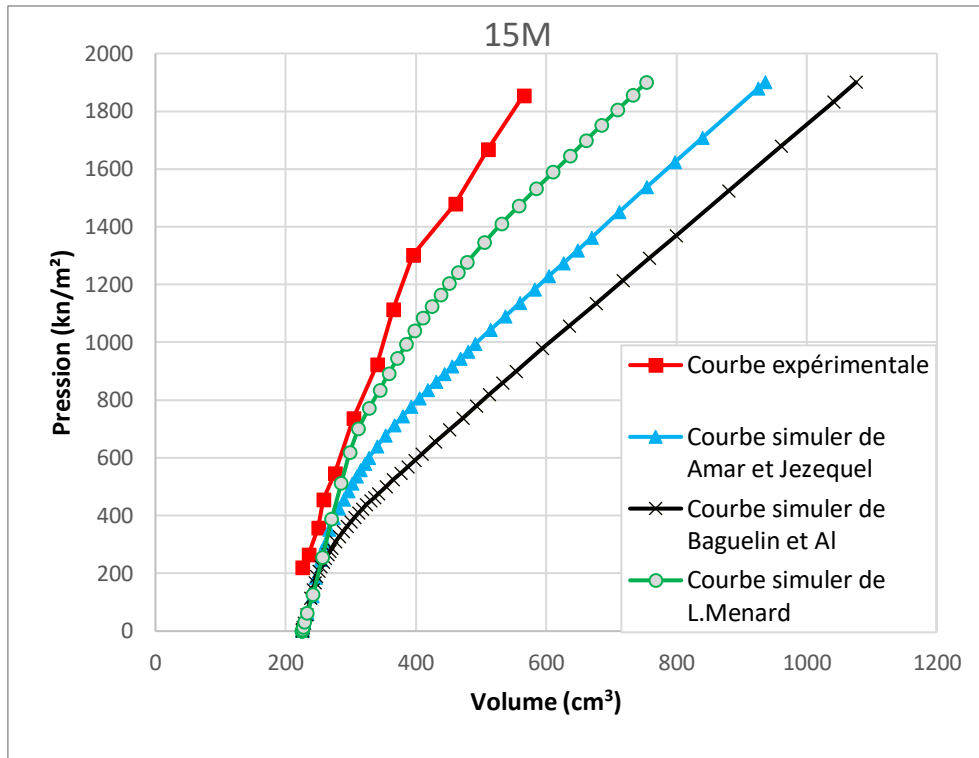


Figure IV.13 : Les courbes de simulations à 15 m.

De ces différentes figures on remarque que :

- Les différentes méthodes ont donné des courbes proches de la courbe pressiométrique expérimentale.
- La courbe pressiométrique varie avec la variation de la cohésion , où on remarque que plus C_u augmente plus P_l augmente.
- Les courbes obtenues par la méthode de Menard sont plus proches de l'expérimentale.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a procédé à une simulation numérique de l'essai pressiométrique avec le logiciel PLAXIS 2D, en utilisant les modules pressiométrique E_p déterminés dans le chapitre (3), et les cohésions non drainées déterminées par la méthode de Menard, la méthode de Amar et Jezequel et la méthode de Baguelin et Al.

Les résultats obtenus par simulation numérique ont donné des courbes de chargement en fonction des contraintes, qui sont comparé aux courbes expérimentales.

D'après les courbes obtenues, on constate ; que la cohésion a une influence sur la courbe pressiométrique, on constate aussi que les courbes simulées avec les valeurs de cohésion de Menard sont plus proches de la courbe expérimentale en comparant avec les courbes obtenues avec les autres méthodes.

On conclue que la simulation numérique par le code PLAXIS 2D avec les différentes méthodes donne des résultats acceptables en vue de l'obtention des paramètres du sol.

Cependant pour mieux approcher la courbe expérimentale , il faut chercher d'autres méthodes comme la méthode inverse qui nécessite la programmation d'algorithmes d'optimisation.

Enfin pour mieux exploiter l'essai pressiométrique, le chapitre suivant consistera à la détermination de la capacité portante et calcul des tassements d'une fondation superficielle à partir des essais pressiométriques.

Chapitre V

Calcul de la capacité portante et les tassements d'un radier

V.1 Introduction

Les déformations des sols sont liées aux chargements qui leur sont appliquées, ces chargements sont transmis aux fondations afin d'assurer la stabilité de ces sols, certes l'étude de celle-ci est primordiale.

L'étude de la conception d'une fondation superficielle permet de déterminer la capacité portante et les tassements induits par l'application des charges sur cette fondation.

Ce chapitre est consacré pour le calcul de la capacité portante d'une fondation superficielle, et pour la détermination des tassements provoqués dans les sols sous cette fondation à partir des essais pressiométriques réalisés, ensuite on procède à une simulation numérique du sol au-dessous de cette fondation avec le logiciel PLAXIS 2D.

V.2 Calcul de la capacité portante à partir de l'essai pressiométrique

L'ouvrage est un réservoir carré d'un côté de 100m et un volume de 30000m³. Pour ce type de projet et la nature du terrain on opte pour un système de fondation superficielle de type radier général de dimensions L=B=100m, encre de 2m.

L : longueur du radier.

B : largeur du radier.

La contrainte de rupture est déterminée par la formule suivante :

$$q_l = q_0 + k(P_l - p_o) \quad [V.1]$$

Avec :

q_l : contrainte de rupture.

q_0 : contrainte totale verticale des terres au niveau de la base de la fondation.

p_o : pression horizontale totale des terres au moment de l'essai.

P_l : pression limite pressiométrique.

k : facteur de portance pressiométrique, il est déterminé d'après la courbe de la figure (V.1) et le tableau (V.1) ($k=0,9$).

D'où :

$$q_0 = \gamma \cdot D \quad [V.2]$$

Avec

k_0 : coefficient des pressions des terres au repos (en générale = 0.5)

u : pression interstitielle au niveau considéré.

Tableau V.1: valeurs des coefficients de portance k (issues du Fascicule 62 -Titre V du CCTG)

Classe de sol		Description	Préssiomètre P_1 (MPa)
Argiles, Limons	A	Argiles et limons mous	< 0,7
	B	Argiles et limons fermes	1,2 – 2,0
	C	Argiles très fermes à dures	>2,5
Sables, Graves	A	Lâches	<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	Compactes	>3,0
Marnes ; marno-calcaires	A	Tendres	1,5 – 4,0
	B	Compacts	>4,5

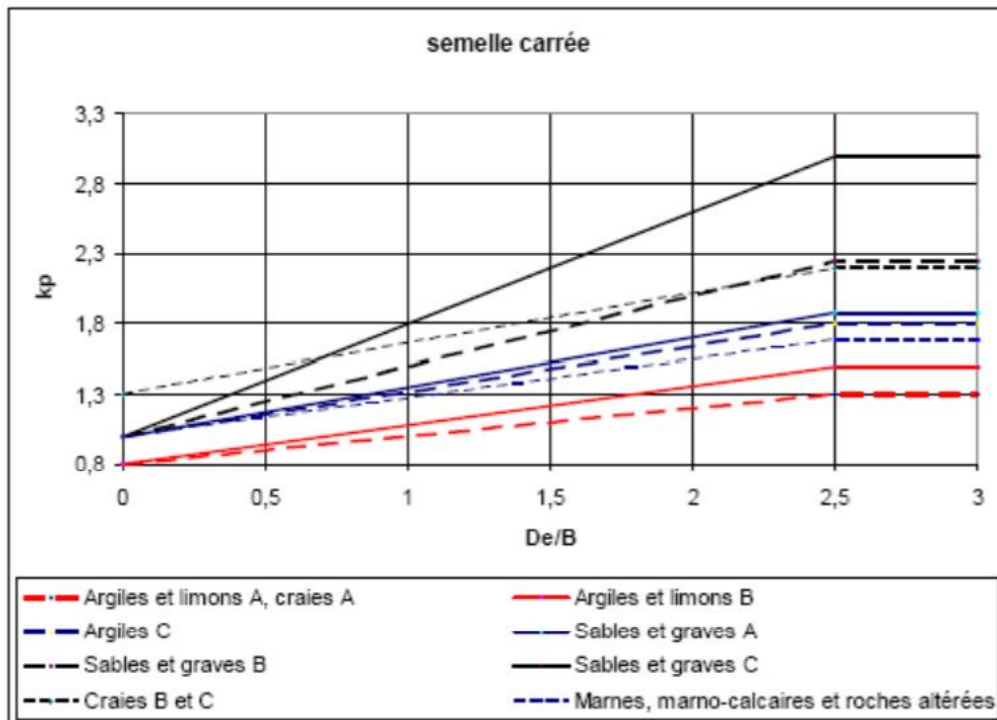


Figure V.1: Facteur de portance pressiométrique pour les semelles carrées et circulaire.(issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

D'où :

$$De = \frac{1}{P_{le}^*} \int_0^D P_l^*(z) dz \quad [V.3]$$

$$P_l^* = P_l - P_0 \quad [V.4]$$

Dans ce cas la valeur de P_{le}^* est donné par la relation [V.5] :

$$P_{le}^* = \sqrt[n]{(P_{le1}^* \cdot P_{le2}^* \dots P_{len}^*)} \quad [V.5]$$

Avec :

De : la hauteur d'encastrement équivalente

P_{le}^* : la pression limite nette équivalente.

P_l^* : la pression limite équivalente :

K_0 : coefficient des pressions des terres au repos (en générale = 0.5)

u : pression interstitielle au niveau considéré.

Les valeurs des contraintes de rupture et les contraintes admissible sont représentées dans le tableau(V.2) selon les différentes profondeurs existantes.

Tableau V.2 : Valeurs des contraintes déterminées(issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

Profondeur	q ₀ (bar)	P ₁ (bar)	P ₀ (bar)	p _{le} (bar)	p _l [*] (bar)	q _l (bar)	q _{adm} (bar)
4	0,56	23,87	2,86	10,66	23,59	17,31	6,58
6	0,84	24,55	2,16	12,66	24,13	17,31	6,99
8	1,44	17,45	2,08	14,66	16,73	17,39	4,97
10	2	20,89	1,68	16,66	19,89	17,43	6,16
12,5	2,5	19,85	1,9	19,16	18,6	17,43	5,78
15	3	20,67	2,2	21,66	19,17	17,43	5,94

V.3 Calcul des tassements

Le tassement est le déplacement vertical du sol en surface sous des charges appliquées. Le tassement total est donné sous la formule[V. 6].

$$S = S_c + S_d \quad [V. 6]$$

$$S_c = \frac{\alpha}{9E_c} (q - \sigma'_{v0}) \lambda c. B \quad [V. 7]$$

$$S_d = \frac{2}{9E_d} (q - \sigma'_{v0}) B_0 (\lambda_d \cdot \frac{B}{B_0})^\alpha \quad [V. 8]$$

Avec :

S_c : tassement sphérique.

S_d : tassement déviatorique.

E_m : module pressiométrique.

q : contrainte verticale appliquée au sol par la fondation ($q = 1,5$ bars).

σ'_{v0} : contrainte verticale totale avant travaux; au niveau de la base de fondation ($\sigma'_{v0} = \gamma \frac{1}{2} D$)

B : largeur de la fondation.

B_0 : largeur de la référence. (0.60m)

α : coefficient rhéologique (nature du sol), α est déterminé d'après les tableaux (V.2) et (V.3).

λ : coefficient de forme, fondation L/B, est déterminé d'après le tableau (V.4).

Tableau V.2 :Les valeurs de E/PL pour chaque profondeur.

Profondeur(m)	E(bar)	P _L (bar)	E/PL
2	282,55	24,18	11,68
4	328,26	23,87	13,75
6	358,86	24,55	14,62
8	151,34	17,45	8,67
10	191,8	20,89	9,18
12,5	209,06	19,85	10,53
15	179,65	20,67	8,69

Tableau V.3 : Les valeurs des coefficients rhéologique α (issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

Type	Tourbe	Argile		Limon		Sable		Sable Gravier	
	a	E/pl	a	E/pl	a	E/pl	a	E/pl	a
Sur consolidé très serré		>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalement consolidé ; normalement serré	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Sous consolidé altéré remanié ou lâche		7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3		

Tableau V.4: Les valeurs des coefficients de forme(issues du Fascicule 62 – Titre V du CCTG)

L/B	Cercle	Carrée	2	3	5	20
λ_c	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50
λ_d	1,00	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

Les différents tassements calculés sont donnés en fonction de la profondeur dans le tableau suivant :

Tableau V.5 : Les valeurs des tassements calculés.

Profondeur(m)	Sc (mm)	Sd (mm)	S (mm)
4	30	15	45
6	24	12	37
8	42	20	63
10	21	10	32
12,5	9	5	14
15	0	0	0

V.4 Procédure de la simulation numérique de la fondation avec PLAXIS 2D.

V.4.1 Caractéristiques géotechniques des matériaux.

Le tableau (V.6) résume les paramètres d'entrée pour modéliser les couches du sol, le modèle de comportement utilisé est le modèle de Mohr-Colomb, pour le radier, le modèle élastique linéaire est considéré (Béton armé). Ensuite on applique un chargement uniformément repart sur le radier.

La fondation utilisée est un radier général de largeur $B = 100\text{m}$, le modèle est représenté par la figure (V.2).

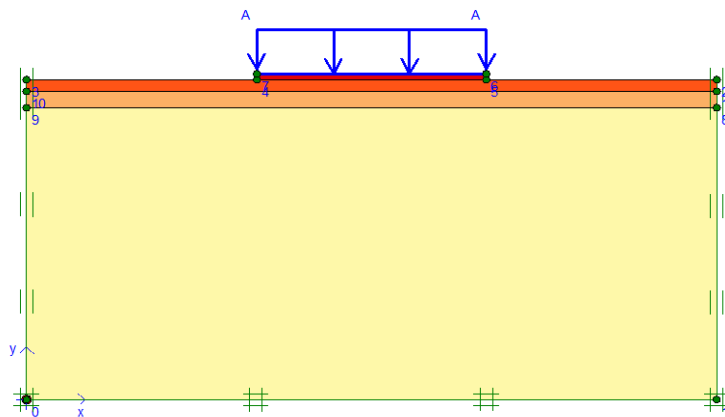


Figure V.2 : Présentation du model.

Tableau V.6 : Paramètres C_u et E pour chaque couche du sol.

Profondeur (m)	C_u avec la méthode de Menard.L (bar)	$E(\text{bar})$
2	4,08	282,55
4	3,82	328,26
6	4,07	358,86
8	2,79	151,34
10	3,49	191,8
12,5	3,26	209,06
15	3,36	179,65

V.4.2. Conditions aux limites

Les conditions aux limites considérées sont ;

- Déplacements selon x et y sont nuls à la base, (pas de déformations).
- Déplacement selon x sont nuls des deux côtés ($x=0$ et $x= 300m$)

Le maillage utilisé dans pour cette modélisation est un maillage moyen qui reste suffisant pour la précision recherchée durant le calcul.

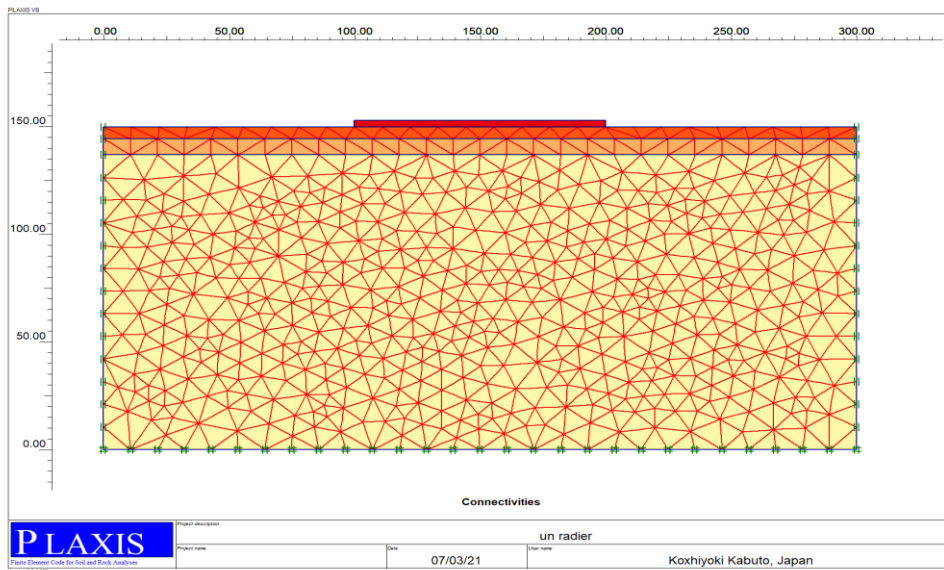


Figure V.3: Génération du maillage.

V.4.3. Conditions initiales

Les conditions initiales sont introduites par la procédure K_0 propre au logiciel (figure V.4).

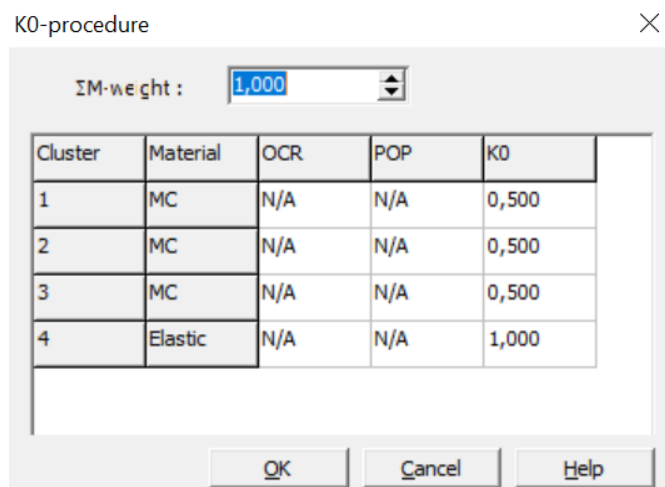


Figure V.4 : Valeur par défaut du module K_0 .

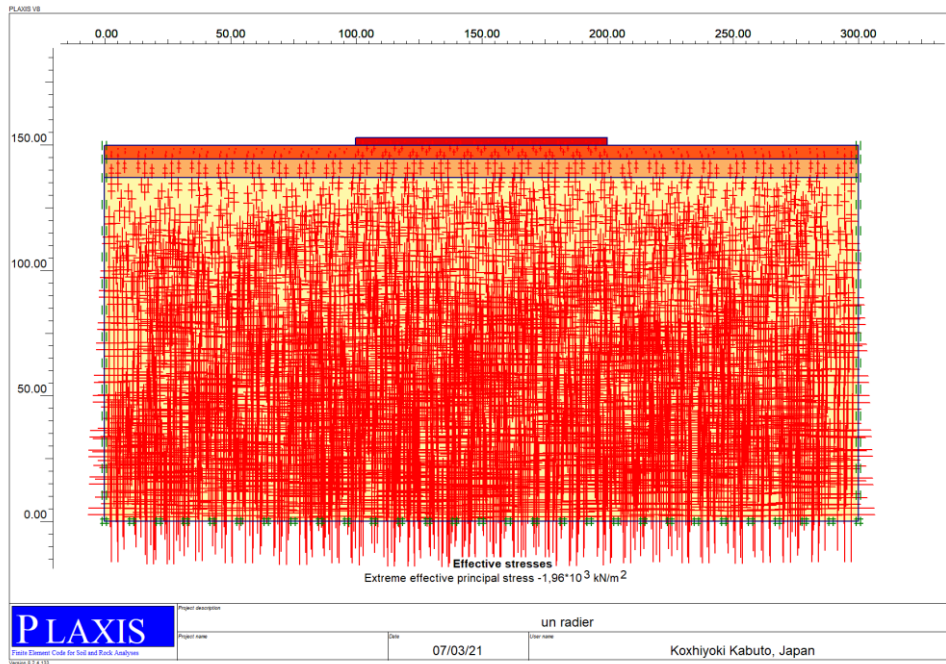


Figure V.5 : Génération des contraintes effectives initiales.

V.4.4. Résultats et interprétation

Les résultats obtenus par la simulation numérique sont donnés par les figures ; (V.6) ,(V.7) ; (V.8),(V.9).

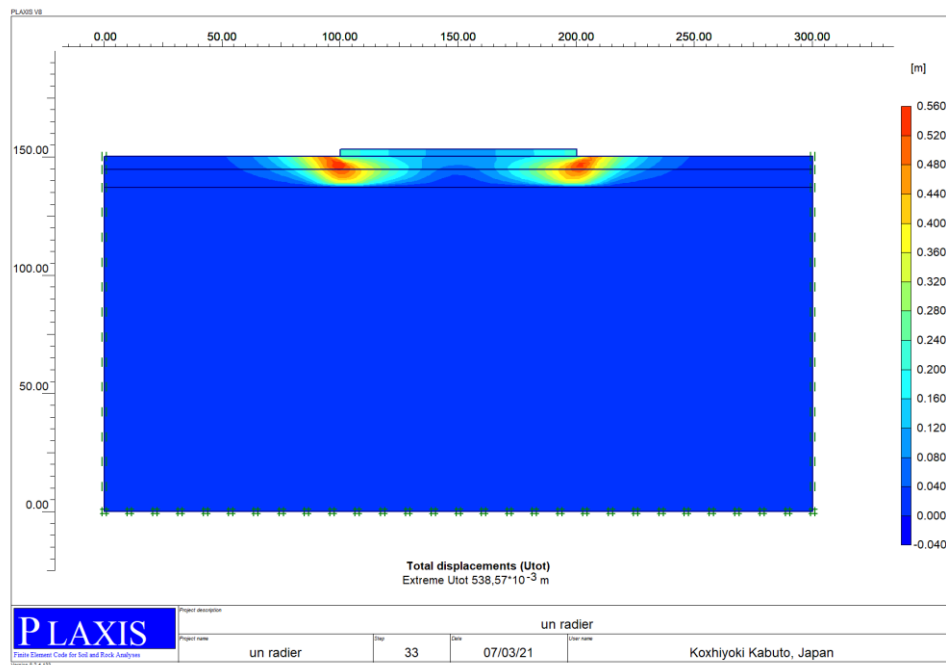


Figure V.6 : Evolution des déplacements dans le sol.

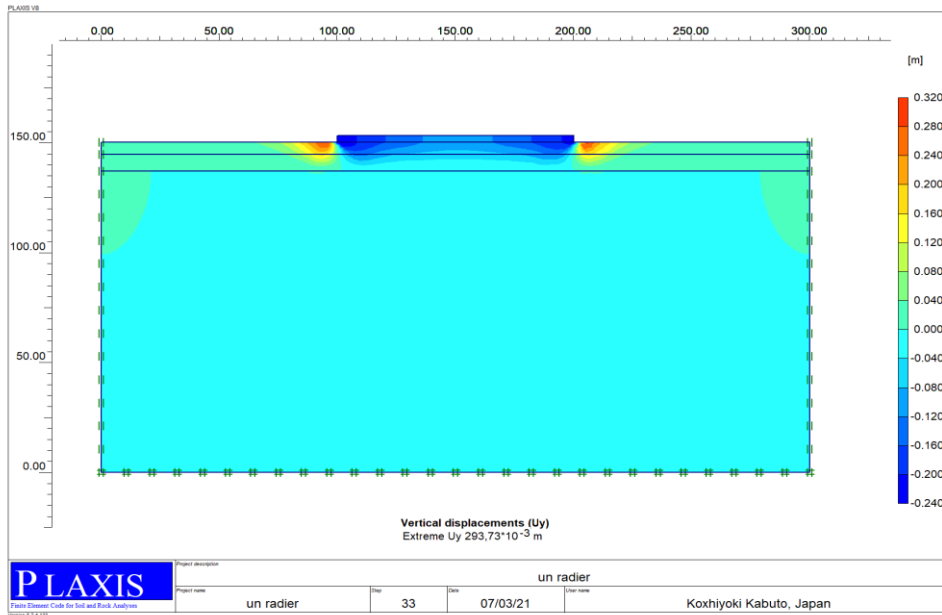


Figure V.7 : Les Déplacements verticaux.

Cette figure montre l'ordre des déplacement enregistré après l'application des charges ,on remarque que les déplacements verticaux en bas de la figure sont d'ordre de -24 cm ce qui signifie que c'est un tassement qui arrive jusqu'à 24cm en bas de la fondation.

On peut alors tracer la courbe charge déplacement qui montre l'évolution du déplacement dans les différentes couches de sol en fonction de la charge appliquée (figure (V.8)).

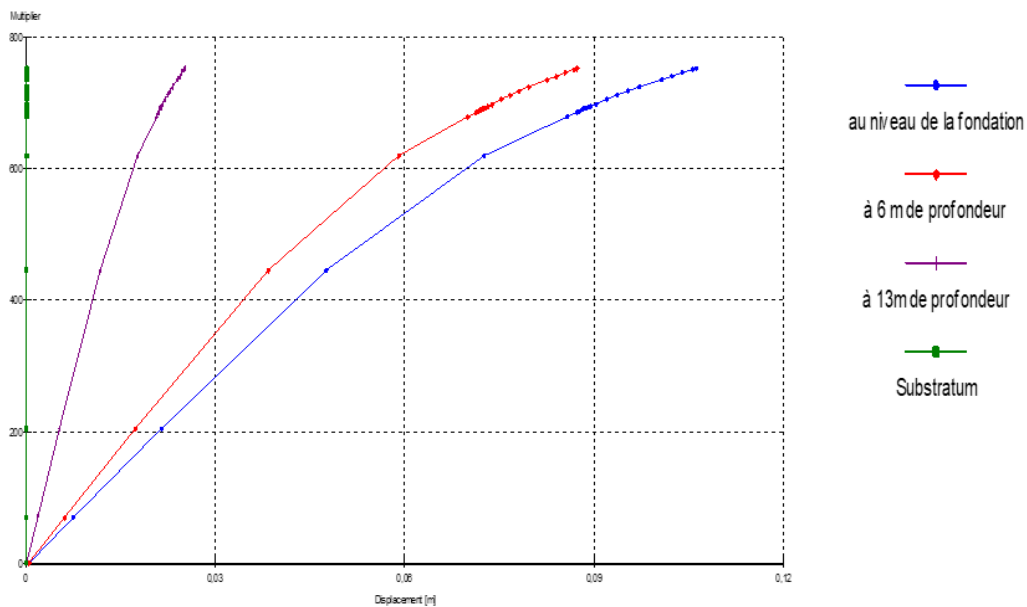


Figure (V.8) : Evolution des déplacements verticaux en fonction du chargement à différents niveaux.

- A travers cette courbe, on remarque que les tassements dans le sol sont plus grands dans les couches de sols qui sont plus proches de la fondation comme à 6m de profondeur, par contre les valeurs des tassements diminuent jusqu'à ce qu'elles s'annulent en profondeur.
- On remarque aussi que la charge limite pour laquelle la rupture se produit est de l'ordre de 750 kPa.

V.5 Comparaison des résultats

On remarque que la contrainte limite déterminée numériquement est plus petite que celles calculées analytiquement, et la considération d'une valeur plus petite coïncidera dans l'intervalle des contraintes admissibles déjà calculées.

- On remarque que les tassements déterminés numériquement sont plus petits que ceux déterminés analytiquement, d'où la nécessité de prendre dans les calculs d'autres facteurs ; comme d'autres lois de comportements, les dimensions du maillage, et faire beaucoup de calculs pour avoir un résultat général.

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a calculé la capacité portante d'un radier général, et les tassements induits par les charges appliquées sur les différentes couches de sols, en utilisant les résultats déterminés par les essais pressiométriques réalisés. Ensuite on a procédé à la simulation numérique de ce radier posé sur un massif de sol avec différentes couches avec PLAXIS 2D en introduisant la cohésion non drainée déterminée par la méthode de Menard.

A partir des valeurs obtenues par le calcul analytique et numérique, on constate qu'il y a une différence entre les résultats obtenus des capacités portante et des tassements, ce qui nous permet de dire que les deux méthodes sont nécessaires.

Conclusion générale

Au terme de ce travail on a présenté ,dans une première étape, l'essai pressiométrique ainsi que les différents types d'essais pressiométriques existant a été donné , ensuite on a présenté les différentes approches utilisées pour l'interprétation de cet essai.

Dans une seconde étape , on a présenté les résultats obtenus après la réalisation de l'essai pressiométrique , et après avoir effectué des corrections sur les courbes expérimentales on a déterminé les trois paramètres ; le module pressiométrique E_m qui définit le comportement pseudo-élastique du sol, la pression limite P_l qui caractérise la résistance de rupture du sol , et la pression de fluage P_f qui définit la limite entre le comportement pseudo-élastique et l'état plastique qui sont utilisés principalement pour le dimensionnement des fondations.

On a procédé à la détermination de la cohésion non drainée en utilisant les paramètres pressiométriques déterminés en utilisant ;les méthodes empiriques à savoir la méthode de Menard et la méthode de Amar et Jezequel ;les méthodes analytiques qui sont ; la méthode de Gibson et Anderson ,et la méthode de Baguelin et Al ; et les méthodes numériques .Avec ces dernières on a entamé la modélisation de l'essai pressiométrique avec un logiciel d'éléments finis PLAXIS 2D .

On constate que les résultats de la modélisation de l'essai pressiométrique présentés par les courbes simulées (obtenues par les différentes méthodes), ont des allures proches des courbes pressiométriques expérimentales. A partir des résultats obtenus analytiquement et numériquement on peut dire qu'une fusion de ces deux méthodes permet une bonne identification des paramètres de comportement du sol. .

A la fin on a procédé aux calculs analytiques des capacités portantes et des tassements induits dans les différentes couches de sols sous une fondation superficielle , ensuite on a procédé à la modélisation de cette fondation par le logiciel PLAXIS afin d'avoir des courbes effort déplacements pour chaque couche de sol. On constate alors que la simulation numérique a donné des résultats satisfaisants concernant les calculs de la capacité portante et des tassements.

Enfin , les résultats obtenus permettent la détermination des déformations et des charges limites que peut supporter une fondation ,ce qui permet de dire que la modélisation numérique peut être une voie de calcul des fondations.

Références bibliographiques

- AL HUSEIN M, (2001). Etude du comportement différé des sols et ouvrages géotechniques, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble I.
- AFNOR, (1991). "Norme Française NF P 94-110. Essai pressiométrique Ménard", AFNOR, Paris, pp. 1-32.
- Baguelin F, Jezequel J. F, (1973)."Le pressiomètre autoforeur", Annales de L'ITBTP, n° 308, pp. 133-160.
- Bahar R, (1992). Analyse numérique de l'essai pressiométrique : application à l'identification de paramètres de comportement des sols, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon.
- BELAHASSANI Ouarda (2007), Modélisation de l'essai pressiométrique cyclique, Thèse de magistère. Université des sciences et technologies Houari BOUMEDIENNE de BABA EZZOUAR,ALGER.
- BENTALBI Y, (2011). Analyse théorique numérique du comportement non drainé d'une argile sur consolidée lors d'un essai pressiométrique. Mémoire de maîtrise sciences appliquées, Université de Montréal.
- Cambou B, et Bahar R, (1993). Utilisation de l'essai pressiométrique pour l'identification de paramètres intrinsèques du comportement d'un sol. Revue Française de Géotechnique, 63, 39-50.
- GUETTAFI N, (2012). Comportement des sols mous lors d'un essai pressiométrique, Mémoire de magistère. Thèse présentée à l'université El Hadj Lakhdar, Batna.
- MONNET J, CHEMAA.T, (1995). Etude théorique et expérimentale de l'équilibre élastoplastique d'un sol cohérent autour du pressiomètre. Revue française de géotechnique, No. 73, p. 15-26.
- Fascicule 62 titre V(1993), règle technique de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie-civil. Cahier des chaussées technique générales applicable au marché public des travaux.
- Monnet J, (2016). Les essais in situ en géotechnique, Chapitre (8) : l'essai pressiométrique et ses variations, pages (187-255).

- SOEGIRI S, (1991). Modélisation de l'essai pressiométrique avec prise en compte de l'interaction fluide solide. Application à l'identification du comportement des sols, Thèse de doctorat. Ecole centrale de LYON.