

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

تلمسان - جامعة أبي بكر بلقايد

Université Aboubekr Belkaid – Tlemcen –

Faculté de Technologie

Département de Génie Civil



Mémoire d'obtention du Diplôme de : Master en Travaux Publics

Option : Voies et ouvrages d'art

Thème : CALCUL DE FONDATIONS PROFONDES

Soutenu en Juin 2021 par :

BELKADI Amina

MALTI Amina

Devant le Jury composé de :

Pr. ZADJAOUI .A

Président

Dr. AYAD .F

Examinatrice

Dr.BENCHOUK ASSIA

Encadrante

Année universitaire : 2020 /2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

Nous tenons à remercier en premier lieu Allah qui nous a donnée vie et santé pour le parachèvement de ce modeste travail

C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce fameux travail de fin d'étude

Aux deux êtres les plus chers au monde, qui ont souffert nuit et jour pour nous couvrir de leur chaleur d'amour, mes très chers parents, ceux grâce à qui j'ai pu atteindre ce niveau et ceux à qui je dois beaucoup de respect. Aujourd'hui, c'est autant un plaisir qu'un devoir pour moi de vous remercier pour votre amour, votre grande patience et vos sacrifices.

-Mes frères Mohammed el Amine, Omar et Youcef Zakaria.

- A mon Amie et mon Binôme AMINA BELKADI.

- Tous mes amis et tous ceux qui me sont chers.

- Toute la promo voies et ouvrage d'art 2020/2021.

-Tous ceux qui m'ont formé.

Merci d'être toujours là pour moi

Amina Malti.

Dédicace

Avec l'aide du tout Puissant, j'ai pu réaliser ce modeste travail que je dédie :

A mon très cher Père, Je voudrais partager ce succès avec lui, Que Allah le protège et le garde Rabi ychafihli Inchllh .

A ma très chère Maman, Que Allah la protège pour moi, je ne pourrai jamais la remercier assez Pour ce qu'elle fait pour moi.

A mes très chers sœurs Badria, Salima, Khouira, Amel et mon frère Djaoued et leurs enfants Hanaa, Haloma, Sanaa Ben Ali, Abd El Hai, Mehdi.

A Just ma petite famille BELKADI.

A mon Amie et mon Binôme AMINA MALTI, et tous mes amis de la promotion voies et ouvrages d'art et génie civil.

A Tous mes enseignants tout au long des cycles de mes études.

Et en Dernier, un Grand merci à toutes celles et tous ceux qui d'une manière ou d'une autre m'ont aidé et soutenu.

Amina Belkadi.

Remerciement

Notre parfaite gratitude et nos remerciements à ALLAH le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à présenter tous nos respects et notre gratitude à Mme. BENCHOUK ASSIA, pour ses encadrements, ses orientations, sa disponibilité et ses encouragements pour mener à bien ce travail.

Nous remercions le président de jury Mr. ZADJAOUI A. ainsi que l'examinatrice Mme. AYAD F. d'avoir accepté de lire et d'examiner ce modeste travail et d'apporter les critiques nécessaires à ce mémoire.

Nos vifs remerciements pour l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui ont contribué à notre formation d'ingénieur en génie civil.

Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude, qu'ils trouvent ici, l'expression de nos sincères remerciements.

RÉSUMÉ

Avec le développement rapide et important de la technologie des pieux dans le monde entier et sa large application en génie civil et maritime, l'utilisation de fondations sur pieux est devenue le principal objectif des ingénieurs de conception, des bureaux de contrôle et des entrepreneurs. Institut de recherche.

Nos travaux portent principalement sur : le calcul des fondations profondes ; la sélection des types de fondation ; la classification des fondations profondes et le calcul des fondations sur pieux.

Dans le cadre de l'application de l'EUROCODE 7, la norme d'application nationale française NF P 94-262 relative aux fondations profondes qui a remplacé les anciennes règles de calcul des ouvrages d'art ,Nous avons synthétisé l'organigramme de calcul des pieux et groupe de pieux.

A titre de comparaison, deux méthodes ont été utilisées, telles que la méthode analytique et le logiciel GEOFOND1.22. Une bonne concordance des résultats déduits de ces deux approches a été notée que les résultats dérivés de ces deux méthodes sont en bon accord.

Mots clés : Pieux, fondations profondes, Eurocode 7, organigramme de calcul, GEOFOND1.22.

Abstract:

With the rapid and significant development of pile technology worldwide and its wide application in civil and marine engineering, the use of pile foundations has become the focus of design engineers, control offices and contractors. Research institute.

Our work is mainly focused on calculation of deep foundations; selection of foundation types; classification of deep foundations and calculation of pile foundations.

As part of the application of Eurocode 7, the French national application standard NF P 94-262 related to deep foundations will soon replace the old engineering structure calculation rules. The calculation method proposed in this standard takes into account the evolution determined by the experience of the pressure gauge and penetrometer data on deep foundation resistance.

For comparison, two different methods were used, such as the manual method and the GEOFOND1.22 software. A good agreement of the results deduced of these two approaches has been noted that the results derived from these two methods are in good agreement.

Key words: Piles, deep foundations, GEOFOND1.22

الملخص

مع التطور السريع والهام لتكنولوجيا الخوازيق في جميع أنحاء العالم وتطبيقها الواسع في الهندسة المدنية والبحرية أصبح استخدام أساسات المواقف هو التركيز الرئيسي لمهندسي التصميم والمقاولين ومعهد البحوث. يركز عملنا بشكل أساسي على حساب الأساس العميق، اختيار نوع الأساس، تصنيف الأساس العميق وحساب أساس الركيزة.

كجزء من تطبيق الأوروك و7 سيحل قريبا معيار التطبيق الفرنسي (P 94-262NF) وقواعد حساب الهيكل الهندسي المتعلق بالأساسات العميقة محل قواعد حساب الهيكل الهندسي القديمة. تأخذ طريقة الحساب المقترحة في هذه المواصفة في الاعتبار التطور الذي تحدده تجربة مقياس الضغط على مقاومة الأساس العميق وبيانات مقياس الاختراق. لقد تم استخدام طريقتين مختلفتين للمقارنة منها الطريقة اليدوية وبرنامج جيوفوند وقد لوحظ أن النتائج المستمدة من هاتين الطريقتين متوافق عليها.

الكلمات المفتاحية: الخوازيق، الأساسات العميقة، جيوفوند 1.22

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Abstract

الملخص

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et abréviations

Introduction générale

Partie 1 : Etudes bibliographiques

Chapitre 1 : Notions sur les fondations profondes

1. Introduction	1
2. Classification des fondations	1
3. Principe de fonctionnement d'une fondation profonde	3
4. Les pieux	3
4.1. Définition	3
4.2. Classification des pieux	4
4.2.1. Classification suivant le mode d'exécution	4
a. Pieux refoulant le sol à la mise en place	4
b. Pieux ne refoulant pas le sol à la mise en place	6
4.2.2. Choix du type de pieux	8
5. Mode de réalisation des pieux	8
5.1. Pieux forés simple : forage sans blindage	8
5.2. Pieux forés tubés : forage avec blindage métal	9
5.3. Pieux forés battus : pieux à tube battu moulés dans le sol.	10
5.4. Pieux forés à la boue	10
5.5. Micro pieux	11
6. Classification selon le mode de fonctionnement	11
6.1. Les méthodes classiques de calculs des pieux	11
6.1.1. Formule de Battage	12
6.1.2. Capacité portante d'un pieu	13
7. Groupes de pieux	15

7.1. Effet de groupe sur la capacité portante	16
7.2. Groupe dans un sol sans cohésion	18
7.3. Tassement d'un groupe de pieux	18
8. Conclusion.....	18

Chapitre 2 : Calcul des fondations profondes par L'EUROCODE 7

1. Introduction sur l'EUROCODE 7.....	19
2. La norme « fondation profonde» NF P 94-262.....	20
3. Considération générales dans le calcul de la fondation profonde	20
4. Principe de calcul des fondations profondes	20
5. Considérations relative au calcul	21
6. Justification des pieux sous charges axiales.....	21
6.1. Calcul à l'état limite	21
6.2. Capacité portante	21
6.3. Capacité portante ultime déduite d'essais de chargement de pieux	22
6.4. Capacité portante ultime déduite des essais in-situ.....	23
6.4.1. Méthode pressiométriques.....	23
6.4.2. L'essai de pénétration statique (CPT).....	29
6.5. Capacité portante ultime d'après des résultats des essais exécutés sur le sol ..35	
6.6. Tassement d'un pieu isolé	39
6.7. Frottement négatif.....	40
7. Comportement des groupes de pieux	41
7.1 Comportement axiale.....	41
8. Conclusion	42

Partie 2 : Modélisation numérique

Chapitre 3 : APPLICATIONS DE CALCULS PAR L'EUROCODE 7

1. Introduction	44
2. Calcule analytique de la capacité portante.....	44
2.1. Méthode pressiométriques	44
2.1.1. Méthode de terrain	46
2.1.2. Modèle de pieux.....	47
2.2. Méthode pénétromètre statique.	49
3. Exemple de calcule.....	50
3.1. Méthode pressiométriques.....	50
3.1.1 Méthode du modèle de terrain.....	51
3.1.2. Méthode du modèle de pieu.	52
3.2. Méthode pénétromètre statique.	54
3.2.1.1 Méthode du modèle de terrain.....	55

3.2.2.2 Méthode du modèle de pieu.....	57
4. Calcule de la capacité d'un pieu avec GEOFOND 1.22.....	57
4.1. Présentation du logiciel GEOFOND1.22.....	57
4.2. Manuel d'utilisations.	57
5. Résultats.....	67
5.1. Méthode pressiométriques.....	67
5.2. Méthode pénétromètre statique.....	68
5.3. Capacité portante d'un groupe de pieux.	68
6. Conclusion	70
Conclusion générale.....	71

Références bibliographiques

ANNEXES

Annexe A

Annexe **B**

LISTE DES FIGURES

Chapitre 01 :

Figure 1.1 : le domaine des fondations.....	2
Figure 1.2 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique De.....	3
Figure 1.3 : profils Pieu battu préfabriqué	4
Figure 1.4: profils métalliques battus.....	4
Figure 1.5: pieux battus moulés.....	5
Figure 1.6: pieux forés avec boue.....	6
Figure 1.7: pieux tarières creuses.....	7
Figure 1.8 : les micros pieux.....	7
Figure 1.9: puits.....	8
Figure 1.10 : pieux forés simple.....	9
Figure 1.11 : pieux forés tubés.....	9
Figure 1.12 : pieux battus.....	10
Figure 1.13 : pieux forés à la boue.....	10
Figure 1.14 : pieu foré a la boue.....	11
Figure 1.15 : le mode de fonctionnement des pieux.....	11
Figure 1.16 : comportement d'un pieu isolé soumis à une charge verticale.....	13
Figure 1.17 : groupe de pieux.....	16
Figure 1.18 : pieux isolée.....	17
Figure 1.19 : group de pieu.....	17
Figure 1.20 : calcule de tassement d'un groupe de pieux.....	18

Chapitre 02 :

Figure 2.1 : plessimètre Ménard.....	23
Figure 2.2 : Évaluation de la pression nette équivalente.....	24
Figure 2.3 : Aire et périmètre pour les profilés métalliques foncés (pieux de classes 5, 6 et 7).....	25
Figure 2.4 : Valeurs du frottement latéral unitaire.....	28
Figure 2.5 : Résistance de pointe équivalente.....	30
Figure 2.6 : Courbes f_{s01} pour la méthode pénétrométriques.....	32
Figure 2.7 : Courbe de chargement axial d'un pieu.....	38
Figure 2.8 : Frottement négatif.....	40

Chapitre 03 :

Figure 3.1 :Organigramme de la méthode pressiometrique.....	45
Figure 3.2 : organigramme de resistance de point.....	46
Figure 3.3 : Organigramme de calcul de capacité portance a ELU.....	46
Figure 3.4 : Organigramme de calcul charge de fluage ELS.....	46
Figure 3.5 : Organigramme de résistance en Traction et compression.....	47
Figure 3.6 : Organigramme de résistance frottement axial et de pointe.....	47
Figure 3.7 : Organigramme de calcul portance a ELU.....	48
Figure 3.8 :Organigramme de calcul charge de fluage ELS.....	48
Figure 3.9 : Organigramme de methode penemetrique statique.....	49
Figure 3.10 : le choix du module.....	58
Figure 3.11 : tableau de bord.....	58
Figure 3.12: tableau pour saisir les caractéristiques du sol.....	59
Figure 3.13 : saisir les valeurs de q_s ou k_c ou k_p	59
Figure 3.14 : définition de la fondation.....	60
Figure 3.15 : type d'élément de fondation.....	61
Figure 3.16 : représenté la fondation.....	61
Figure 3.17 : définir l'ensemble des caractéristiques de la fondation.....	62
Figure 3.18 : définition du frottement négatif.....	63
Figure 3.19 : définir de la couche de sol.....	63
Figure 3.20 : tableau de donnée de frottement négatif.....	64
Figure 3.21 : définition des caractéristiques de béton.....	64
Figure 3.22 : définir la charge du pieu.....	65
Figure 3.23 : saisir du groupe de pieu.....	65
Figure 3.24 : les charges appliquées sur la structure.....	66
Figure 3.25 : vue 3D de la structure.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 01 :

Tableau 1.1: mode de realisation d'un pieu forés simple.....	9
Tableau 1.2: mode de realisation d'un pieux forés tubes.....	9
Tableau 1.3: mode de réalisation d'un pieu battu.....	10
Tableau 1.4 : mode réalisation d'un pieu foré à la boue.....	10
Tableau 1.5: mode de réalisation d'un micro pieu	11
Tableau 1.6: valeur maximal du coeficion β	14
Tableau 1.7: les valeurs proposés par Caquot et Kérisel.....	15

Chapitre 02 :

Tableau 2.1 : valeurs du coeficien de corelation ξ'_1 et ξ'_2	22
Tableau 2.2 : facteur de portance K_{Pmax} (pour $Def/B \geq 5$)	25
Tableau 2.3 : Classes et catégories de pieux (AFNOR, 2012)	26
Tableau 2.4 : Définition des catégories conventionnelles de sols (AFNOR, 2012)	27
Tableau 2.5 : Facteur de portance k_{cmax} (pour $D_{ef}/B \geq 5$)	31
Tableau 2.6 : Les valeurs a, b, c pour la méthode pénétration statique	32
Tableau 2.7 : Valeurs du paramètre α pieu-sol pour la méthode pénétrométrique.....	33
Tableau 2.8 : Valeurs maximales du frottement axial unitaire limite q_{smax} pour les méthodes pénétrométriques.....	34
Tableau 2.9 : Valeurs du coefficient de corrélation ξ'_3 et ξ'_4	35
Tableau 2.10 : Valeurs du coefficient partiel $\gamma_{R,d1}$	36
Tableau 2.11 : facteurs partiels pour la résistance en traction et compression	37
Tableau 2.12 : Valeurs de facteurs partiels γ_b, γ_s	38
Tableau 2.13 : facteurs partiels pour la résistance en traction et compression.....	39
Tableau 2.14 : Valeurs du coefficient K $\tan\delta$	41

Chapitre 03 :

Tableau 3.1 : résultat essai présiométrique	67
Tableau 3.2 : essai présiométrique pieu modele.....	67

Tableau 3.3 : résultat essai pressiométrique pour un pieu de 44m.....	68
Tableau 3.4 : résultat essai pénétromètre statique.....	68
Tableau 3.5 : Les données de groupe de pieux.....	69
Tableau 3.6 : résultat à ELS quasi-permanent.....	69
Tableau 3.7 : résultat à ELU quasi-permanent.....	69
Tableau 3.8 : comparatif des capacités portantes calculés manuellement et par GEOFOND...	70

LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

LISTE DES NOTATIONS

D : Profondeur de la base de la fondation par rapport au terrain naturel.

B : Largeur ou diamètre de la fondation.

Q_v : Charge verticale.

Q_H : Charge horizontale.

M : Moment en tête de pieu.

Q_s : Frottement latéral.

Q_p : Résistance de pointe.

Q : Charge portante admissible du pieu en N.

q_p : Contrainte limite de pointe (en kPa)

q_s : Frottement latéral unitaire de la couche i (en kPa)

A : Section droite du pieu (en ml) ;

P : Périmètre du pieu (en m) :

n : nombre de conches traversées par le pieu ;

h : épaisseur de la couche i [en m)

C_u : Cohésion non drainée

β : Coefficient généralement ≤ 1

a : Terme constant ayant les dimensions d'une pression $a=0.05$ MPa.

λ : Coefficient de forme.

D : l'ancrage d'un pieu.

D_c : La profondeur critique.

N_{qmax}, N_{cmax} : Facteurs de force portante.

Φ' : L'angle de frottement interne.

N_{cmin} : Facteur de cohésion minimal

Q_{adm} : Charge admissible.

N : nombre de pieu.

Q_{gl} : Charge limite d'un groupe de pieux.

Q_{il} : Charges limites de chaque pieu isolé.

c_e : Coefficient d'efficacité.

d : L'entre-axe des pieux.

B : diamètre d'un pieu (m)

S : entre-axes (m),

m et n : nombre de lignes et de colonnes du groupe.

H : Hauteur de chute du mouton en m.

M : Masse du mouton en kg.

P : Masse du pieu en kg.

C : Enfouissement permanent ou refus moyen en m.

g : Accélération de la pesanteur en m/s.

F : Coefficient de sécurité.

e_1 : Raccourcissement élastique du pieu exprimé en m.

ξ_i, ξ'_i : Facteurs de corrélation.

S : Surface d'une zone comprenant.

$S_{réf}$: Valeur limite du tassement

R_k : Résistance limite en traction.

$\gamma_{R;d1}$: Coefficient partiel.

$\gamma_{R;d2}$: Coefficient partiel « modèle de terrain ».

A_b : Aire nominale de la section plane de la base du pieu ;

A_{si} : Aire nominale de la surface du pieu dans la couche de sol « i ».

$q_{b;k}$: Valeur caractéristique de la résistance par unité de surface de la base du pieu ;

$q_{si;k}$: Valeur caractéristique de la résistance par unité de fut du pieu dans la couche « i ».

$R_{b;k}$: Résistance de calcul en pointe ;

$R_{s;k}$: Résistance de calcul sur la surface latérale du fut.

P_l : Pression limite.

P_l^* : Pression limite nette.

P_{le}^* : Pression limite nette équivalente

E_m : Module pressiométriques.

k_p : Facteur de portance.

K_{Pmax} : Facteur maximale de pointe

q_0 : Pression verticale au repos du terrain.

q_p : Terme de pointe
 P_0 : Pression horizontale du terrain au repos.
 z : Profondeur.
 D : Longueur totale du pieu.
 B : Diamètre équivalent du pieu.
 D_{ef} : Hauteur d'encastrement équivalente.
 R_s : Charge limite de frottement latéral.
 $q_s^{(z)}$: Frottement latéral unitaire limite à la côte z .
 q_s : Frottement latéral unitaire limite.
 q_{smax} : Frottement latéral unitaire maximale limite.
 H : Hauteur est celle où s'exerce effectivement le frottement latéral
 q_u : Contrainte de rupture sous la pointe.
 k_c : Facteur de portance.
 q_{ce} : Résistance de pointe équivalente.
 $q_{cc}^{(z)}$: Résistance de pointe corrigée.
 q_{cm} : Valeur moyenne de la résistance de pointe.
 B : Est un coefficient.
 k_{cmin} : Facteur minimale de pointe.
 k_{cmax} : Facteur maximale de portance.
 f_{sol} : Fonction définie par les paramètres a , b et c .
 $\alpha_{pieu-sol}$: Paramètre adimensionnel qui dépend du type de pieu.
 $(R_c)_{moyen}$: Valeur de la moyenne arithmétique.
 $(R_c)_{min}$: Valeur minimale.
 $(R_s)_{min}$: Résistance moyenne de frottement axial.
 $R_{c;k}$: Valeur caractéristique de la portance.
 $R_{c;d}$: Capacité portance à l'ELU en compression.
 $R_{t;d}$: Capacité portance à l'ELU en traction.
 $\gamma_{s;t}$, γ_t : Facteurs partiels pour la résistance en traction.
 γ_s : Facteur partiel pour la résistance de pointe.
 γ_b : Facteur partiel pour la résistance de frottement axial.
 $R_{c,cr;d}$: Charge limite de fluage.
 γ_{cr} : Facteur partiel sur la charge de fluage de compression

$R_{c,cr;k}$: Valeur caractéristique de la charge de fluage en compression.

$\gamma_{s;cr}$: Facteur partiel sur la charge de fluage de traction.

$R_{t,cr;k}$: Valeur caractéristique de la charge de fluage en traction.

q_{sn} : Frottement négatif unitaire limite..

δ : Angle de frottement du contact sol-pieu.

K : Coefficient de pression des terres au contact sol/pieu

σ'_v : Contrainte verticale effective.

$\sigma'_0(z)$: Contrainte verticale effective au repos (avant travaux)

$\Delta\sigma'_v(z)$: Contrainte provoquant le tassement du sol.

$k \cdot \tan\delta$: coefficient empirique

G_{sn}^{max} : Frottement négatif maximal.

P : Périmètre du pieu,

D : Epaisseur du sol compressible, et

H : Epaisseur des remblais sus-jacents.

B : diamètre d'un pieu,

S : entraxe,

m et n : nombre de lignes et de colonnes du groupe.

R_{cg} : Résistance du groupe de pieux.

LISTE DES ABREVIATIONS

CEN : Comité européen de normalisation.

TC250 : Comité technique 250.

SC7 : Sous-comité 7.

EN : Européen Norme.

NF P 94-262 : Norme d'application nationale française relative aux fondations profondes.

ELU : Etats limites ultimes.

ELS : Etats limites de service.

IRS : Injection répétitive et sélective.

TGU : Injection globale et unitaire

CPT : Essai de pénétration statique.

L.C.P.C : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

AFNOR : Association française de normalisation

INTRODUCTION GENERALE

Les fondations sont des éléments fondamentaux dans un projet de construction car la pérennité de l'ouvrage dépend de leur qualité. Les fondations reprennent et transmettent au sol toutes les charges permanentes, accidentelles et charges d'exploitation. Il est donc important qu'elles soient calculées et réalisées avec le plus grand soin.

La mauvaise portance des sols est un problème majeur qui nous oblige de rechercher le type de fondation adaptée pour assurer la stabilité des structures.

Les fondations profondes sont largement utilisées pour les ouvrages situés dans des zones de mauvaise portance à travers leur ancrage dans le sol.

Ce projet de fin d'études s'est donné pour but l'étude des fondations profondes. Cet aspect est abordé en appliquant l'EUROCODE 7 spécifiques au domaine de la géotechnique. Savoir calculer des fondations profondes est très important surtout pour l'option Voies et Ouvrages d'Art en particulier et en génie-civil en général.

L'absence de cette partie du programme de notre programme de master nous a encouragés à choisir cette thématique. Notre objectif primordial est de présenter d'une façon pédagogique le calcul avec l'EUROCODE 7 et rendre l'utilisation par les étudiants et jeunes ingénieurs l'utilisation de la nouvelle réglementation de calcul des fondations profondes une chose aisée.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail sera divisé en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente quelques notions fondamentales sur les fondations profondes et plus exactement sur les pieux, les différents types et critères de choix de ces derniers et méthodes d'exécution. On a défini par la suite les méthodes classiques de calcul des fondations profondes.
- Le deuxième chapitre traite les méthodes de calculs des fondations profondes selon L'EUROCODE 7.
- Le troisième chapitre est consacré aux méthodes de calcul des pieux sous chargement axial, en mettant l'accent sur les différentes méthodes analytiques, et au calcul numérique en utilisant pour la première fois au département de génie civil le logiciel GEOFOND 1.22 (version d'évaluation complète mais limité dans le temps).

On clôture ce travail par une conclusion générale

Chapitre 1

1. Introduction

Les fondations profondes sont des éléments structuraux minces fichés dans le sol. Elles permettent de reporter les charges dues à la construction supportée sur des couches situées en profondeur.

Dans ce chapitre, on présentera des généralités sur les fondations profondes, leurs différents types, modes d'exécution et les méthodes de calcul classiques.

2. Classification des fondations

Une fondation est considérée comme profonde lorsque l'élanement est important. On distingue suivant le rapport D/B le type de fondations :

- Des fondations superficielles (semelles et radiers) lorsque $\frac{D}{B} < 4$.
- Des fondations semi-profondes (puits) lorsque $4 < \frac{D}{B} < 10$.
- Des fondations profondes (pieux) lorsque $\frac{D}{B} \geq 10$.

Avec :

D : profondeur de la base de la fondation par rapport au terrain naturel.

B : largeur ou diamètre de la fondation.

Au-delà de $D/B > 6$, et $D > 3$, nous sommes dans le domaine des fondations profondes (figure 1.1).

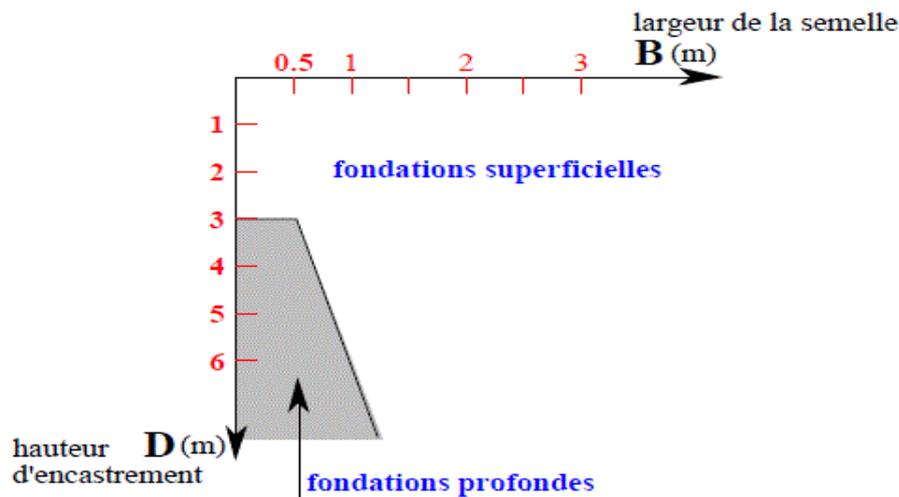


Figure 1.1 : Domaine des fondations (Frederic, 2008)

D'une manière générale, les fondations profondes sont souvent désignées par le terme de « pieu ».

3. Principe de fonctionnement d'une fondation profonde

Les fondations profondes mobilisent le sol :

- Par l'effort de pointe proportionnellement à leur section lorsqu'elles reposent directement sur le substratum.
- Par frottement latéral seul dans le cas de pieux flottants c'est-à-dire des pieux fichés dans une couche cohérente cas des sols argileux.
- Par frottement latéral et par effort de pointe lorsqu'il est impossible de descendre sur une couche suffisamment résistante.

4. Les pieux

4.1. Définition

Les pieux sont des éléments de construction longue à section circulaire ou polygonales, généralement noyés dans le sol.

Un pieu est une fondation élancée qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles. (Plumelle, 2005)

Les 3 parties principales d'un pieu sont **la tête, la pointe, et le fût** compris entre la tête et la pointe. La longueur d'ancrage h est la longueur de pénétration du pieu dans les couches de terrain résistantes. (Plumelle, 2005)

D'un point de vue mécanique on distingue la longueur D du pieu de la hauteur d'encastrement mécanique D_e (figure 1.2). Cette valeur de D_e tient compte du fait que les caractéristiques mécaniques de la couche d'ancrage sont nettement supérieures à celles des sols de couverture traversés par le pieu. (Plumelle, 2005)

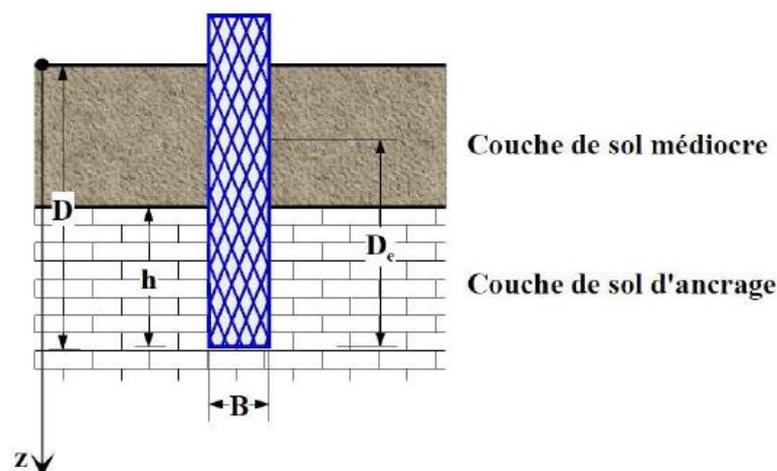


Figure 1.2 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique D_e

4.2. Classification des pieux

On distingue deux grandes classes des pieux selon le mode d'exécution et le mode de fonctionnement :

4.2.1. Classification suivant le mode d'exécution

a. Pieux refoulant le sol à la mise en place

Les principaux types de pieux entrant dans ce groupe sont tous les pieux battus ainsi que les pieux vissés :

- **Pieu battu préfabriqué :**

Ces pieux, préfabriqués en béton armé ou précontraint, sont fichés dans le sol par battage, ou vibro-fonçage (figure 1.3). (Bouguenina, 2017)



Figure 1.3 : Pieu battu préfabriqué

- **Pieux métalliques battus**

Ces pieux, entièrement métalliques, constitués d'acier **E24.2** ou similaire avec addition éventuelle de cuivre (0,2 à 0,5%), sont fichés dans le sol par battage. Leurs sections sont (figure 1.4) :

- En forme de H,
- En forme d'anneau (tube),
- En forme quelconque, obtenue par soudage de palplanche par exemple.

Ils ne sont classés dans cette catégorie que si leur base est obturée, sinon ils font partie des pieux particuliers. (Bouguenina, 2017)

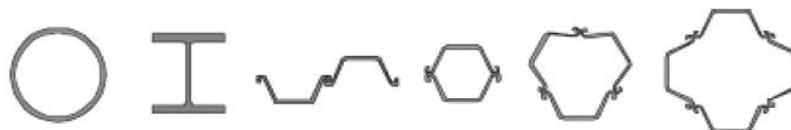


Figure 1.4 : Profils métalliques battus (Bouguenina, 2017)

- **Pieux en béton foncés**

Ces pieux sont constitués d'éléments cylindriques en béton armé, préfabriqués ou coffrés à l'avancement, de 0,50 m à 2,50 m de longueur et de 30 à 60 cm de diamètre.

Les éléments sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction. (Mrabent, 2016)

- **Pieux métalliques foncés**

Ces pieux, entièrement métalliques, sont constitués d'acier E 24.2 ou similaire avec addition éventuelle de cuivre (0,2 à 0,5%). Ils sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction. (Mrabent, 2016)

- **Pieux battus moulés**

Un tube, muni à sa base d'une pointe métallique ou en béton armé, ou d'une plaque métallique raidie ou d'un bouchon de béton, est enfoncé par battage sur un casque placé en tête du tube ou par battage sur le bouchon de béton. Le tube est ensuite rempli totalement de béton d'ouvrabilité moyenne, avant son extraction. Le cas échéant, ces pieux peuvent être armés (figure 1.5). (Bouguenina, 2017)



Figure 1.5 : pieux battus moulés

- **Pieux vissés moulés**

Ce procédé, qui ne s'applique pas aux sols sableux sans cohésion situés sous la nappe, en raison des éboulements importants qu'il risquerait de provoquer, consiste à faire pénétrer dans le sol, par rotation et fongage, un outil en forme de double vis surmonté d'une colonne cannelée. Cet outil est percé dans l'axe de la colonne cannelée et muni d'un bouchon. Au sommet de la colonne est disposé un récipient rempli de béton. L'extraction de l'outil est obtenue en tournant dans le sens inverse de celui de la pénétration. Le béton prend en continu, sous l'effet de la gravité, la place laissée par l'outil (Frank et al .2016).

- **Pieu vissé tubé**

Il s'agit d'un pieu vissé constitué d'un tube, d'un outil et d'une pointe perdus.

b. Pieux ne refoulant pas le sol à la mise en place

- **Pieux forés simples (barrette exécutée dans les mêmes conditions)**

Mis en œuvre à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc. Ce procédé, qui n'utilise pas de soutènement de parois, ne s'applique que dans des sols suffisamment cohérents et situés au-dessus des nappes phréatiques. (Bouguenina, 2017)

- **Pieux forés avec boue et barrettes**

Mis en œuvre à partir d'un forage préalable exécuté dans le sol, sous protection d'une boue de forage. Le forage est rempli de béton de grande ouvrabilité sous la boue, en utilisant une colonne de bétonnage selon la technique du tube plongeur qui descend jusqu'à la base du pieu (figure 1.6). Possibilité d'atteindre les grandes profondeurs (30 voire 40m).



Figure 1.6: Pieux forés avec boue

- **Pieux forés tubés**

Le procédé consiste à foncer préalablement un tubage, au sein duquel on réalise un forage, on coule le béton et on récupère graduellement le tubage.

- **Pieux tarières creuses**

Mis en œuvre avec une tarière à axe creux, d'une longueur totale au moins égale à la profondeur des pieux à exécuter, vissée dans le sol sans extraction notable de terrain.

La tarière est extraite du sol sans tourner pendant que, simultanément, du béton est injecté dans l'axe creux de la tarière, prenant la place du sol extrait (figure 1.7). (Bouguenina, 2017)

Le ferrailage est alors mis en place. Une combinaison de tarière creuse et du foré tubé, les deux éléments tournant en sens inverse, permet de réaliser un pieu dans le terrain ou le sol ne se tient pas (technique appelée pieu à la tarière double). (Bouguenina, 2017)



Figure 1.7: Pieux tarières creuses.

- **Les micros pieux**

Les micros pieux sont des pieux forés de diamètre inférieurs à 250 mm, généralement entre 76 et 200 mm, qui comportent des armatures centrales scellées dans un coulis de ciment travaillant uniquement au frottement latéral.

On classe D'après EUROCODE 7 suivant le matériel de forage et les techniques d'injection 4 types de micro pieux.

A côté de ces micros pieux, dont l'exécution est " normalisée" on utilise d'autres types de micro pieux, en particulier les micros pieux auto foreurs (figure 1.8).



Figure 1.8 : Les micros pieux

❖ Puits :

Fondations de grand diamètre creusées à sec. Les parois du forage sont soutenues par un blindage (Plumelle, 2005).



Figure 1.9 : Puits

4.2.2. Choix du type de pieux

Le choix du type de pieu dépend :

- La nature des couches rencontrées dans le terrain.
- La présence de la nappe phréatique ou de cavités souterraines.
- Des charges à reprendre.
- L'environnement du chantier.
- Coût d'exécution.
- Matériel et de la technicité de l'entreprise. (Hassini, 2016)

5. Mode de réalisation des pieux

Dans ce paragraphe, on va présenter les différents modes de réalisations de pieux. Ces modes sont synthétisés dans les tableaux de 1.1 à 1.5 :

5.1. Pieux forés simple : Forage sans blindage

Tableau 1.8: Mode de réalisation d'un pieu forés simple (Hasinavalona, 2013)

Pieux forés simple : forage sans blindage :	
1	Mise en fiche, réglage, préforage.
2	Mise en place d'un tubage provisoire partiel.
3	Forage à la tarière.
4	Ancrage au carottier.
5	Mise en place d'armatures partielles ou totales et bétonnage au tube plongeur introduit à l'intérieur de la cage d'armatures
6	Contrôle de l'arase béton.

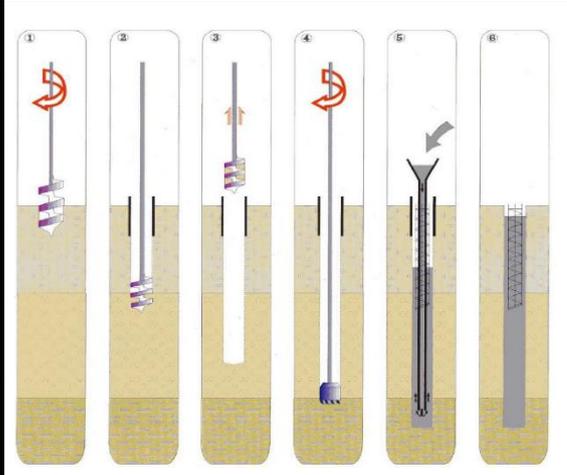


Figure 1.10 : pieux forés simple

5.2. Pieux forés tubés : Forage avec blindage métal

Tableau 1.9: Mode de réalisation d'un pieux forés tubes (Hasinavalona, 2013)

Pieux forés tubés : forage avec blindage métallique	
1	Mise en fiche, réglage, préforage.
2	Vibrofonçage du tube de travail (tube métallique provisoire non obturé à sa base)..
3	Forage et extraction des terres.
4	Mise en place des armatures (Partielles ou totales.).
5	Bétonnage au tube plongeur. En cas de présence d'eau, l'eau est chassée par le béton et récupérée en partie supérieure
6	Extraction du tube de travail

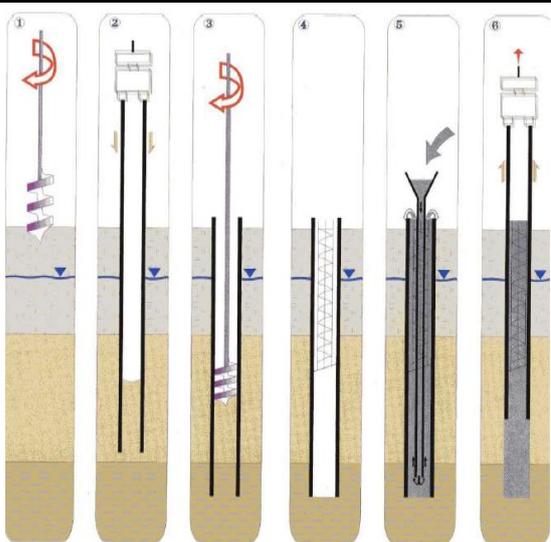


Figure 1.11 : pieux forés tubés

5.3. Pieux forés battus : Pieux à tube battu moulés dans le sol.

Tableau 1.10: Mode de réalisation d'un pieu battu (Hasinavalona, 2013)

Pieux forés battus : pieux à tube battu moulés dans le sol	
1	Mise en fiche, réglage, pose d'une plaque perdue.
2	Fonçage du tube par battage au mouton hydraulique ou diesel (compression du sol).
3	Forage et extraction des terres.
4	Mise en place des armatures (partielles ou totales.).
5	Bétonnage par tube Plongeur.
6	Extraction du tube de travail (avec vibration si nécessaire).

Figure 1.12: pieux battus

5.4. Pieux forés à la boue

Tableau 1.11 : Mode réalisation d'un pieu foré à la boue (Hasinavalona, 2013)

Forés à la boue	
1-Implantation, pré forage, mise en place de la virole.	
2-Mise en œuvre de la boue.	
3- Forage sous charge de boue.	
4-Recyclage de la boue, mises-en place des armatures, bétonnage au tube plongeur. La boue remonte par gravité, elle est récupérée et recyclée.	
5-Tube plongeur relevé par éléments, fin du bétonnage.	
6- Extraction virole, contrôle arase béton.	

Figure 1.13: pieux forés à la boue

5.5. Micropieux

Tableau 1.12: Mode de réalisation d'un micro pieu (Hasinavalona, 2013)

Pieux forés à la boue	
<p>1- Implantation, réglage et forage.</p> <p>2- Forage sous tubage ou boue suivant terrain.</p> <p>3- Mise en place d'armatures pouvant être équipées de manchettes pour l'injection de coulis de ciment sous pression.</p> <p>4- Scellement au coulis de l'armature. Le coulis sous pression envahit les failles du terrain.</p> <p>5- Recépage et soudure d'une plaque Pieux refoulant le sol à la mise en place.</p>	
<p>Figure 1.14 : pieu foré a la boue</p>	

6. Classification suivant le mode de fonctionnement

Les pieux agissent sur le sol soit par :

- Les pieux colonnes ou pieux de pointe : ils sont fichés dans une couche résistance très dure et travaillant en pointe.
- Effet de frottement latéral (Pieux flottants) : transmettent essentiellement leurs charges par frottement latéral et ne reposant pas sur une couche résistante.

Effet de pointe et frottement latéral (Pieux frottant à la base) : frottement latérale à la partie inférieur du fut qui doit s'ajouter à la résistance de pointe

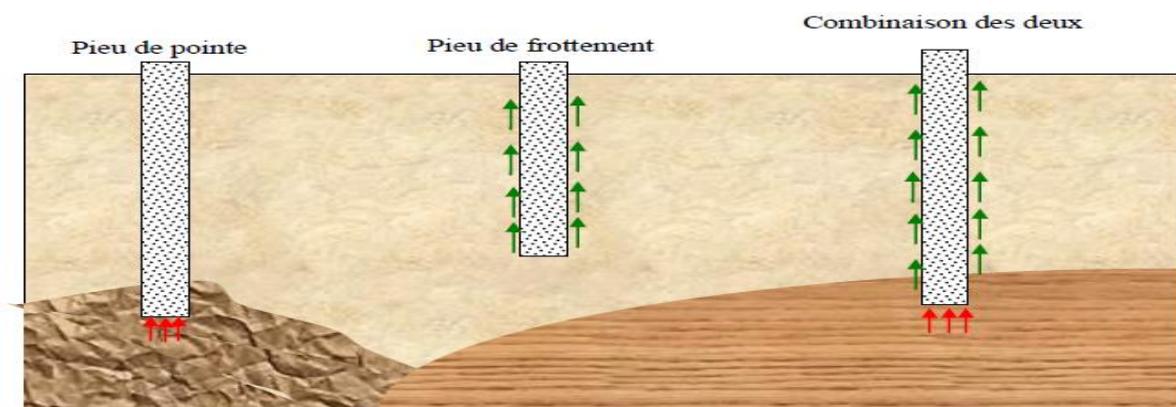


Figure 1.15 : Le mode de fonctionnement des pieux (Terfaya, 2019)

6.1. Les méthodes classiques de calculs des pieux

Il existe différentes méthodes de calcul des pieux, on peut distinguer :

- Utilisation des formules empiriques basées sur les résultats de battage des pieux.
- Chargement d'un ou plusieurs pieux réels puis on interprète les résultats des mesures in situ.
- Utilisation des formules statique des forces portantes établies à partir de la mécanique des sols.

6.1.1. Formule de battage

Le principe de l'approche dynamique est basé sur la relation entre la capacité portante du pieu et la résistance de celui-ci à la pénétration.

Il existe plusieurs formules qui relient l'énergie de battage à la résistance du pieu :

- Formule des Hollandais :
La formule des Hollandais est généralement utilisée pour des refus supérieur 5 mm (MONTCHO, 2005)

$$Q = \frac{1}{F} \times \frac{M^2 \times H}{e \times (M+P)} \times g$$

Avec :

- Q** : Charge portante admissible du pieu en N
- H** : Hauteur de chute du mouton en m ;
- M** : Masse du mouton en kg ;
- P** : Masse du pieu en kg ;
- e** : Enfoncement permanent ou refus moyen en m ;
- g** : accélération de la pesanteur en m/s ;
- F** : coefficient de sécurité, en général pris égal à 6.

- Formule de CRANDALL :

CRANDALL propose la formule suivante pour le calcul de la force portante d'un pieu.

$$Q = \frac{1}{F} \times \frac{M^2 \times H}{(e + \frac{e_1}{2}) \times (M+P)} \times g$$

Avec :

- e₁** : Raccourcissement élastique du pieu exprimé en m.
- F** : Coefficient de sécurité égal à 3.

6.1.2. Capacité portante d'un pieu

On peut définir la force portante d'un pieu comme la charge maximale qu'il peut supporter sans se rompre. On définit aussi la capacité portante Q , d'un sol qui est la charge maximale par unité de surface que ce dernier peut supporter. Au-delà de cette charge, le sol se rompt.

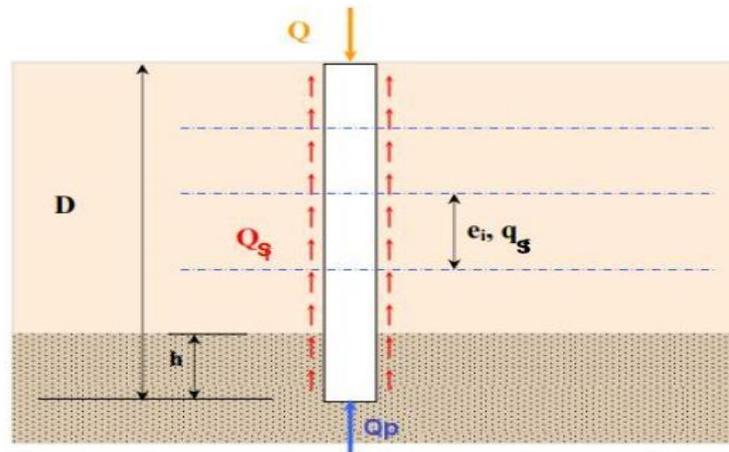


Figure 1.16: Comportement d'un pieu isolé soumis à une charge verticale

La charge limite Q_l supportée par une fondation profonde est décomposée en deux composantes: la charge limite de pointe $Q_p = A \times q_p$ correspondant au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite $Q_s = p \cdot \sum_i^n h_i \times q_{si}$ sous la base du pieu et la charge limite mobilisable par frottement entre le fût du pieu et le sol, d'où la formule suivante de Q_l :

$$Q_l = Q_p + Q_s$$

q_p : Contrainte limite de pointe (en kPa)

q_s : Frottement latéral unitaire de la couche i (en kPa)

A : Section droite du pieu (en m^2) ;

p : Périmètre du pieu (en m) ;

n : Nombre de couches traversées par le pieu ;

h : Epaisseur de la couche i [en m] ;

- **Frottement latérale :**

Le frottement latéral total est donné par la formule :

$$Q_s = p \cdot \sum_i^n h_i \times q_{si}$$

Avec

p : Périmètre du pieu

h_i : Épaisseur de la couche i ($h_i = D$ pour la couche d'ancrage)

q_{si} : Frottement latéral unitaire de la couche i

n : Nombre de couches traversées ou atteintes par le pieu.

Pour un milieu cohérent, le frottement latéral unitaire évalué à partir de la cohésion non drainée C_u par la formule :

$$q_s = \beta \cdot C_u$$

Avec β : Coefficient généralement ≤ 1 qui dépend de la cohésion et du type du pieu. Les valeurs de β sont données dans le *tableau 1.6*.

Tableau 1.13: Valeur maximal du coefficient β (Elgonnoui, 2009)

Type de pieu	Nature du fût	β
Pieux forés de gros diamètre	fût en béton	0.6
Pieux forés	fût en béton	0.7
	fût métal	0.5
Pieux battus	fût en béton	0.7
	fût métal	0.5
Pieux injectés	Faible pression	1
	Forte pression	1.5

- **Résistance de pointe**

Lorsque l'ancrage $D = D_c$ la contrainte limite de pointe est calculée de la manière suivante :

Pour les sols pulvérulents :

$$q_{pl} = \alpha \cdot N_{qmax} + \lambda \cdot N_{cmax}$$

α : Terme constant ayant les dimensions d'une pression $\alpha = 0.05$ MPa.

Pour les sols purement cohérents ($\phi_{uu} = 0$):

$$q_p = 7\lambda \cdot C_{uu}$$

λ : Coefficient de forme.

$\lambda = 1.3$ Pour les pieux à section circulaire ou carrée.

$\lambda = 1 + 1.3 \frac{B}{L}$ Pour les barrettes et parois de forme allongée (L = plus grande dimension de la section horizontale des fondations). (Hasinavalona, 2013)

c et **C_{uu}** : cohésion du sol de la couche d'ancrage.

D : l'ancrage d'un pieu.

D_c : La profondeur critique est la valeur de l'ancrage D à partir de laquelle la contrainte à la rupture sous la pointe de la fondation profonde n'augmente plus et atteint une valeur constante appelée : contrainte limite de pointe q_{pt} qui est fonction de la nature et de la compacité du sol.

On peut adopter les valeurs de D_c comme suit :

- Dans une monocouche (sol homogène) : $D_c = \max \{6B ; 3 \text{ mètres}\}$.
- Dans un multicouche vrai, l'ancrage critique sera pris égal à 3B.

N_{qmax} Et N_{cmax} : facteurs de force portante en fonctions de l'angle de frottement interne (Tableau 1.7).

Tableau 1.14: Les valeurs proposées par Caquot et Kérisel (Elgonnoui, 2009)

Φ' degré	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
N_{qmax}	1	1.8	3.4	6.5	13	26	57	134	355	1096
N_{cmax}	7	9.6	13.	20.6	32	54	97	190	421	1095
N_{cmin}	5.14	6.5	8.5	11	15	21	30	46	75	135

- Lorsque $D < D_c$, la résistance de pointe est déterminée par la formule :

$$q_p = \alpha \cdot \frac{D}{D_c} N_{qmax} + \lambda \cdot c \times [N_{cmin} + \frac{D}{D_c} (N_{cmax} - N_{cmin})]$$

Avec N_{cmin} : facteur de cohésion minimal

La notion de sécurité et charge admissible est déterminée en prenant un coefficient de sécurité de 3 pour la somme et 2 pour l'effet de point.

$$Q_{adm} = \frac{Q_p + Q_s}{3} \quad \text{et} \quad Q_{adm} = \frac{Q_p}{2}$$

7. Groupes de pieux

Les pieux sont dans la pratique, presque toujours battus ou forés par groupe. . Il convient donc d'étudier l'influence de ce voisinage sur la force portante de chaque pieu du groupe et le tassement de l'ensemble. Lorsque les pieux sont rapprochés, il ne suffit pas de vérifier la résistance d'un pieu considéré comme isolé. (MONTCHO, 2005)



Figure 1.17 : groupe de pieux ((Elgonnoui, 2009)

7.1. Effet de groupe sur la capacité portante

On considère ici essentiellement les pieux flottants, pour lesquels la résistance en frottement latéral est prépondérante vis-à-vis de la résistance en pointe.

Pour les pieux travaillant surtout en pointe, l'effet de groupe est presque inexistant : La charge transmise par l'ouvrage divisée par le nombre de pieu.

On définit en général un coefficient dit coefficient d'efficacité pour la détermination de la charge limite d'un groupe de pieux, qui est un coefficient correcteur qui s'applique à la force portante du pieu isolé et permet d'évaluer la force portante de l'un des pieux du groupe. Il se définit comme suit :

$$c_e = \frac{Q_{gl}}{\sum Q_{il}} = \frac{Q_{gl}}{N \cdot Q_{il}}$$

N : nombre de pieu.

Q_{gl} :Charge limite d'un groupe de pieux.

Q_{il} : Charges limites de chaque pieu isolé . (MONTCHO, 2005)

✓ Groupe dans un sol cohérent

a. L'entre-axe « **d** » des pieux est supérieur ou égale à trois fois le diamètre des pieux, «**d**≥3B » , le coefficient d'efficacité « **C_e** » est donné par :

- **La formule de Converse-Labarre:**

$$c_e = 1 - \frac{2 \cdot \arctan\left(\frac{B}{S}\right)}{\pi} \cdot \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n}\right)$$

Avec :

B : diamètre d'un pieu (m)

S : entre-axes (m),

m et n : nombre de lignes et de colonnes du groupe.

b. L'entre-axe « d » des pieux est inférieur à trois fois le diamètre des pieux, « $d \leq 3B$ »

On considère l'ensemble des pieux et le sol qu'ils enserrant comme une fondation massive fictive de périmètre P et de longueur D.

La charge limite de point Q_p se calcul comme celle d'une fondation superficielle ou profonde selon le rapport D/B. s'il existe une couche molle sous-jacente, il faut considérer la fondation comme fondée sur une bicouche

La charge limite du frottement latérale Q_s pour un milieu homogène est :

$$Q_s = P \cdot c_u \cdot D$$

c_u : Cohésion apparente

La capacité portante à retenir pour le groupe est alors la plus petite des deux valeurs suivantes :

- Capacité portante de la fondation massive fictive
- N fois la capacité portante du pieu isolé.

On trouve, en général, qu'il s'agit de la capacité portante de la fondation massive fictive dès que l'entre-axe est inférieur à 3 diamètres.

Par ailleurs, la transmission des contraintes en profondeur sous un groupe est différente de celle sous un pieu isolé. Il y a en effet, interférence des contraintes induites par chaque pieu et un effet radier apparaît dans la figure suivante :

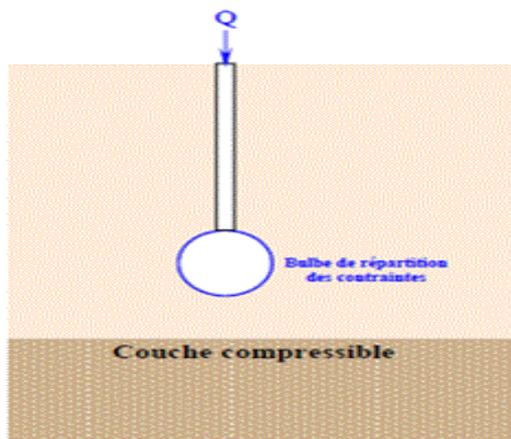


Figure 1.2: Pieu isolé

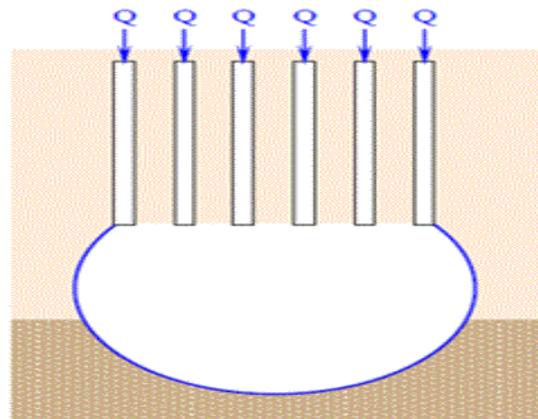


Figure 1.3: Groupe de pieux (Frederic, 2008)

7.2. Groupe dans un sol sans cohésion

Dans un sol pulvérulent, il y'a moins d'interaction entre les pieux d'un groupe

$$C_e = 1 ; \quad Q_l(\text{Groupe}) = N \times Q_l(\text{unité})$$

7.3. Tassement d'un groupe de pieux

- **Méthode de TERZAGUI :**

TERZAGHI a proposé la méthode suivante pour prévoir le tassement d'un groupe de pieux flottants, dans l'argile. On considère une semelle fictive située aux $\frac{2}{3}$ de la longueur des pieux et qui supporte la charge F appliquée à la semelle de liaison augmentée éventuellement, en fonction du cas de charge envisagé, du frottement négatif G_{sn} sur les pieux. (MONTCHO, 2005)

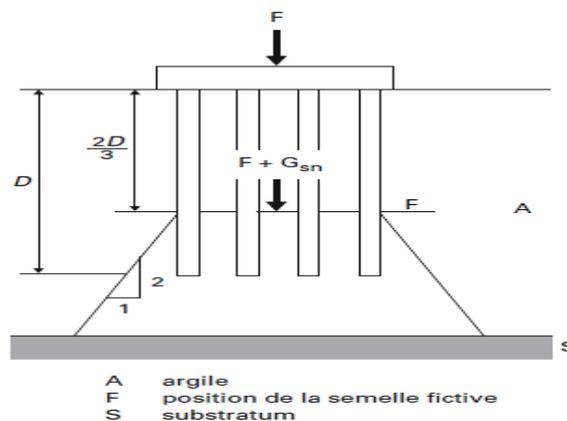


Figure 1.20 : Calcul de tassement d'un groupe de pieux ((Elgonnoui, 2009)

8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordés les principes généraux des fondations profondes. Nous avons présenté les différentes classes des pieux, que ce soit selon leurs modes d'exécution ou bien suivant le mode de fonctionnement, par la suite, on a donné les méthodes de calcul de la capacité portante des fondations profondes pour les sols pulvérulents et les sols cohérents pour les pieux isolés et groupe de pieux.

Le chapitre suivant sera consacré aux méthodes de calcul des fondations profondes avec l'Eurocode 7.

Chapitre 2

1. Introduction générale de L'Eurocode 7

Les Eurocodes dépendent, au niveau du comité européen de normalisation (CEN), du Comité technique 250 (TC250). Chaque Eurocode est géré par un sous-comité qui assure désormais les tâches de maintenance et de révision. Ainsi, l'Eurocode 7 (CEN, 2005) est géré par le sous-comité 7 du TC250 ; on parle alors de TC250/SC7. **(Burlon et al. 2017)**

La collection complète des « Eurocodes structuraux », établie dans le cadre des travaux du Comité technique 250 (TC250) du Comité européen de normalisation(CEN), comprend actuellement neuf volumes :

- Eurocode 0 – Bases de calcul des structures.
- Eurocode 1 – Bases du calcul et actions sur les structures.
- Eurocode 2 – Calcul des structures en béton.
- Eurocode 3 – Calcul des structures en acier.
- Eurocode 4 – Calcul des structures mixtes acier-béton.
- Eurocode 5 – Calcul des structures en bois.
- Eurocode 6 – Calcul des structures en maçonnerie.
- Eurocode 7 – Calcul géotechnique.
- Eurocode 8 – Résistance des structures au séisme.
- Eurocode 9 – Calcul des structures en alliage **(Burlon et al.2015)**.

L'Eurocode 7 est relatif au calcul géotechnique et à la reconnaissance des sols et des roches et établit des liens avec les normes élaborées au sein du TC288 (exécution des travaux géotechniques spéciaux) et du TC341 (reconnaissance des terrains et essais géotechniques). **(Burlon et al.2015)**.

Dans le cadre de l'application de l'Eurocode 7, la norme d'application nationale française relative aux fondations profondes NF P 94-262 est sur le point de se substituer aux anciennes règles de calcul pour les ouvrages d'art (Fascicule 62 Titre V) et les bâtiments (DTU 13.2) **(Baguelin et al.2012)**.

L'Eurocode 7 comprend deux parties :

- Une partie 1 : en rapport avec les règles générales, elle définit les bases du calcul géotechnique selon les Eurocodes ainsi que les principes de justification des différents ouvrages géotechniques.
- Une partie 2 : relative à la reconnaissance des terrains et aux essais géotechniques qui définit les différentes étapes du déroulement d'une étude géotechnique. Cette partie

correspond à la fusion de deux anciennes parties indépendantes : l'une traitant des essais géotechniques in situ et l'autre des essais de laboratoire (**Burlon et al. 2017**).

2. La norme « fondation profonde» NF P 94-262

La norme " Fondations profondes" NF P 94-262 Cette norme traite de la justification, sous l'Eurocode 7, des fondations profondes supportant des bâtiments, ouvrages, pylônes, mâts, cheminées et silos. Donne les principes de justification des fondations profondes d'ELU selon la démarche au calcul 2 et ELS. Les modèles de calcul fournis permettent d'aborder le comportement des fondations profondes soumises à des charges axiales et transversales. Les effets de groupe ont également été traités. Le cas des frottements négatifs et des poussées latérales provoqués par des charges asymétriques a également été traité. En ce qui concerne la portance, la norme donne des principes qui seront retenus pour justifier des techniques de renforcement des sols sous fondations superficielles qui ne peuvent se justifier en l'absence de ces éléments de renforcement.

3. Considération générales dans le calcul de la fondation profonde

Selon l'Eurocode 7 il existe 7 états limites ultimes à prendre en compte lors du calcul des fondations sur pieux :

- Stabilité d'ensemble.
- Capacité portante de la fondation sur pieux.
- Soulèvement ou résistance à la traction insuffisante de la fondation.
- Rupture du terrain due au chargement latéral de la fondation.
- Rupture du pieu.
- Rupture combinée du terrain et de la fondation.
- Rupture combinée du terrain et de la structure.

Il existe aussi quatre états limites de service à analyser lors du calcul des pieux :

- Tassement excessif du sol.
- Soulèvement excessif.
- Mouvement latérale excessif du sol.
- Vibrations inadmissibles (**Hassini, 2016**)

4. Principe de calcul des fondations profondes

Le calcul doit être fondé sur l'une des approches suivantes :

- Des résultats d'essais de chargement statique, dont l'adéquation a été démontrée pour des situations comparables par des calculs ou une autre méthode.
- Des méthodes empiriques ou analytiques validées par des essais de chargement statique dans des situations comparables.
- Des résultats d'essais de chargement dynamiques dont la validité a été démontrée par des essais de chargement statique dans des situations comparables (**Eurocode 7,1994**).

5. Considérations relative au calcul

- Le comportement des pieux isolés et des groupes de pieux ainsi que la raideur et la résistance de l'ouvrage reliant les pieux doivent être pris en compte.
- Lors du choix des méthodes de calcul et des valeurs des paramètres et lors de l'utilisation des résultats d'essais de chargement, la durée et la variation du chargement au cours du temps doivent être prises en compte.
- Les applications et suppressions de surcharges prévues ultérieurement et les variations éventuelles du régime des eaux souterraines doivent être pris en compte dans les calculs comme lors de l'utilisation des résultats d'essais de chargement.
- Le choix du type de pieu, y compris la qualité du matériau du pieu et la méthode d'installation (Eurocode 7,1994).

6. Justification des pieux sous charges axiales

6.1 Calcul à l'état limite

Le calcul doit démontrer que les types d'états limites suivants sont suffisamment improbables :

- Etats limites ultimes de capacité portante d'un pieu isolé (en compression et en traction) "résistance ultime".
- Etats limites ultime d'instabilité d'ensemble.
- Etats limites ultimes de ruine ou de dommage porté par la fondation à cause du déplacement de la fondation sur pieux.
- Etats limites de service dans l'ouvrage supporté à causes du déplacement des pieux (Eurocode 7,1994).

6.2 Capacité portante

❖ Portance ultime de calcul d'un pieu isolé

La capacité portante de calcul $R_{c;k}$ d'un pieu doit être établie à partir de la relation :

$$\text{En compression :} \quad R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k}$$

$$\text{En en traction :} \quad R_{t;k} = R_{s;k}$$

Avec :

$R_{t;k}$: La résistance en traction.

$R_{b;k}$: La résistance de calcul en pointe.

$R_{s;k}$: La résistance de calcul sur la surface latérale du fut.

$$R_{b;k} = q_b \cdot A \quad R_b \quad \text{et} \quad R_{s;k} = \sum_i^n q_{si} \cdot A_{si}$$

Avec :

A_b : Surface de base de la fondation.

A_{si} : L'aire du fût du pieu dans la couche i.

q_b : Résistance unitaire du sol sous la pointe.

q_{si} : Frottement axial unitaire limite dans la couche i.

6.3 Capacité portante ultime déduite d'essais de chargement de pieux

6.3.1 Essais de chargement statique

Pour les structures qui n'ont pas de capacité de transfert de charges des pieux faible aux pieux résistants, on doit vérifier au minimum l'équation suivante :

$$R_{c\backslash t;k} = \min \left\{ \frac{(R_m)_{moyen}}{\xi_1}; \frac{(R_m)_{min}}{\xi_2} \right\}$$

Ou :

ξ_1 et ξ_2 sont des facteurs de corrélation lié au nombre de pieux testés appliqués respectivement à la valeur moyenne $(R_m)_{moyen}$ et à la valeur minimale $(R_m)_{min}$ des valeurs R_k mesurées dans les divers essais de chargement sont obtenues à partir des relations :

$$\xi'_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{réf}}} \quad \text{avec } 100cm^2 \leq S \leq 2500cm^2$$

Les valeurs des facteurs de corrélation ξ'_1 et ξ'_2 sont présentées dans le **Tableau 2.1** :

Tableau 2.1 : Valeurs du coefficient de corrélation ξ'_1 et ξ'_2

ξ' pour N =	1	2	3	4	≥ 5
ξ'_1	1.40	1.30	1.20	1.10	1.00
ξ'_2	1.40	1.20	1.05	1.00	1.00

6.4 . Capacité portante ultime déduite des essais in-situ

6.4.1. Méthode préssiométriques

L'essai au Pressiomètre Ménard est un essai de chargement de sol in situ. Il consiste à dilater une sonde cylindrique, mise en place dans le terrain dans un forage. L'essai permet d'obtenir les caractéristiques du sol sont notamment déduites :

- La pression limite P_L .
- Le module préssiométriques. E_m .

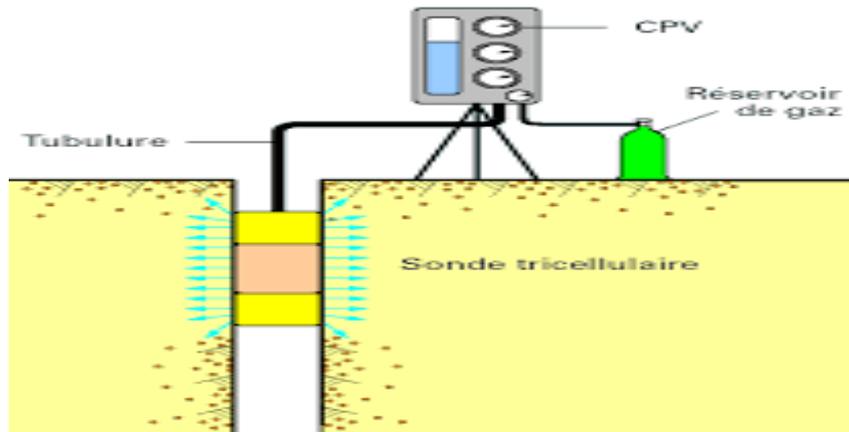


Figure 2.1 : Schéma d'un Pressiomètre Ménard (Luc, 2016)

On détermine séparément le terme de pointe et le frottement latéral :

❖ **Résistance de pointe**

Elle est déterminée par la relation :

$$R_b = q_b \cdot A_b$$

Où :

A_b : Surface de base de la fondation.

q_b : Résistance unitaire du sol sous la pointe

La résistance unitaire du sol sous la pointe est donnée par la formule :

$$q_b = k_p \cdot P_{le}^*$$

Où :

k_p : Facteur de portance.

P_{le}^* : Pression limite nette équivalente.

Selon L'Eurocode 7, la pression limite nette équivalente est calculée par l'expression :

$$P_{le}^* = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} P_l^*(z) dz$$

Avec :

$$a = \frac{B}{2} \text{ si } B > 1 \text{ m.}$$

$$a = 0.5 \text{ m si } B < 1 \text{ m.}$$

$b = \min \{a, h\}$ et h : sa longueur dans le terrain résistant .

z : est la profondeur, D la longueur totale du pieu dans le terrain, et B le diamètre équivalent du pieu (voir **Figure 2.2**).

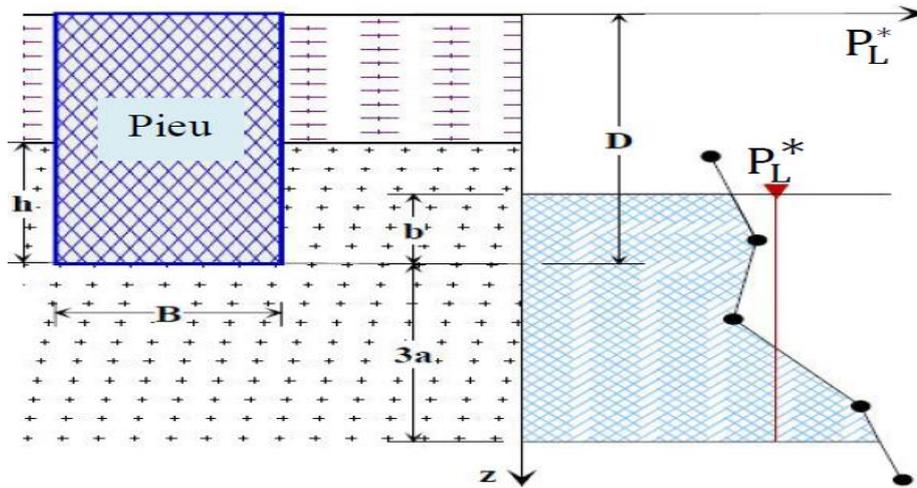


Figure 2.2 : Évaluation de la pression nette équivalente (Zamoum, 2015)

❖ **Facteur de portance k_p**

Le facteur de portance k_p est déterminé au moyen de la relation suivante :

$$k_p = \min \left(1 + [k_{pmax} - 1] \cdot \frac{D_{ef}}{5,5B} ; k_{pmax} \right)$$

Ou :

B : Largeur de la base du pieu.

D_{ef} : Hauteur d'encastrement équivalente par l'expression suivante :

$$D_{ef} = \frac{1}{P_{le}^*} \int_{d-10B}^D P_l^*(z) dz$$

$P_l^*(z)$: Est obtenue en joignant par des segments de droite sur une échelle linéaire les différents P_l^*

K_{pmax} : Facteur maximale de pointe (**Tableau 2.2**) qui traduit la proportionnalité entre la contrainte limite de point et la pression limite nette équivalente mesurée au pressiomètre. Il dépendant des classes et catégories de pieu (**Tableau 2.3**) ainsi que des catégories conventionnelles de sols (**Tableau 2.4**).

Tableau 2.2 : Facteur de portance K_{pmax} (AFNOR, 2012)

Terrain	Argile %CaCO3 < 30 % Limons Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roche altérée et fragmentée
1	1.15	1.10	1.45	1.45	1.45
2	1.30	1.65	1.60	1.60	2.00
3	1.55	3.20	2.10	2.10	2.10
4	1.35	3.10	2.30	2.30	2.30
5	1.00	1.90	1.40	1.40	1.20
6	1.20	3.10	2.20	2.20	1.50
7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.20
8	1.15	1.10	1.45	1.45	1.45

Pour les profilés métalliques foncés (pieux de classes 5, 6 et 7), l'aire de la pointe du pieu A_b est déterminée selon les indications de la figure

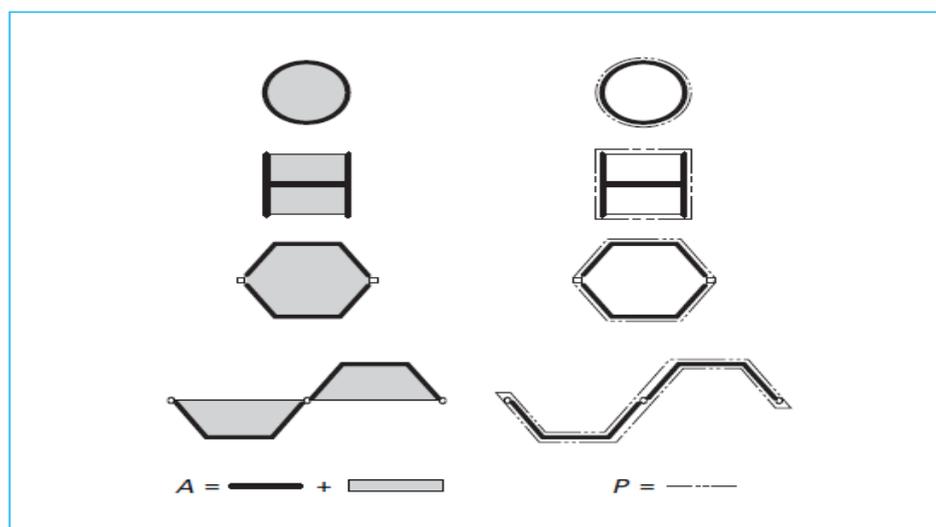


Figure 2.3 : Aire et périmètre pour les profilés métalliques foncés (pieux de classes 5, 6 et 7) (Roger et al. 1995).

Tableau 2.3 : Classes et catégories de pieux (AFNOR, 2012)

Classes	Catégories	Techniques de mise en œuvre
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)
	2	Foré boue (pieux et barrettes)
	3	Foré tubé (virole perdue)
	4	Foré tubé (virole récupérée)
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits
2	6	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation
3	7	Vissé moulé
	8	Vissé tubé
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)
	11	Battu moulé
	12	Battu acier fermé
5	13	Battu acier ouvert
6	14	Profilé H battu
	15	Profilé H battu injecté
7	16	Palplanches battues
1bis	17	Micropieu type I
	18	18 Micropieu type II
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)

Tableau 2.4 : Définition des catégories conventionnelles de sols (AFNOR, 2012).

Catégories de sol		P_l^* (MPa)
Argiles et limons (Q_1)	Très mous à mous	< 0,4
	Fermes	0,4 à 1,2
	Raides	1,2 à 2
	Très raides	≥ 2
Sols intermédiaires (sable limoneux, sable argileux, argile sableuse) (Q_2)	À placer dans la catégorie la plus proche	
Sables et graves (Q_3)	Très lâches	< 0,2
	Lâches	0,2 à 0,5
	Moyennement denses	0,5 à 1
	Denses	1 à 2
	Très denses	> 2
Craies (Q_5)	Molles	< 0,7
	Altérées	0,7 à 3
	Saines	≥ 3
Marnes et calcaires marneux (Q_6)	Tendres	< 1
	Raides	1 à 4
	Très raides	> 4
Roches (Q_7)	Altérées	2,5 à 4
	Fragmentées	> 4

❖ Frottement latéral

a. La charge limite de frottement latéral R_s

L'effort total limite mobilisable par frottement latéral sur toute la hauteur H concernée du fût du pieu est calculé par l'expression suivante :

$$R_s = P \int_0^H q_s(z) dz$$

Avec :

P : le périmètre du pieu

$q_s(z)$: Le frottement latéral unitaire limite à la côte z .

H : la hauteur de pieu dans le sol.

b. Frottement latéral unitaire limite q_s

Le frottement latéral unitaire limite est donnée fonction de la pression limite P_l^* par les courbes de (Figure 2.4).

Les tableaux (Tableau 2.3) et (Tableau 2.4) indiquent le choix de la courbe à utiliser en fonction de la nature du sol et du type de pieu.

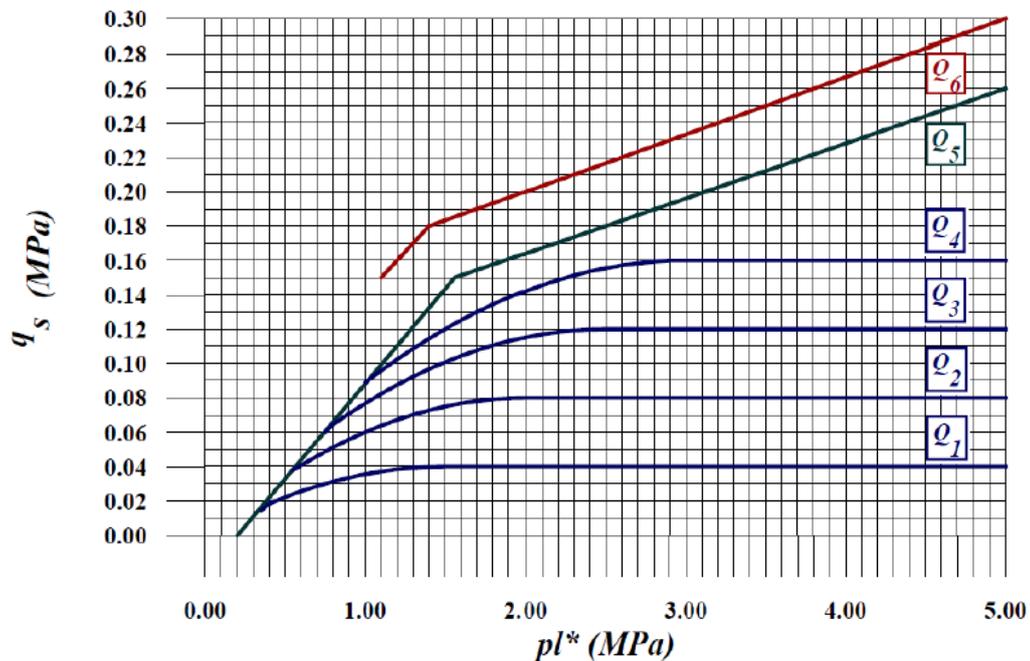


Figure 2.4 : Valeurs du frottement latéral unitaire (Moulouel, 2020)

6.4.2 L'essai de pénétration statique (CPT)

La méthode employée est la même que celle de la méthode préssiométriques, seuls les calculs de la résistance unitaire du sol sous la pointe q_b et le frottement latéral unitaire limite $q_s(z)$ diffèrent d'une méthode à l'autre.

❖ Résistance de pointe

La résistance de pointe est exprimée par :

$$R_b = q_b \cdot A_b$$

Où :

A_b : Surface de base de la fondation.

q_b : Résistance unitaire du sol sous la pointe

$$q_b = k_c \cdot q_{ce}$$

q_{ce} : Résistance de pointe équivalente, calculée par la formule.

$$q_{ce} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}^{(z)} dz$$

Avec :

$$a = \frac{B}{2} \text{ si } B > 1 \text{ m.}$$

$$a = 0.5 \text{ m si } B < 1 \text{ m.}$$

$$b = \min \{a, h\} \text{ et } h: \text{ sa longueur dans le terrain résistant .}$$

z : est la profondeur, D la longueur totale du pieu dans le terrain, et B le diamètre équivalent du pieu.

$q_{cc}^{(z)}$: Résistance de pointe corrigée obtenue en écrêtant le diagramme des $q_c^{(z)}$ mesurés à $1.3q_{cm}$.

q_{cm} : Valeur moyenne de la résistance de pointe, donnée par la formule suivante :

$$q_{cm} = \frac{1}{b + 3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_c^{(z)} dz$$

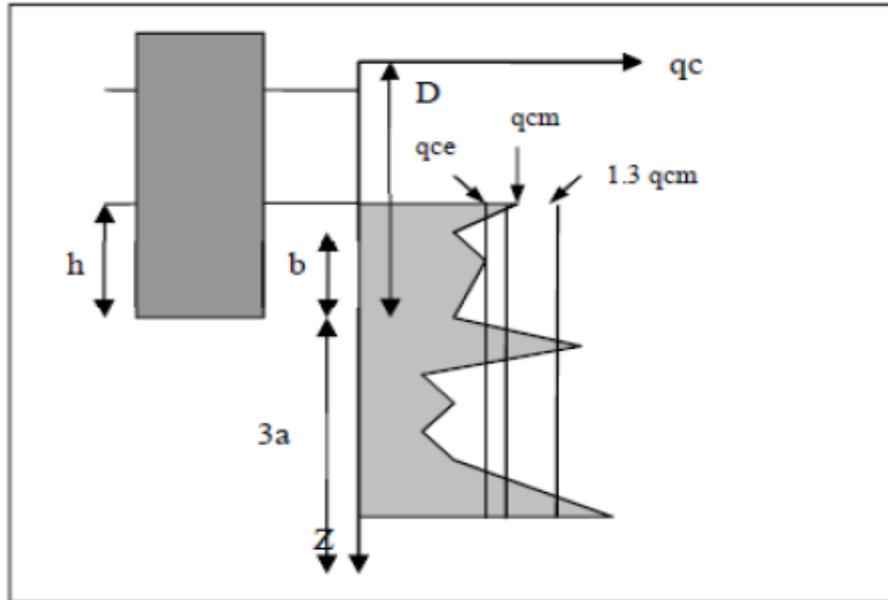


Figure 2.5 : Résistance de pointe équivalente (Moulouel, 2020)

k_c : Facteur de portance déterminé au moyen de la relation suivante :

$$k_c = \min \left(k_{cmin} + [k_{cmax} - k_{cmin}] \cdot \frac{D_{ef}}{5 \cdot B} ; k_{cmax} \right)$$

Où :

D_{ef} : Hauteur d'encastrement équivalente par l'expression suivante :

$$D_{ef} = \frac{1}{q_{ce}} \int_{D-10 \cdot B}^D q_{cc} (z) dz$$

k_{cmin} : Facteur minimales de pointe

Pour les argiles et limons $k_{cmin} = 0,30$.

Pour les sols intermédiaires. $k_{cmin} = 0,20$.

Pour les sables et graves $k_{cmin} = 0,10$.

Pour la craie, les marnes et les roches altérées et fragmentées $k_{cmin} = 0,15$.

k_{cmax} : Facteur de portance (Tableau 2.5), dépend de la nature du sol donnée par (Tableau 2.4) et du la classe du pieu (Tableau 2.3)

Tableau 2.5 : Facteur de portance k_{cmax} .

Terrain	Argiles %CaCO3 < 30 % Limons Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roche altérée et fragmentée
Classes de pieu					
1	0.4	0.3	0.2	0.3	0.3
2	0.45	0.3	0.25	0.3	0.3
3	0.5	0.5	0.5	0.4	0.35
4	0.45	0.4	0.4	0.4	0.4
5	0.35	0.3	0.25	0.15	0.15
6	0.4	0.4	0.4	0.35	0.2
7	0.35	0.25	0.15	0.15	0.15
8	0.45	0.3	0.2	0.3	0.25

❖ Frottement latéral

a. La charge limite de frottement latéral R_s

L'effort total limite mobilisable par frottement latéral sur toute la hauteur h concernée par le fût du pieu est calculé par :

$$R_s = P \int_0^H q_s^{(z)} dz$$

Avec :

P : le périmètre du pieu

$q_s^{(z)}$: Le frottement latéral unitaire limite à la côte z.

H : la hauteur de pieu dans le sol.

b. Frottement latéral unitaire limite q_s

La valeur de q_s est déterminée par l'expression suivante :

$$q_s = \min(\alpha_{\text{pieu-sol}} f_{sol}; q_{smax})$$

Avec :

f_{sol} : Fonction définie par les paramètres a, b et c, est également représentée sur

Figure 2.6

$$f_{sol} = (a \cdot q_c + b) (1 - e^{-c \cdot q_c})$$

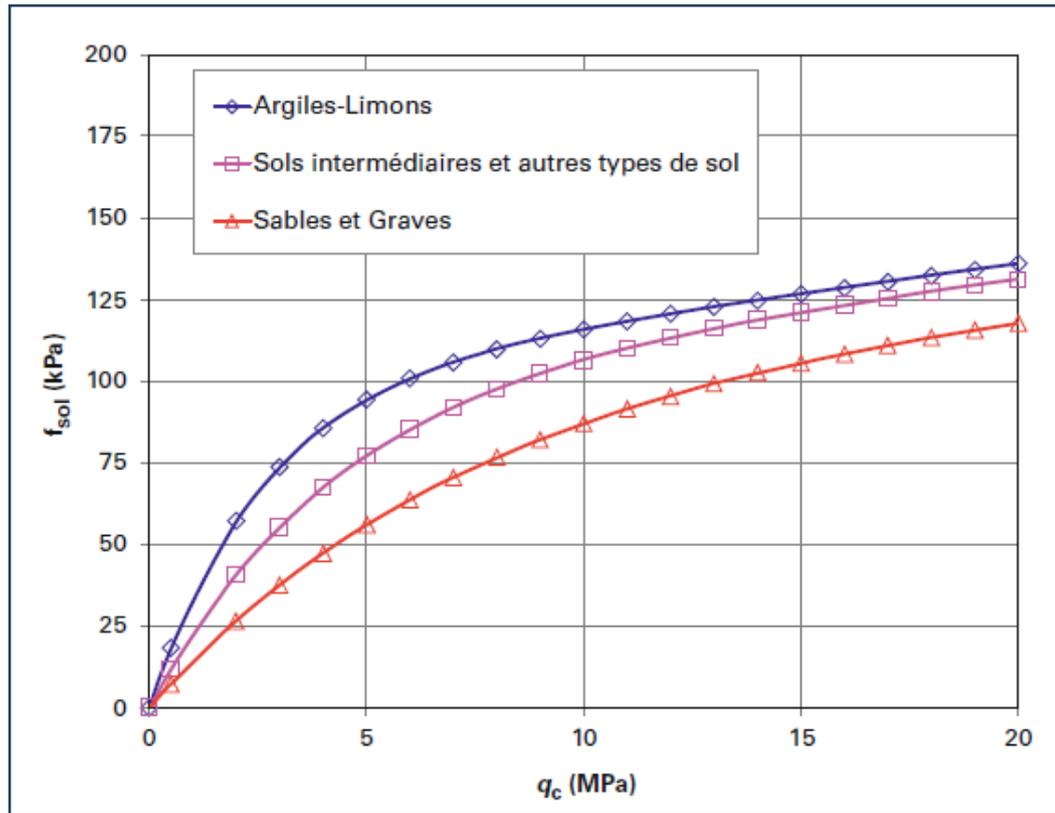


Figure 2.6 : Courbes f_{sol} pour la méthode pénétrométriques (Roger et al. 1995).

Les paramètres a, b, c et $\alpha_{pieu-sol}$ sont présentés dans **Tableau 2.6**

Tableau 2.6 : Les valeurs a, b, c pour la méthode pénétration statique

Types de sol	Argiles & % CaCO3 < 30 % Limons	Sols intermédiaires	Sable & Gravelle	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roche altérées ou fragmentées
a	0.0018	0.0015	0.0012	0.0015	0.0015	0.0015
b	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.15
c	0.40	0.25	0.15	0.25	0.25	0.25

$\alpha_{pieu-sol}$: Paramètre adimensionnel qui dépend du type de pieu (**Tableau 2.3**) et du type de sol (**Tableau 2.4**). Ce paramètre est défini dans le tableau suivant :

Tableau 2.7 : Valeurs du paramètre α pieu-sol pour la méthode pénétrométriques.

Catégories de pieux	Types de sols					
	Argiles % CaCO ₃ < 30 % Limons	Sols Intermédiaire s	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roches altérées ou fragmentées
1	0.55	0.65	0.70	0.80	1.40	1.50
2	0.65	0.0	1.00	0.80	1.40	1.50
3	0.35	0.40	0.40	0.25	0.85	–
4	0.65	0.80	1.00	0.75	1.30	–
5	0.70	0.85	–	–	–	–
6	0.75	0.90	1.25	0.95	1.50	1.50
7	0.95	1.15	1.45	0.75	1.60	–
8	0.30	0.35	0.40	0.45	0.65	–
9	0.55	0.65	1.00	0.45	0.85	–
10	1.00	1.20	1.45	0.85	1.50	–
11	0.60	0.70	1.00	0.95	0.95	–
12	0.40	0.50	0.85	0.20	0.85	–
13	0.60	0.70	0.50	0.25	0.95	0.95
14	0.55	0.65	0.70	0.20	0.95	0.85
15	1.36	1.60	2.00	1.10	2.25	2.25
16	0.45	0.55	0.55	0.20	1.25	1.15
17	–	–	–	–	–	–
18	–	–	–	–	–	–
19	1.35	1.60	2.00	1.10	2.25	2.25
20	1.70	2.05	2.65	1.40	2.30	2.90

q_s Est limité par les valeurs maximales q_{smax} définies dans **Tableau 2.8** suivant :

Tableau 2.8 : Valeurs maximales du frottement axial unitaire limite q_{smax} pour les méthodes pénétrométriques.

Catégorie de pieux	q_{smax} en kPa					
	Argile % $C_8 CO_3 < 30\%$ Limons	Sols intermé diaires	Sables Graves	Craies	Marnes et calcaires marneux	Roches altérées ou fragmenté es
1	90	90	90	200	170	200
2	90	90	90	200	170	200
3	50	50	50	50	90	----
4	90	90	90	170	170	----
5	90	90	----	----	----	----
6	90	90	170	200	200	200
7	130	130	200	170	170	----
8	50	50	90	90	90	----
9	130	130	130	90	90	----
10	170	170	260	200	200	----
11	90	90	130	260	200	----
12	90	90	90	50	90	----
13	90	90	50	50	90	90
14	90	90	130	50	90	90
15	200	200	380	320	320	320
16	90	90	50	50	90	90
17	----	----	----	----	----	----
18	----	----	----	----	----	----
19	200	200	380	320	320	320
20	200	200	440	440	440	500

6.5 Capacité portante ultime d'après des résultats des essais exécutés sur le sol

6.5.1 Procédure du pieu 'modèle'

À partir des résultats de N profils d'essais préssiométriques ou pénétrométriques fournissant des valeurs $R_{c;t,k}$, cette procédure propose de calculer au moyen d'un modèle de calcul dont la pertinence est établie par ailleurs :

- ✓ la valeur de la moyenne arithmétique $(R_c)_{moyen}$.
- ✓ la valeur minimale $(R_c)_{min}$.
- ✓ Résistance moyenne de frottement axial $(R_s)_{min}$
- ✓ La valeur caractéristique est obtenue à partir de facteurs de corrélation ξ_3 et ξ_4

❖ Valeur caractéristique de la portance $R_{c;k}$

$$R_{c;k} = \frac{1}{\gamma_{R.d1}} \min\left\{ \frac{(R_c)_{moyen}}{\xi_3}; \frac{(R_c)_{min}}{\xi_4} \right\}$$

Avec :

$$R_{c;moy} = (R_b + R_s)_{moy} \quad \text{et} \quad R_{c;min} = (R_b + R_s)_{min}$$

- Les valeurs des facteurs de corrélation ξ_3 et ξ_4 sont obtenues à partir des relations suivantes :

$$\xi'_i(N, S) = 1 + [\xi'_i(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{réf}}} \quad \text{avec} \quad 625m^2 \leq S \leq 2500m^2$$

S : Surface d'investigations géotechniques.

$S_{réf}$: correspond à une surface de référence prise égale à 2500 m².

- Les valeurs des facteurs de corrélation ξ'_3 et ξ'_4 sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2.9 : Valeurs du coefficient de corrélation ξ'_3 et ξ'_4

ξ' pour N	1	2	3	4	5	7	10
ξ'_3	1.40	1.35	1.33	1.31	1.29	1.27	1.25
ξ'_4	1.40	1.27	1.23	1.20	1.15	1.12	1.08

Le coefficient partiel $\gamma_{R.d1}$ est défini au **Tableau 2.10** suivant :

Tableau 2.10 : Valeurs du coefficient partiel $\gamma_{R.d1}$

	Compression $\gamma_{R.d1}$		Traction $\gamma_{R.d1}$	
	Modèle Pressiométrique	Modèle pénétrométrique	Modèle pressiométrique	Modèle pénétrométrique
Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 a 7 hors pieux de catégories 10 et 15	1.15	1.18	1.40	1.45
Pieux ancrés dans la craie de classe 1 a 7 hors pieux de catégories 10, 15, 17, 18, 19 et 20	1.40	1.45	1.70	1.75
Pieux de catégories 10, 15, 17, 18, 19 et 20	2.0	2.0	2.0	2.0

❖ **Résistance de frottement axial caractéristique $R_{s;k}$**

$$R_{s;k} = \frac{(R_s)_{moyen}}{(R_c)_{moyen}} * R_{c;k}$$

❖ **Résistance de pointe caractéristique $R_{b;k}$**

$$R_{b;k} = \frac{(R_b)_{moyen}}{(R_c)_{moyen}} * R_{c;k}$$

❖ Capacité portance à l'ELU

En compression :

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_t} + \frac{R_{b;k}}{\gamma_t}$$

En traction :

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s;t}} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_{s;t}}$$

Avec :

$\gamma_{s;t}$, γ_t : Facteurs partiels pour la résistance en traction sont notés dans le **Tableau 2.11** suivant :

Tableau 2.11 : facteurs partiels pour la résistance en traction et compression

	$\gamma_{s;t}$	γ_t
Situations durables et transitoires ou situations sismiques	1.15	1.1
Situations accidentelles	1.05	1.0

6.5.2 Procédure du modèle de terrain

Elle consiste à déduire la valeur de portance d'un pieu à partir d'un modèle géotechnique du site comprenant les valeurs représentatives de R_b et R_s .

❖ Résistance de pointe caractéristique $R_{b;k}$

$$R_{b;k} = \frac{R_b}{\gamma_{R;d1} \gamma_{R;d2}}$$

Avec :

R_b : Résistance de pointe .

$\gamma_{R;d1}$: Coefficient partiel est défini au **Tableau 2.10**.

$\gamma_{R;d2}$: Coefficient partiel est à appliquer uniquement dans le cadre de la procédure du « modèle de terrain ». Sa valeur est fixée à **1,1**.

➤ Résistance de frottement axial caractéristique $R_{s;k}$

$$R_{s;k} = \frac{R_s}{\gamma_{R;d1} \gamma_{R;d2}}$$

Avec :

R_s : Résistance de frottement axial .

$\gamma_{R;d1}$: Coefficient partiel est défini au **Tableau 2.10**.

$\gamma_{R;d2}$: Coefficient partiel est à appliquer uniquement dans le cadre de la procédure du modèle de terrain . Sa valeur est fixée à **1,1**.

❖ **Capacité portante à l'ELU**

En compression :

$$R_{c;d} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} + \frac{R_{b;k}}{\gamma_b}$$

En traction :

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s;t}}$$

Avec :

$R_{t;k}$: Valeur caractéristique de la résistance en traction du pieu.

γ_s : Facteur partiel pour la résistance de pointe.

γ_b : Facteur partiel pour la résistance de frottement axial (**Tableau 2.12**).

$\gamma_{s;t}$: Facteur partiel pour la résistance en traction (**Tableau 2.11**).

Tableau 2.12 : Valeurs de facteurs partiels γ_b , γ_s :

	γ_b	γ_s
Situations durables et transitoires ou situations sismiques	1.1	1.1
Situations accidentelles	1.0	1.0

❖ **Charge limite de fluage à l'ELS**

La courbe (**Figure 2.7**) représentant la charge appliquée au pieu en fonction de l'enfoncement présente une partie sensiblement linéaire se limitant à une charge $R_{c,cr;d}$ appelée charge limite de fluage. Pour les charges supérieures à $R_{c,cr;d}$ enfoncement du pieu ne se stabilise plus dans le temps à charge constante.

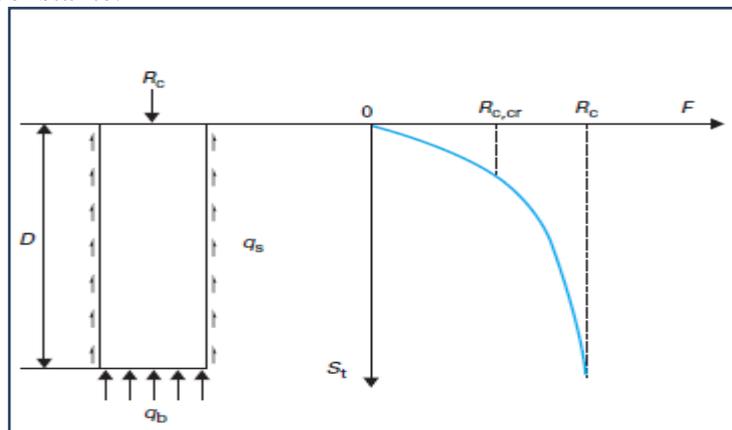


Figure 2.7 Courbe de chargement axial d'un pieu (Roger et al. 1995)

En compression :
$$R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$$

Avec :

γ_{cr} : Facteur partiel sur la charge de fluage de compression **Tableau 2.13**

$R_{c;cr;k}$: Valeur caractéristique de la charge de fluage en compression.

➤ Pour les pieux travaillant en compression :

Avec refoulant le sol :

$$R_{c;cr;k} = 0.7R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$$

Sans refoulant pas le sol :

$$R_{c;cr;k} = 0.5R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$$

En traction :
$$R_{t;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$$

$\gamma_{s;cr}$: Facteur partiel sur la charge de fluage de traction **Tableau 2.13**

$R_{t;cr;k}$: Valeur caractéristique de la charge de fluage en traction.

$$R_{t;cr;k} = 0.7R_{s;k}$$

Tableau 2.13 : facteurs partiels pour la résistance en traction et compression

	γ_{cr}	$\gamma_{s;cr}$
Combinaisons caractéristiques	0.9	1.1
Combinaisons quasi-permanentes	1.1	1.5

6.6. Tassement d'un pieu isolé

Le tassement des pieux isolés sous des charges normales est généralement faible et ne constitue pas un paramètre de calcul déterminant pour la plupart des structures.

En effet, des méthodes purement empiriques permettent une estimation approximative du tassement.

L'analyse des essais de charge des pieux par le LCPC a montré que pour la charge $R_c \leq 0,7R_{c.cr}$ (R_c ; représente la charge verticale critique ou fluage), et pour les pieux de 6 à 45 m de longueur le diamètre varie entre 0,30 m et 1,5 m, nous définir une valeur limite Pour le tassement mentionné sous charge de référence :

- Pieux forés : $s = 0,006B$ (avec des valeurs extrêmes de $0,003B$ à $0,010B$).
- Pieux battus : $s = 0,009B$ (avec des valeurs extrêmes de $0,008B$ à $0,012B$).

6.7. Frottement négatif

Le frottement latéral du sol sur le pieu résulte d'un déplacement relatif entre le pieu et le sol.

Si le sol se déplace plus vite que le pieu (terrain médiocre qui tasse sous des surcharges appliquées au niveau de la surface du sol), le sol en tassant entraîne le pieu vers la bas et lui applique un frottement négatif voir **Figure 2.8**. Ce dernier conduit à une surcharge sur le pieu au lieu de contribuer à sa capacité portante.

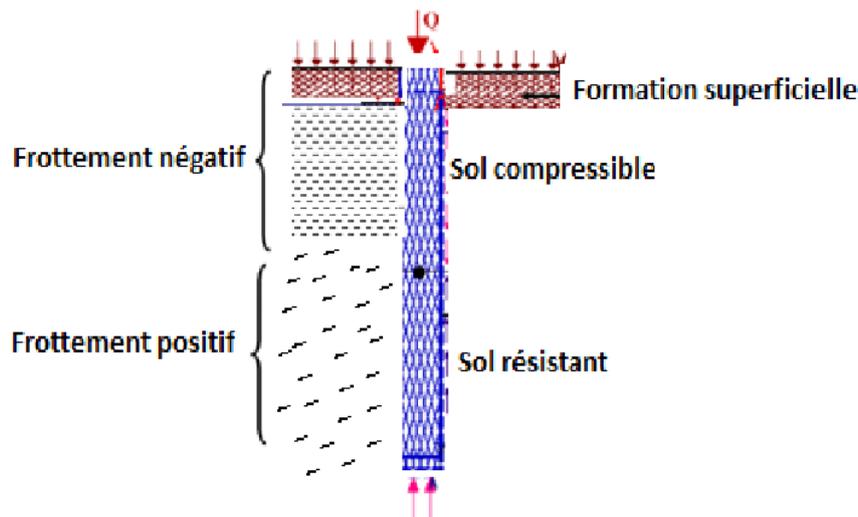


Figure 2.8 : Frottement négatif (Bourokba Mrabent, 2015)

6.7.1. Frottement négatif unitaire limite q_{sn}

Dans les zones de frottement négatif (tassement du sol supérieur au tassement du pieu), la valeur limite unitaire q_{sn} est donnée par la formule :

$$q_{sn}(z) = k \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v(z)$$

Ou :

δ : Angle de frottement du contact sol-pieu.

K : Coefficient de pression des terres au contact sol/pieu

σ'_v : Contrainte verticale effective.

$$\sigma'_1(z) = \sigma'_0(z) + \Delta \sigma'_v(z)$$

Avec :

$\sigma'_0(z)$: Contrainte verticale effective au repos (avant travaux)

$\Delta \sigma'_v(z)$: Contrainte provoquant le tassement du sol.

$k \cdot \tan \delta$: coefficient empirique dépendant du type de sol et du mode de mise en œuvre

Tableau 2.14

Pour les pieux de bitume, le produit $k \cdot \tan \delta$ est pris égal à 0,05 au maximum.

Tableau 2.14 : Valeurs du coefficient $k \cdot \tan \delta$

		Pieux tubés	Pieux forés	Pieux battus
Tourbes	Sols organiques	0.10	0.15	0.20
Argiles et limons	Mous	0.10	0.15	0.20
	Fermes et durs	0.15	0.20	0.30
Sables et graves	Très lâche	0.35		
	Lâches	0.45		
	Compacts	1.00		

6.7.2. Frottement négatif maximal G_{sn}^{max}

Le frottement négatif maximal est donné par la formule :

$$G_{sn}^{max} = \int_{-H}^D P \cdot q_{sn}(z) \cdot dz$$

Avec :

P : Périmètre du pieu,

D : Epaisseur du sol compressible, et

H : Epaisseur des remblais sus-jacents.

7. Comportement des groupes de pieux

La norme NF P 94-262 propose des modifications dont il y a lieu de tenir compte concernant :

- la force portante, sous sollicitations axiales ;
- le tassement ;
- le frottement négatif ;
- le comportement transversal et les poussées transversales du sol. (Roger et al. 1995)

7.1. Comportement axiale

❖ Capacité portante d'un groupe de pieux

C'est la différence de la somme des capacités portantes de chaque pieu constituant ce groupe. La vérification de la portance d'un groupe de pieux est demandée quand l'entraxe entre chaque pieu est inférieur à 3 diamètres (pour les tassements). (Roger et al. 1995). Approche utilisée pour la justification sont :

- Un coefficient d'efficacité c_e quantifie la réduction par la résistance de seul frottement R_s des pieux, pour un entraxe inférieur à 3 diamètres (AFNOR, 2012) :

$$c_e = 1 - c_d * \left(2 - \frac{1}{m} - \frac{1}{n}\right) \text{ et } c_d = 1 - \frac{1}{4} (1 + S/B)$$

Avec :

B : diamètre d'un pieu,

S : entraxe,

m et **n** : nombre de lignes et de colonnes du groupe.

La résistance du groupe de pieux est alors :

$$R_{cg} = N (R_b + c_e \cdot R_s) \text{ et } N = n \times m$$

R_b : La somme des résistances de pointe des pieux isolés.

R_s : Résistance par frottement sur cette fondation fictive

8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a pu voir des notions générales sur l'Eurocode 7, ainsi que la norme « fondation profonde » NF P 94-262 en détail. Cette étude nous a permis de voir que l'évaluation de la capacité portante sous charges axiales passe par la détermination de la résistance en pointe du pieu, et le frottement latéral du pieu. Aussi, ce chapitre nous a permis de voir les différentes méthodes de calcul de la capacité portante d'un pieu isolé et groupe de pieux. On a pu faire un rappel sur le frottement négatif des pieux, le tassement de façon générale.

Dans le dernier chapitre, on va utiliser un logiciel de calcul de fondations profondes utilisant l'Eurocode 7. Ces applications sont à des fins pédagogiques afin de permettre aux futurs ingénieurs de se familiariser avec cet outil de calcul.

Chapitre 3

1. Introduction

Dans ce chapitre, dans une première étape un calcul analytique de la capacité portante des fondations profondes sera réalisé en utilisant la méthode pressiométriques et pénétrométriques statique, modèle de pieu et modèle de terrain.

Ensuite, nous utilisons un modèle numérique en exploitant le logiciel GEOFOND1.22. Ce logiciel permet de calculer la capacité portante de fondation profonde par la méthode de calcul donnée par la norme NF P 94-262, fascicule 62 titre V et du DTU 13.2.

On précisera que ce logiciel est utilisé pour la première fois au département de génie civil, ce qui a demandé un certain temps pour apprendre à l'utiliser correctement.

2. Calcul analytique de la capacité portante

A partir de l'Eurocode 7 à l'ELU, nous avons établi un organigramme détaillé de la méthode de calcul afin de simplifier l'utilisation de cette méthode aux ingénieurs praticiens. On présentera ci-après les deux méthodes de calcul qui sont pressiométriques et pénétrométriques statique.

La méthode de calcul basé sur l'essai pressiométriques est pratiquement recommandée dans tous les types de sol exceptés pour les graviers et les sols très compressibles, tandis que celle basée sur l'essai pénétrométriques est recommandé dans les argiles molles et les sables.

2.1 Méthode Pressiométriques

On présente ci-après l'organigramme de calcul basé sur l'essai pressiométriques :

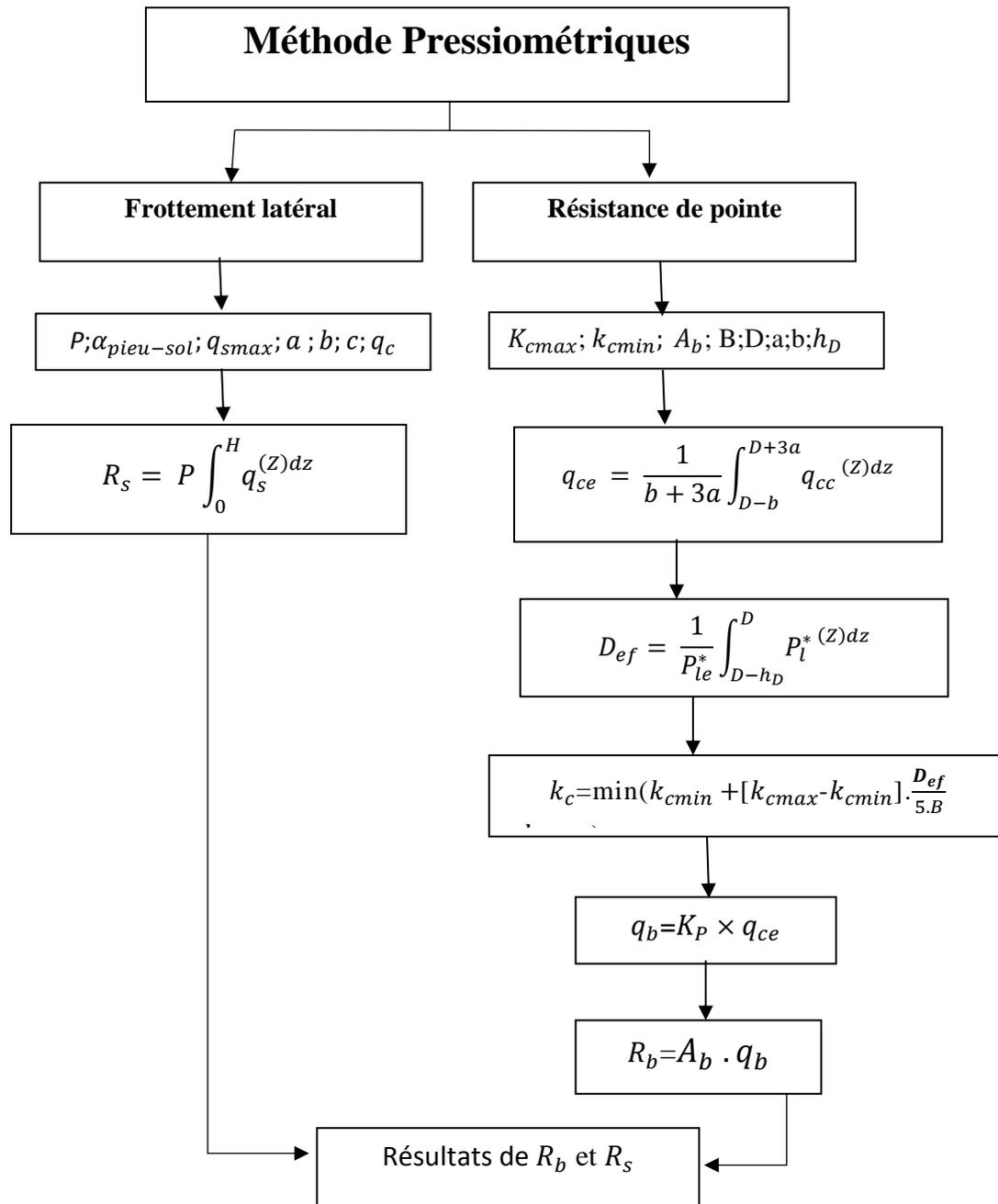


Figure 3.1 : Organigramme de la méthode pressiométrique

➤ 2.1.1. Méthode de terrain

Cet organigramme de calcul basé sur la procédure de terrain qui consiste à déduire d'un modèle géotechnique du site les paramètres suivants :

➤ Calcul de résistance de point en traction et compression :

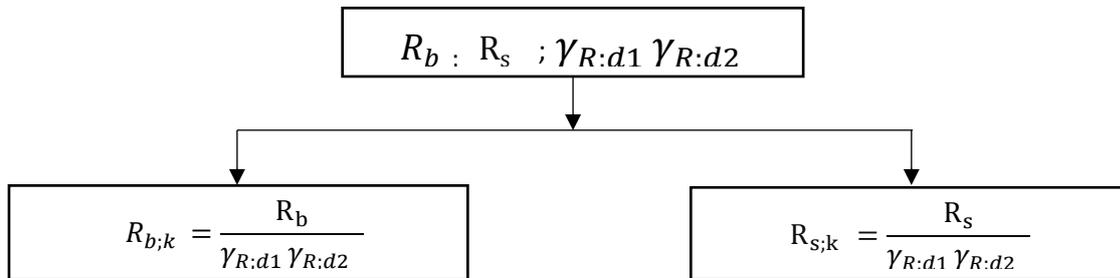


Figure 3.2 : organigramme de resistance de pointe

➤ Calcul de capacité portance a ELU

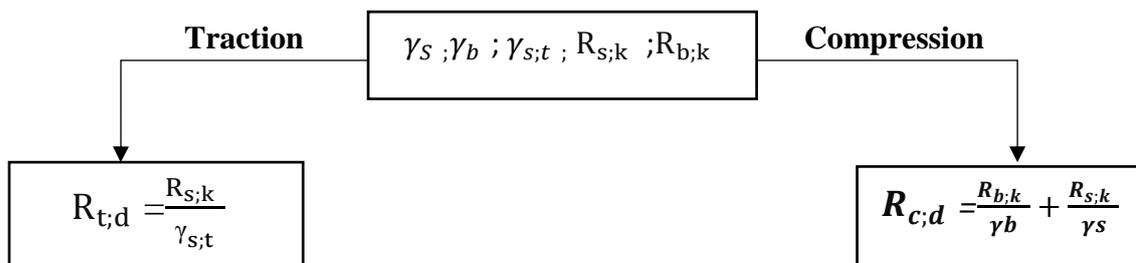


Figure 3.3 : Organigramme de calcul de capacité portance a ELU

➤ Calcul de la charge de fluage à l'ELS

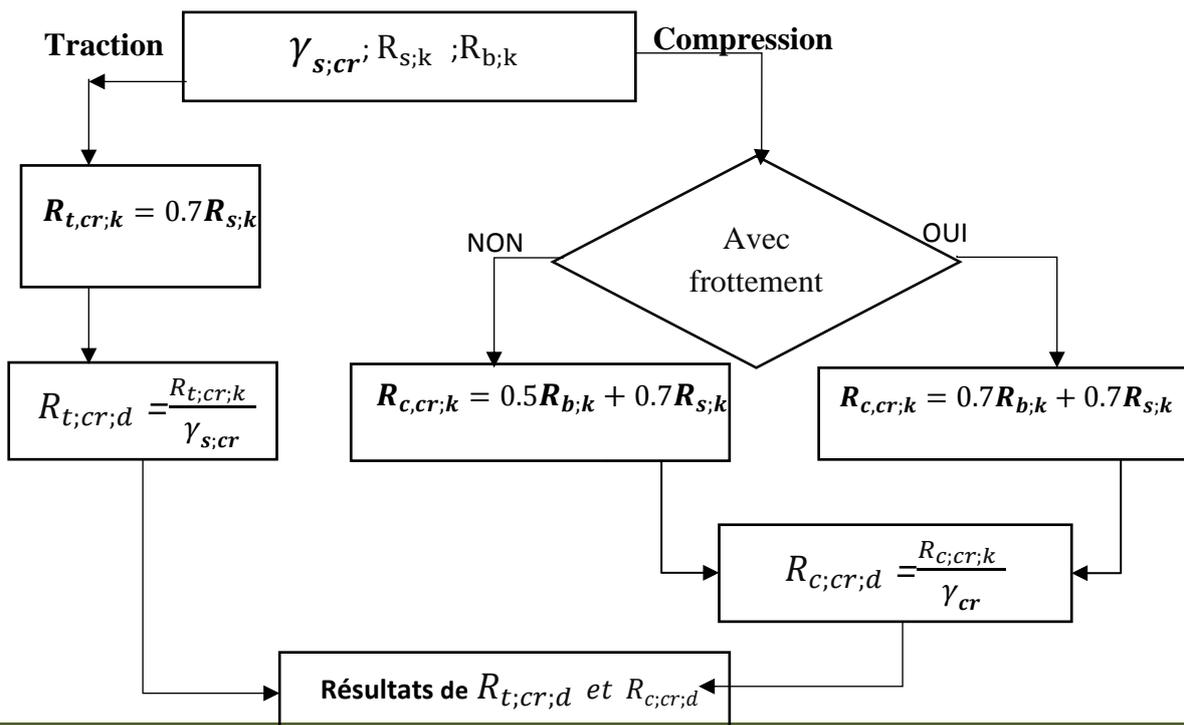


Figure 3.4 : Organigramme de calcul de la charge de fluage à ELS

2.1.2. Modèle de pieux

Dans ce paragraphe on présentera l'organigramme de calcul de la procédure modèle de pieux qui consiste à calculer la capacité portante de pieu :

➤ Calcul de valeur caractéristique de la résistance en traction et compression

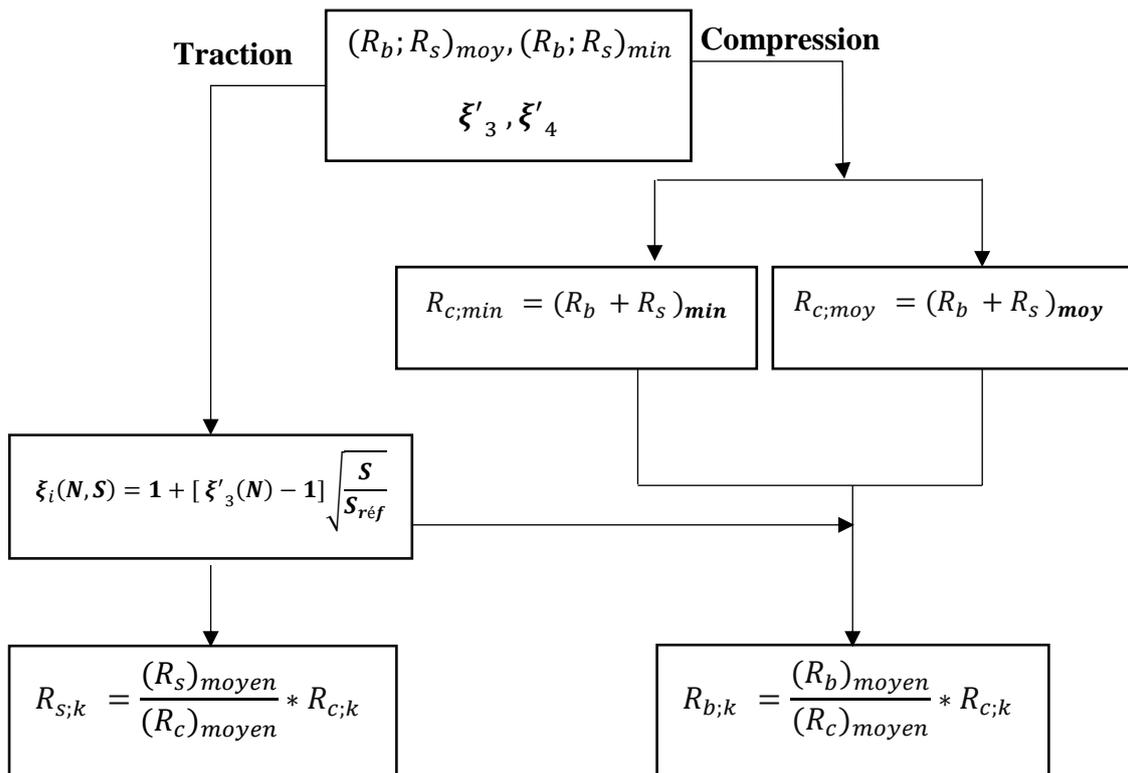


Figure 3.5 : Organigramme de résistance en traction et compression

➤ Calcul de résistance du frottement axial et de pointe

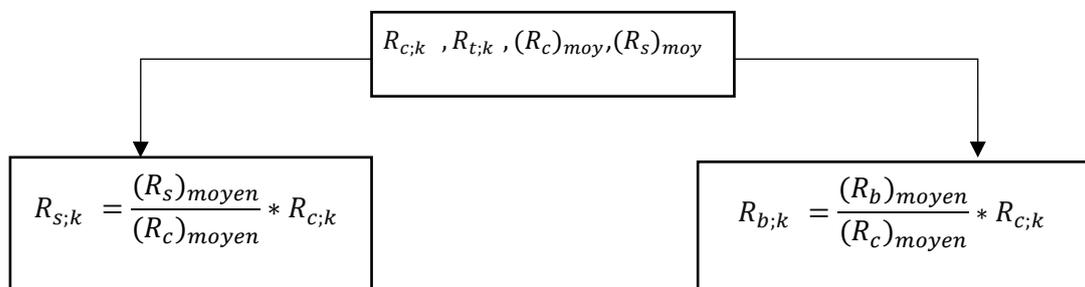


Figure 3.6 : Organigramme de résistance de frottement axial et de pointe

➤ Calcul de la capacité portante à l'ELU

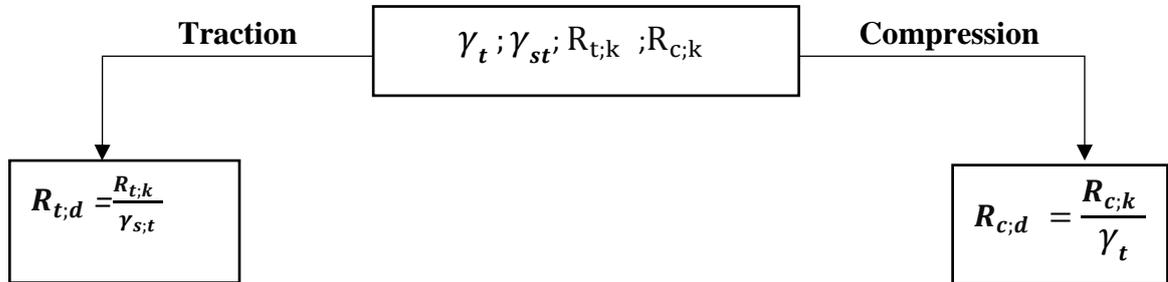


Figure 3.7 : Organigramme de calcul de la portance a ELU

➤ Calcul de la charge de fluage à l'ELS

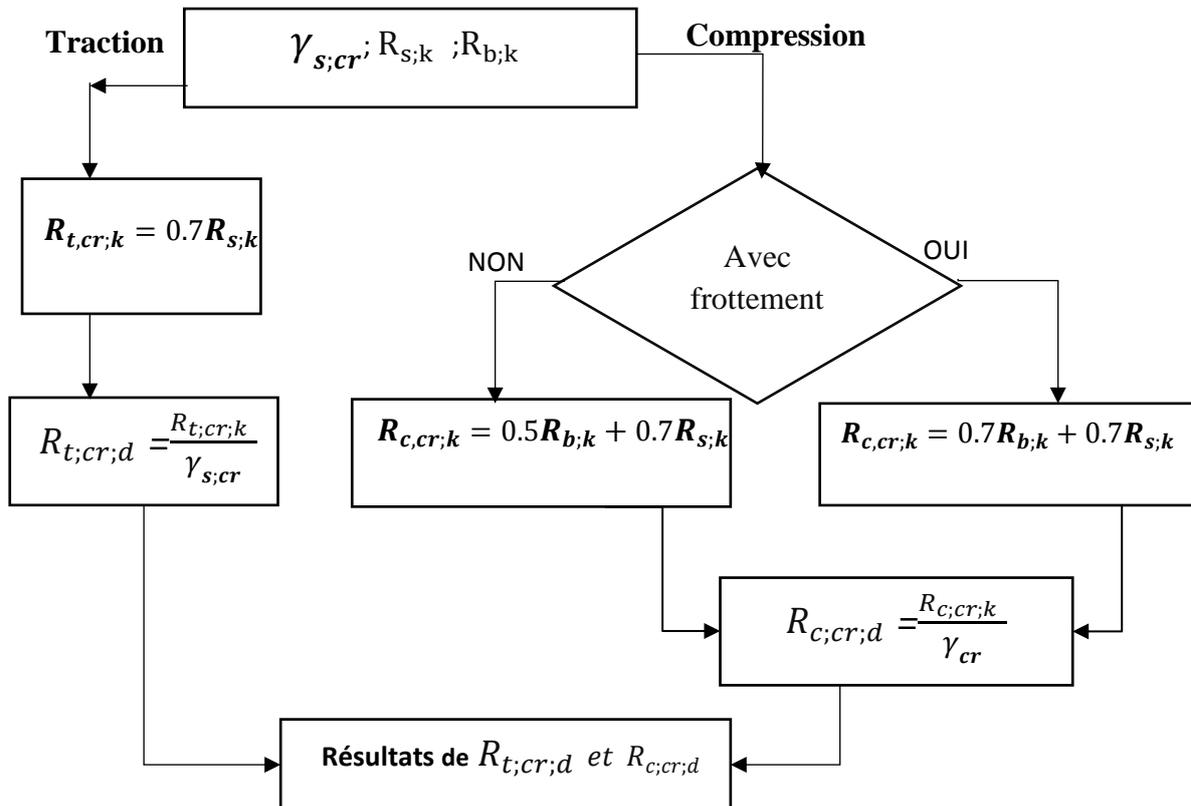


Figure 3.8 : Organigramme de calcul de charge de fluage à l'ELS.

2.2 Méthode pénétrométriques statique

La méthode du calcul dans cet essai est présentée comme suit :

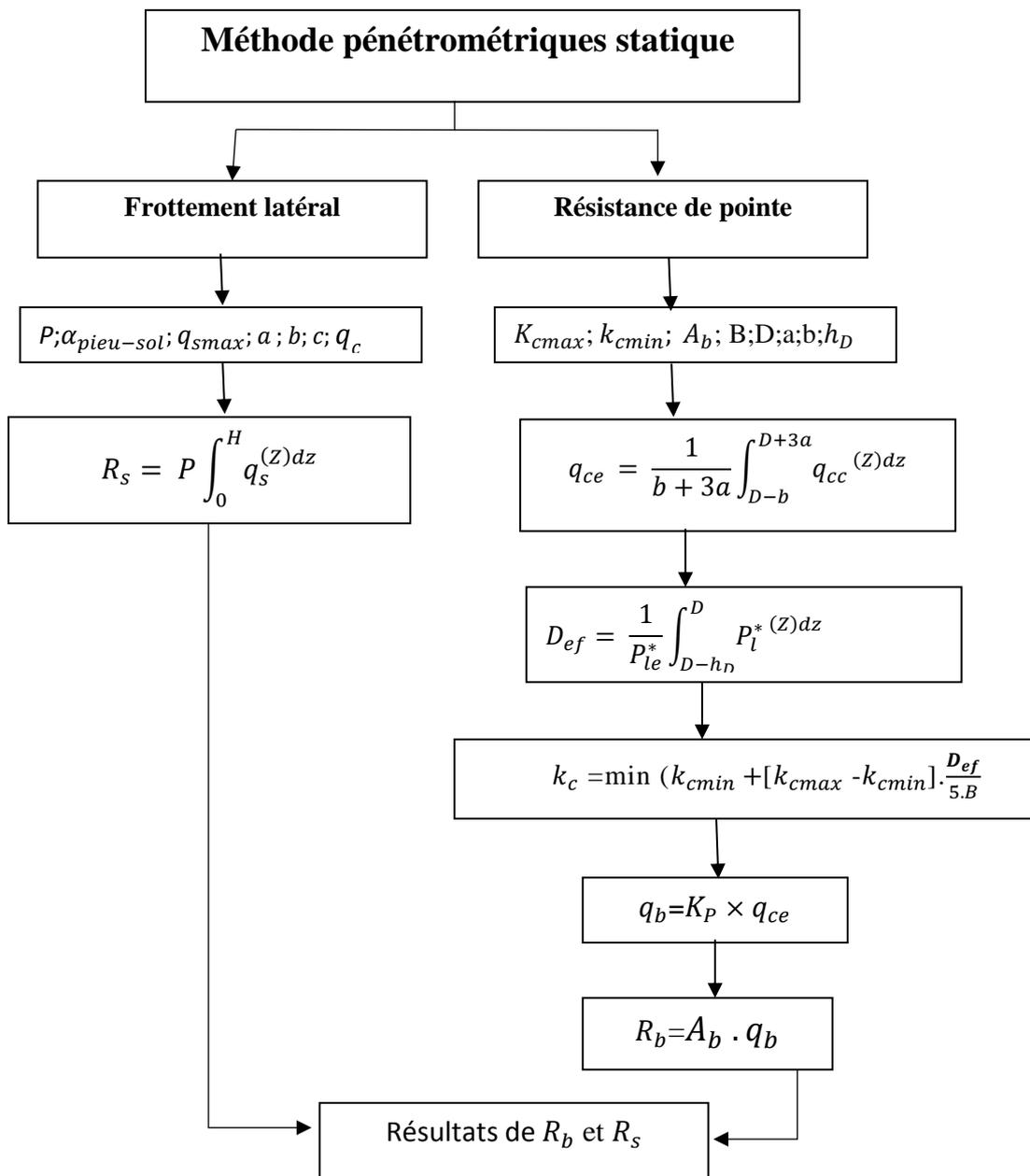


Figure 3.9 : Organigramme de methode pénétrométrique statique

On note que les caractéristiques de calcul concernant la catégorie de pieux et la nature de sol sont valables pour la méthode pénétrométriques statique et méthode pressiométriques. (Voir **Tableau 2.3** et **Tableau 2.4** du chapitre 2).

3. Applications numériques des méthodes de calculs

Dans cette partie, Les exemples choisis sont issus d'une étude réalisée à la Wilaya de Batna par la société d'étude technique ANNABA (SETA) du site Choot Gadaine Batna. Les études géotechniques ont porté essentiellement sur la caractérisation physique et mécanique des sols supports à partir d'essai pressiométriques, penetrometrique statique et des essais de laboratoire

Les données détaillées des sondages effectués sont reportées dans l'Annexe A de ce mémoire. Les calculs effectués dans cette partie sont manuels afin de se familiariser avec la procédure de calcul des fondations profondes.

3.1 Méthode préssiométriques

➤ Caractéristiques préssiométriques de pieu

Soit le sondage **SC05** d'un essai préssiométriques avec un pieu qui a les caractéristiques suivantes :

Type de pieu : forée simple (pieux et barrettes)

Profondeur de la base : 15 m

Largueur B : 1m

$f_{c.K}$: 20 Mpa

Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Type de sol : Marne / Argile limon.

Classe 1 pieux et barrettes.

D'après la norme **NF P-94.262**, l'exemple du calcul pour le sondage SC05 nous donne :

➤ Calcul de Résistance de pointe

$$R_b = q_b \cdot A_b$$

$$q_b = k_p \cdot P_{le}^*$$

$$A_b = r^2 \cdot \pi = 0.5^2 \cdot 3.14 \rightarrow A_b = 0.785 \text{ m}^2$$

$$P_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} P_l^*(z) dz \quad \text{Avec } a=0.5 \text{ m, } b=0.5 \text{ m, } D=15 \text{ m}$$

$$P_{le}^* = 2.18 \text{ Mpa}$$

$$D_{ef} = 4.71$$

$$k_p = \min \left(1 + [k_{pmax} - 1] \cdot \frac{D_{ef}}{5 \cdot B}; k_{pmax} \right)$$

$$k_p = \min \left(1 + [1.45 - 1] \cdot \frac{4.71}{5 \cdot 1}; 1.45 \right)$$

$$k_p = 1.43$$

$$q_b = 1.43 * 2.18 \quad \rightarrow \quad q_b = 3.16 \text{ MPa}$$

$$R_b = 0.785 * 3.16 \quad \rightarrow \quad R_b = 2.48 \text{ MN}$$

➤ **Calcul de frottement latéral**

$$R_s = P \int_0^H q_s^{(z)} dz$$

$$P = R * \pi = 1 * 3.14 \quad \rightarrow \quad P = 3.14 \text{ m,}$$

$q_s = 0.04 \text{ MPa}$ (selon **Figure 2.4** et les **Tableau 2.3**, **Tableau 2.4** du chapitre 2).

$$R_s = 3.14 \int_0^3 q_s^{(z)} dz$$

$$R_s = 5.02 \text{ MN}$$

3.1.1. Méthode du modèle de terrain

➤ **Résistance de pointe caractéristique $R_{b;k}$**

$$R_{b;k} = \frac{R_b}{\gamma_{R;d1} \gamma_{R;d2}}$$

$$R_b = 2.48 \text{ MN (Calcul précédent).}$$

$$\gamma_{R;d1} = 1.15 \text{ (Voir Tableau 2.10)}$$

$$\gamma_{R;d2} = 1.1 \text{ (valeur est fixée).}$$

$$R_{b;k} = 1.96 \text{ MN.}$$

➤ **Résistance de frottement axial caractéristique $R_{s;k}$**

$$R_{s;k} = \frac{R_s}{\gamma_{R;d1} \gamma_{R;d2}}$$

$$R_s = 5.02 \text{ MN (Calcul précédent).}$$

$$\gamma_{R;d1} = 1.15 \text{ (Voir Tableau 2.10)}$$

$$\gamma_{R;d2} = 1.1 \text{ (valeur est fixée).}$$

$$R_{s;k} = 3.97 \text{ MN}$$

➤ **Calcul de portance en compression à l'ELU**

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s}$$

$R_{b;k} = 1.96 \text{ MN}$ et $R_{s;k} = 3.97 \text{ MN}$ (calcul précédent).

$\gamma_b = \gamma_s = 1.1$ (voir Tableau 2.12).

$R_{c;d} = 5.40 \text{ MN}$

➤ **Calcul de la résistance en traction à l'ELU**

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s;t}} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_{s;t}}$$

$\gamma_{s;t} = 1.15$ (voir Tableau 2.11).

$R_{t;d} = 3.45 \text{ MN}$.

➤ **Calcul de la charge de fluage à l'ELS**

- **En compression** : $R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$

$$\begin{aligned} R_{c;cr;k} &= 0.5R_{b;k} + 0.7R_{s;k} \\ &= 0.5 \cdot 1.96 + 0.7 \cdot 3.97 \end{aligned}$$

$R_{c;cr;k} = 3.76 \text{ MN}$

$\gamma_{cr} = 0.9$ (voir Tableau 2.13).

$R_{c;cr;d} = 4.17 \text{ MN}$

- **En traction** : $R_{c;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$

$$R_{t;cr;k} = 0.7R_{s;k} = 0.7 \cdot 3.97$$

$R_{t;cr;k} = 2.78 \text{ MN}$

$\gamma_{s;cr} = 1.1$ (voir Tableau 2.13).

$R_{c;cr;d} = 2.52 \text{ MN}$

3.1.2. Méthode du modèle de pieu

➤ **Calcul de valeur caractéristique de la portance $R_{c;k}$**

$$R_{c;k} = \frac{1}{\gamma_{R,d1}} \min \left\{ \frac{(R_c)_{moyen}}{\xi_3}; \frac{(R_c)_{min}}{\xi_4} \right\}$$

$\gamma_{R.d1} = 1.15$ (voir Tableau 2.10).

$$\begin{aligned} R_{c; moy} &= (R_b + R_s)_{moy} \\ &= 2.19 + 5.43 = 7.62 \text{ MN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{c; min} &= (R_b + R_s)_{min} \\ &= 1.77 + 4.55 = 6.32 \text{ MN} \end{aligned}$$

$$\xi_3(N, S) = 1 + [\xi'_3(N) - 1] \sqrt{\frac{S}{S_{réf}}}$$

$$\xi'_3 = 1.29$$

$\xi'_4 = 1.15$ (voir Tableau 2.9).

$$S_{réf} = 2500 \text{ m}^2$$

$$S = 1800 \text{ m}^2 \rightarrow 625 \text{ cm}^2 \leq 1800 \leq 2500 \text{ cm}^2, \text{ avec } N = 5$$

$$\xi_3 = 1 + [1.23 - 1] \sqrt{\frac{S}{2500}} = 1.20$$

$$\xi_4 = 1 + [1.15 - 1] \sqrt{\frac{S}{2500}} = 1.13$$

$$R_{c;k} = 4.86 \text{ MN.}$$

➤ Calcul de valeur caractéristique de la résistance en traction $R_{t;k}$

$$R_{t;k} = \frac{1}{\gamma_{R.d1}} \min\left\{\frac{(R_s)_{moyen}}{\xi_3}; \frac{(R_s)_{min}}{\xi_4}\right\}$$

$$(R_s)_{moyen} = 5.43 \text{ MN}, \quad (R_s)_{min} = 4.55 \text{ MN}$$

$$R_{t;k} = 3.5 \text{ MN}$$

➤ Résistance de frottement axial caractéristique $R_{s;k}$

$$R_{s;k} = \frac{(R_s)_{moyen}}{(R_c)_{moyen}} * R_{c;k}$$

$$R_{s;k} = \frac{5.43}{7.62} * 4.86$$

$$R_{s;k} = 3.46 \text{ MN}$$

➤ Résistance de pointe caractéristique $R_{b;k}$

$$R_{b;k} = \frac{(R_b)_{moyen}}{(R_c)_{moyen}} * R_{c;k}$$

$$= \frac{2.194}{7.62} * 4.86$$

$$R_{b;k} = 1.4 \text{ MN}$$

➤ **Calcul de portance en compression à l'ELU**

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} = \frac{4.86}{1.1}$$

$$R_{c;d} = 4.41 \text{ MN}$$

➤ **Calcul de la résistance en traction à l'ELU**

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s,t}} = \frac{3.5}{1.15}$$

$$R_{t;d} = 3.04 \text{ MN}$$

➤ **Calcul de la charge de fluage a l'ELS**

➤ **En compression :** $R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$

$$R_{c;cr;k} = 0.5R_{b;k} + 0.7R_{s;k}$$

$$= 0.5*1.4 + 0.7*3.46$$

$$R_{c;cr;k} = 3.12 \text{ MN}$$

$$\gamma_{cr} = 0.9 \text{ (voir Tableau 2.13).}$$

$$R_{c;cr;d} = 3.46 \text{ MN}$$

➤ **En traction :** $R_{t;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$

$$R_{t;cr;k} = 0.7R_{s;k} = 0.7 * 3.46 = 2.42 \text{ MN}$$

$$\gamma_{s;cr} = 1.1 \text{ (voir Tableau 2.13).}$$

$$R_{t;cr;d} = 2.20 \text{ MN}$$

3.2. Méthode pénétrométriques statique

➤ Pour pieu de **30 m** et **1.2 m** de diamètre, du pont y

$$R_b = q_b \cdot A_b$$

$$q_b = k_c \cdot q_{ce}$$

$$A_b = r^2 * \pi = 0.6^2 * 3.14 \rightarrow A_b = 1.1304 \text{ m}^2$$

$$k_c = \min \left(k_{cmin} + [k_{cmax} - k_{cmin}] \cdot \frac{D_{ef}}{5.B}; k_{cmax} \right)$$

$$D_{ef} = 1.9$$

$k_{cmin} = 0.3$ et $k_{cmax} = 0.4$ (voire **Tableau 2.5**)

$$k_c = 0.33$$

$$q_c = 27 \text{ MPa}, q_{cm} = 8.62 \text{ MPa}; q_{cc} = 1.3 * q_{cm} = 11.20 \text{ MPa}$$

$$q_{ce} = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} q_{cc}(z) dz$$

$$a = 0.6 \text{ m}, b = 0.6 \text{ m}, D = 30 \text{ m}$$

$$q_{ce} = 26.2 \text{ MPa}$$

$$q_b = 8.64 \text{ MN}$$

$$R_b = 9.77 \text{ MN}$$

➤ Résistance de frottement axial

$$R_s = P \int_0^H q_s(z) dz$$

$$P = R * \pi = 1.2 * 3.14 \rightarrow P = 3.768 \text{ m},$$

$$q_s = \min(\alpha_{pieu-sol} f_{sol}; q_{smax}) \text{ avec } f_{sol} = (a \cdot q_s + b) (1 - e^{-c \cdot q_s})$$

$$\alpha_{pieu-sol} = 0.55 \text{ (Voir Tableau 2.7)}, q_{smax} = 90 \text{ KPa} = 0.09 \text{ MPa} \text{ (Voir Tableau 2.8).}$$

$$a = 0.0018, b = 0.1, c = 0.4, q_s = 27 \text{ MPa} \text{ (voir Tableau 2.6).}$$

$$f_{sol} = 0.148$$

$$q_s = 0.081 \text{ MPa}$$

$$R_s = 3.768 \int_0^4 q_s(z) dz \rightarrow R_s = 2.44 \text{ MN}$$

3.2.1. Méthode du modèle de terrain

➤ Résistance de pointe caractéristique $R_{b;k}$

$$R_{b;k} = \frac{R_b}{\gamma_{R;d1} \gamma_{R;d2}}$$

$$R_b = 9.77 \text{ MN} \text{ (Calcul précédent).}$$

$$\gamma_{R;d1} = 1.18$$

$$\gamma_{R;d2} = 1.1$$

$$R_{b;k} = 7.52 \text{ MN.}$$

➤ **Résistance de frottement axial caractéristique $R_{s;k}$**

$$R_{s;k} = \frac{R_s}{\gamma_{R;d1} \gamma_{R;d2}}$$

$$R_s = 2.44 \text{ MN}$$

$$\gamma_{R;d1} = 1.18 \text{ (Voir Tableau 2.10)}$$

$$\gamma_{R;d2} = 1.1$$

$$R_{s;k} = 1.87 \text{ MN.}$$

➤ **Calcul de portance en compression à l'ELU**

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s}$$

$$\gamma_b = \gamma_s = 1.1 \text{ (voir Tableau 2.12).}$$

$$R_{c;d} = 3.91 \text{ MN}$$

➤ **Calcul de la résistance en traction à l'ELU**

$$R_{t;d} = \frac{R_{t;k}}{\gamma_{s,t}} = \frac{R_{s;k}}{\gamma_{s,t}}$$

$$\gamma_{s,t} = 1.15 \text{ (voir Tableau 2.11).}$$

$$R_{t;d} = 1.62 \text{ MN.}$$

➤ **Calcul de la charge de fluage a l'ELS**

➤ **En compression :** $R_{c;cr;d} = \frac{R_{c;cr;k}}{\gamma_{cr}}$

$$\begin{aligned} R_{c;cr;k} &= 0.5R_{b;k} + 0.7R_{s;k} \\ &= 0.5 \cdot 7.52 + 0.7 \cdot 1.87 \end{aligned}$$

$$R_{c;cr;k} = 5.06 \text{ MN}$$

$$\gamma_{cr} = 0.9 \text{ (voir Tableau 2.13).}$$

$$R_{c;cr;d} = 5.62 \text{ MN}$$

➤ **En traction :** $R_{t;cr;d} = \frac{R_{t;cr;k}}{\gamma_{s;cr}}$

$$R_{t;cr;k} = 0.7R_{s;k} = 0.7 \cdot 1.87 = 6.21 \text{ MN}$$

$\gamma_{s;cr} = 1.1$ (voir Tableau 2.13).

$$R_{t;cr;d} = 1.31MN$$

3.2.2. Méthode du modèle de pieu

On note que les caractéristiques de calcul de la méthode pressiométrique sont valables pour la méthode pénétrométriques statique.

4. Calcule de la capacité d'un pieu avec GEOFOND 1.22

4.1. Présentation du logiciel GEOFOND 1.22

GEOFOND1.22 est un outil pour calculer les contraintes d'un objet simple en application de méthodes de calcul définies. L'objet simple de calcul est défini par l'ingénieur qui retient quelques caractéristiques mécaniques et géométriques et envisage certains phénomènes physiques (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

Le logiciel GEOFOND1.22 spécialisé dans le dimensionnement des fondations s'articule autour de deux modules de calculs : le module fondations superficielles et le module fondations profondes.

GEOFOND permet également de calculer la capacité portante de fondations profondes en laissant le choix à l'utilisateur parmi les référentiels existants : le Fascicule 62 titre V, le DTU 13.2 et les normes d'application française de l'EUROCODE 7, en l'occurrence la norme NF P 94.262. Les tassements sont calculés par la méthode de Frank & Zhao, en fonction du type d'essais à disposition : Pressiomètre ou pénétromètre statique (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014).

Il permet également de décomposer les efforts dans le cas de groupe de pieux.

4.2. Description de la prise en main du logiciel

1. Choix du module

Le passage à GEOFOND-MODULE Fondations Profondes se fait automatiquement lors de l'ouverture d'un fichier correspondant à ce module.

Pour créer un nouveau fichier de calcul de fondation profonde on clique directement sur le bouton approprié dans la fenêtre qui apparaît (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014).

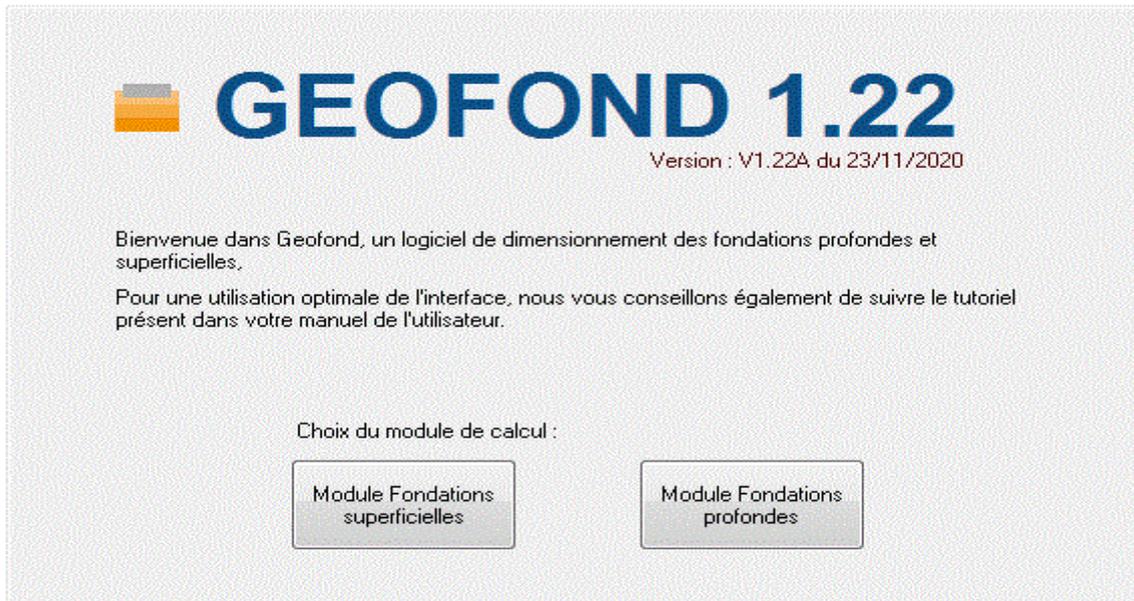


Figure 3.10 : le choix du module (Logiciel Geofond 1.22)

Le module actif est par ailleurs affiché dans le bas du tableau de bord.

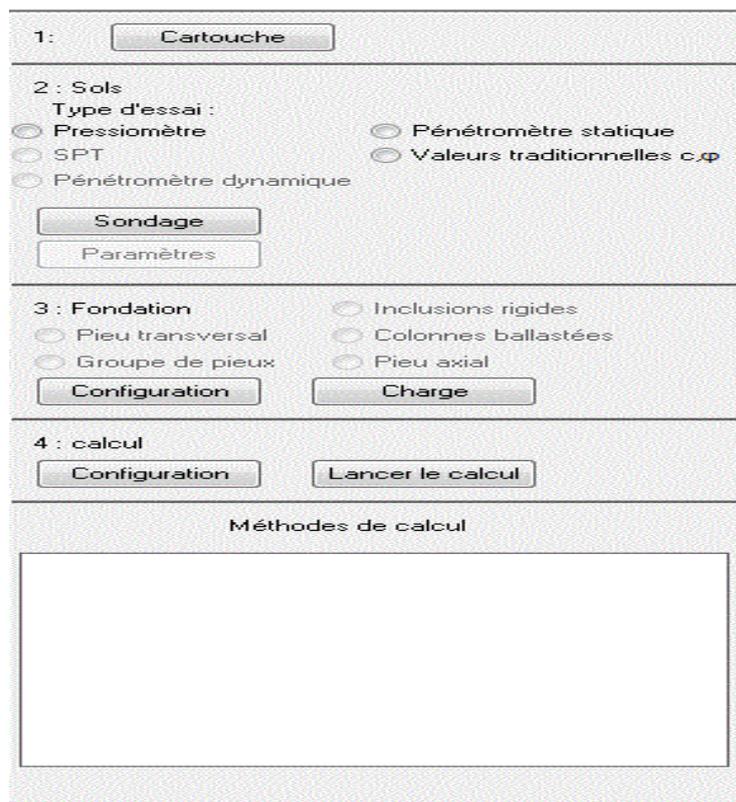


Figure 3.11 : Tableau de bord (Logiciel Geofond 1.22)

Dès que le choix du type d'essai (Pénétromètre statique ou Pressiomètre) a été fait, il est IMPERATIF de faire le choix de la méthode de calcul utilisée pour pouvoir poursuivre la saisie.

2. Les sols

La Figure 3.12 Indique les valeurs d'essais dans la boîte de dialogue « Sondage ».

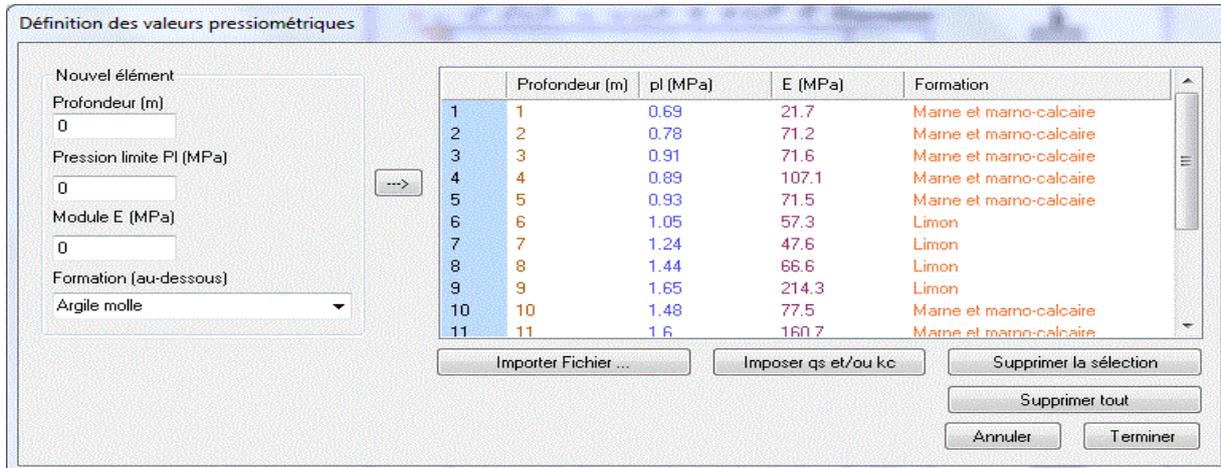


Figure 3.12 : Tableau pour saisir les caractéristiques du sol (Logiciel Geofond 1.22)

Pour les pieux, le logiciel présente les spécificités suivantes :

- saisie de la valeur de frottements dans le cas de craie pour des pieux spécifiques (Fascicule 62 Titre V),
- possibilité d'imposer les valeurs de q_s ou k_c ou k_p (cf. fenêtre suivante) :

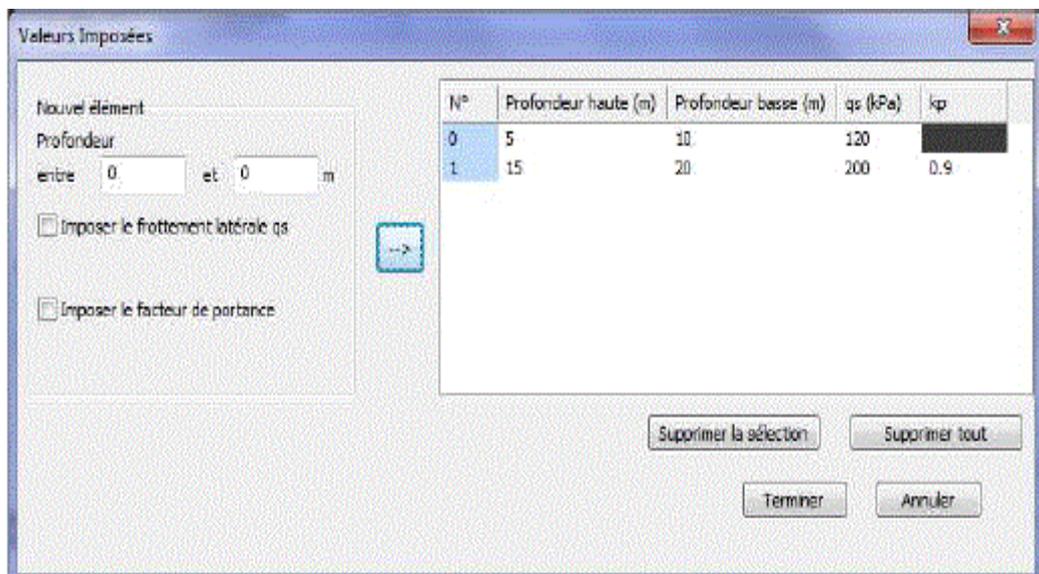


Figure 3.13 : Saisir les valeurs de q_s ou k_c ou k_p (Logiciel Geofond 1.22)

3. Saisie de la fondation profonde

3.1 .Généralités

La définition de la fondation profonde se fait en cliquant sur le bouton « Configuration » de la section « 3 : Fondation » du tableau de bord, ou dans le menu « Saisie des données → Fondation → Fondation. Profonde ». (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

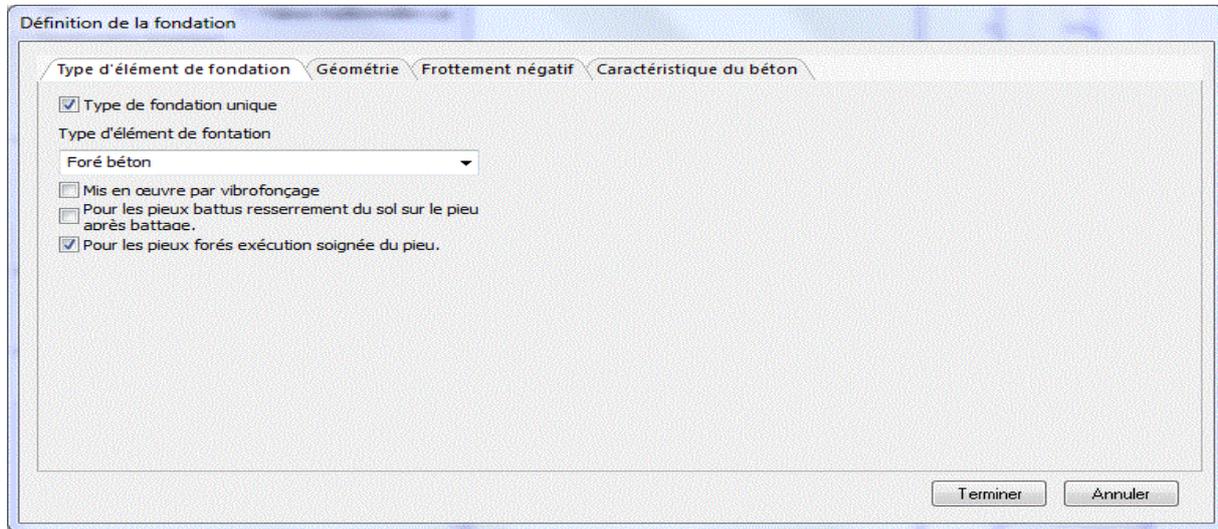


Figure 3.14 : Définition de la fondation (Logiciel Geofond 1.22)

La fenêtre de saisie présente 4 onglets différents pour la définition complète de la fondation :

- Type d'élément de fondation,
- Géométrie,
- Frottement négatif,
- Caractéristiques du béton.

Les options de configurations peuvent varier suivant le référentiel de calcul choisi. (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

3.2 .Type d'élément de fondation

Le premier onglet permet la définition du type de fondation. Choisissez la fondation adaptée dans le menu déroulant.

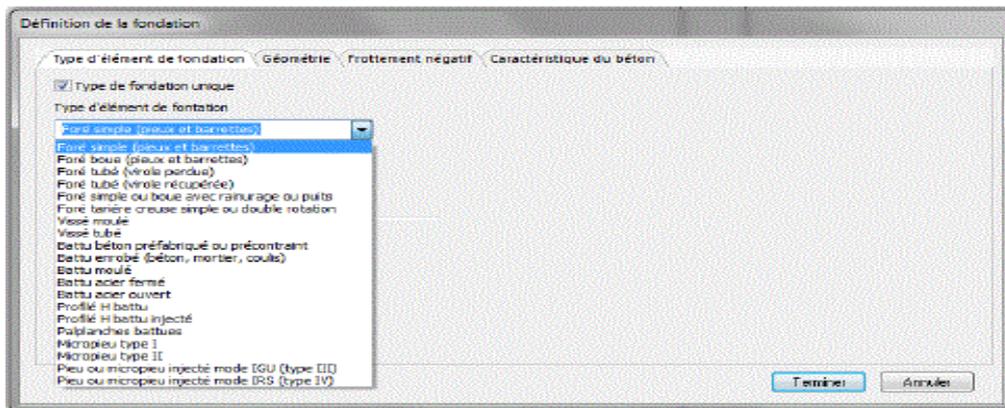


Figure 3.15 : type d'élément de fondation (Logiciel Geofond 1.22)

Il est également possible de considérer un changement du mode de réalisation sur la profondeur de la fondation en décochant la case «Type de fondation unique ».

Cliquez alors sur la représentation de la fondation pour accéder à la fenêtre de saisie ci-dessous. Le mode de réalisation est associé à une profondeur. Le bouton « —> » permet d'ajouter un nouvel élément de fondation jusqu'à la profondeur saisie.

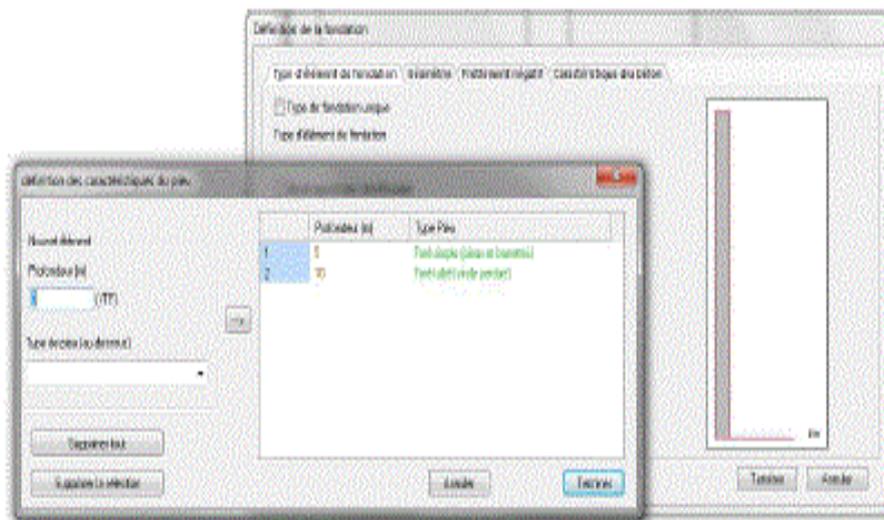


Figure 3.16 : Représentation de la fondation (Logiciel Geofond 1.22)

3.3 Géométrie

L'onglet géométrie permet de définir l'ensemble des caractéristiques géométriques de la fondation.

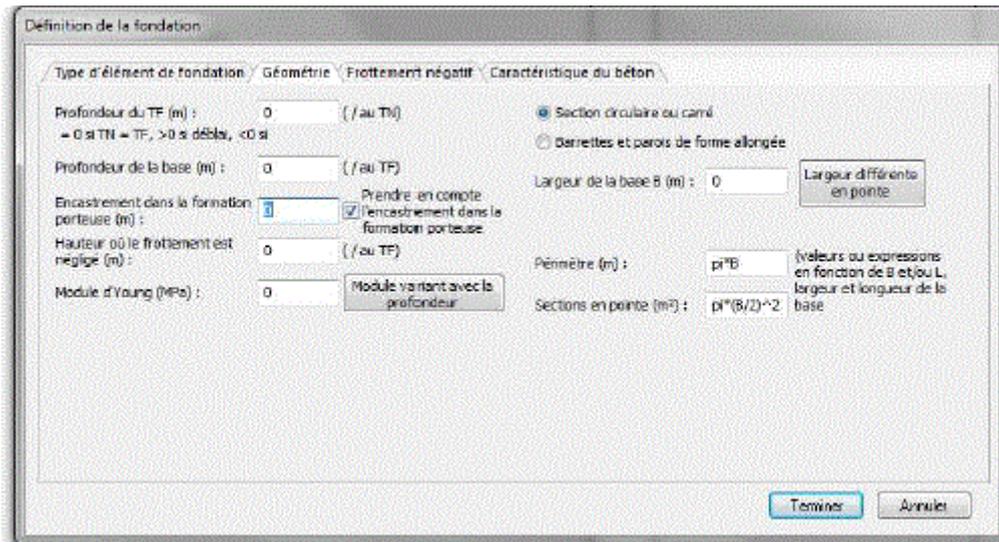


Figure 3.17 : Définition de l'ensemble des caractéristiques de la fondation

3.4 Frottement négatif

Le troisième onglet vous permet de paramétrer les frottements négatifs. Pour les prendre en compte il suffit de cocher la case « Prendre en compte les frottements négatifs ». Dans ce cas il faudra spécifier :

- La surcharge uniforme appliquée à la tête du pieu. Il n'est donc pas nécessaire de saisir un remblai au-dessus du pieu pour prendre en compte les frottements négatifs.
- La présence de nappe ou non.
- La profondeur de limite du calcul (celui-ci permet de prendre en compte le h_2 qui correspond au niveau de tassement restant à acquérir par le sol après exécution de la fondation, celui-ci doit être calculé au préalable par l'utilisateur, il peut utiliser GEOFOND Module fondations superficielles). (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

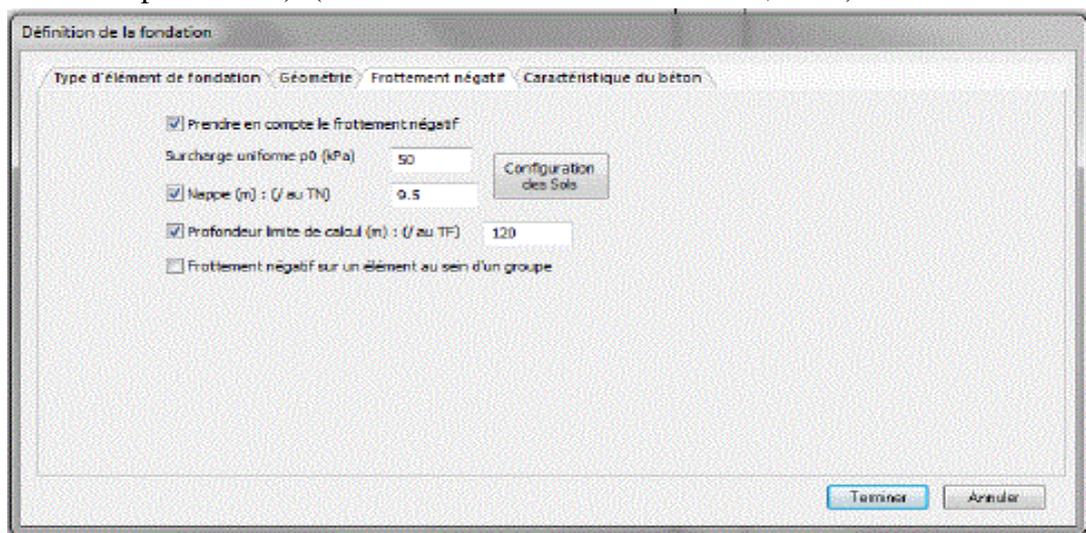


Figure 3.18 : Définition du frottement négatif

Vous devez définir les couches de sols ($k \cdot \tan \sigma$ et poids volumique du sol γ .) en cliquant sur le bouton « configuration des sols » permettant d'accéder à la fenêtre suivante :

Valeurs de K Tan Delta proposées :				
		Pieux forés tubés	Pieux forés	Pieux battus
TOURBES	sols organiques	0,10	0,15	0,20
ARGILES	mous	0,10	0,15	0,20
LIMONS	fermes à durs	0,15	0,20	0,30
	très lâches		0,35	
SABLES	lâches		0,45	
GRAVES	autres		1,00	

Figure 3.19 : Définition des couche de sol (Logiciel Geofond 1.22)

Un tableau est donné pour vous guider dans le choix des valeurs à saisir. Il est possible de calculer le frottement négatif dans le cas de où le pieu est au sein d'un groupe. Pour cela, il suffit de cocher la case « Frottement négatif sur un élément au sein d'un groupe ».

Figure 3.20 : Tableau de donnée de frottement négatif

Puis de spécifier si le groupe se trouve sur plusieurs files ou sur une seule et les valeurs d'entraxes d et d' .

3.5 Caractéristiques du béton

La fenêtre de configuration de la fondation présente un dernier onglet permettant d'ajouter au calcul la vérification des caractéristiques du béton. Cette vérification s'effectue suivant le référentiel choisi précédemment, lors de la saisie du sondage. (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

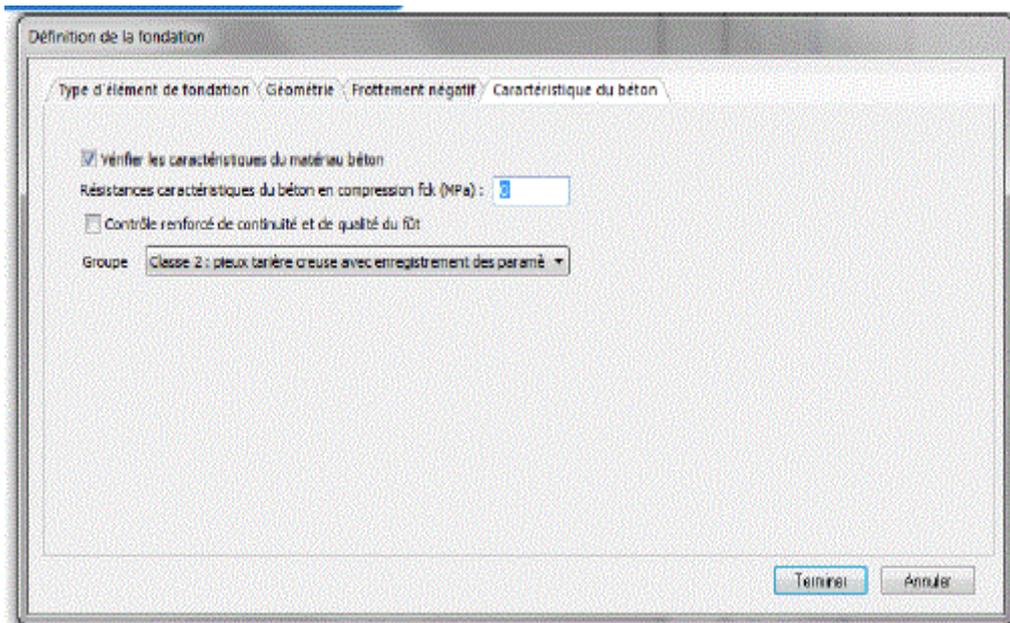


Figure 3.21 : Définition des caractéristiques de béton (Logiciel Geofond 1.22)

4. Saisie de la charge

La définition de la charge se fait en cliquant sur le bouton « Charge » de la section « 3 : Fondation » du tableau de bord, ou dans le menu « Saisie des données → Fondation → Charge ». (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

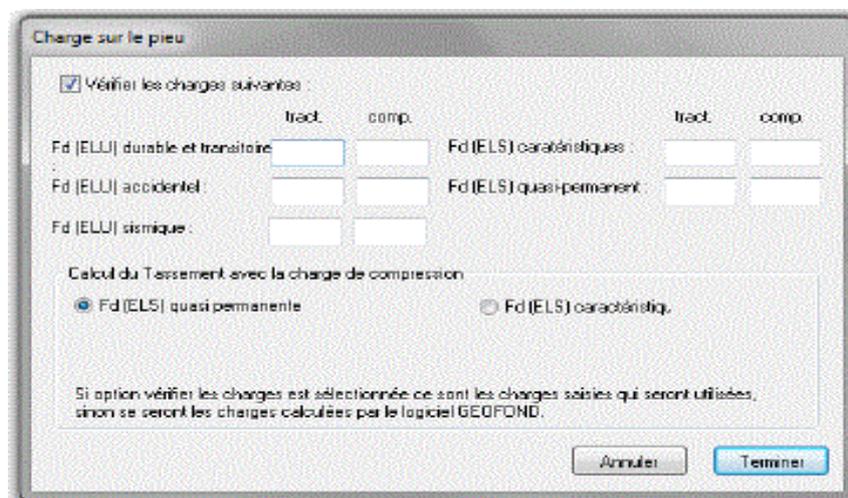


Figure 3.22 : définir la charge du pieu (Logiciel Geofond 1.22)

5. Saisie du groupe de pieux

La définition du groupe de pieux se fait en cliquant sur le bouton « configuration » de la section « 3 : Fondation » du tableau de bord, ou dans le menu « Saisie des données → Fondation → Groupe Pieux ». Vous accédez à la fenêtre de saisie suivante :

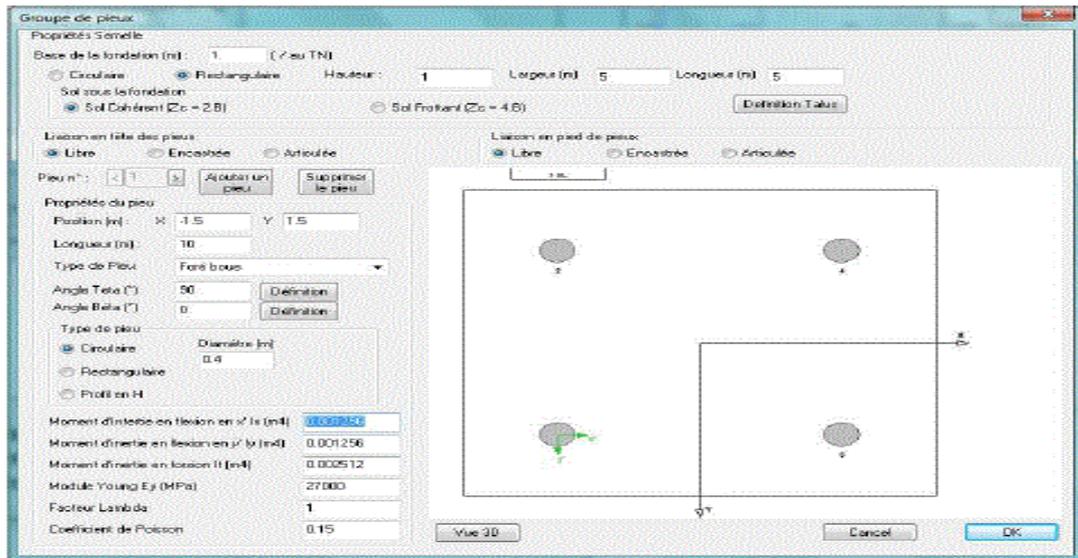


Figure 3.23 : saisir du groupe de pieu (Logiciel Geofond 1.22)

Vous devez entrer l'ensemble des informations permettant la définition de chaque pieu (dimension, position, type et caractéristiques). La saisie des charges est disponible en cliquant sur « Fondation -> Charges » ou dans le menu « Saisie des données » puis « Charges ». (Manuel Utilisation Geofond 2014 , 2014)

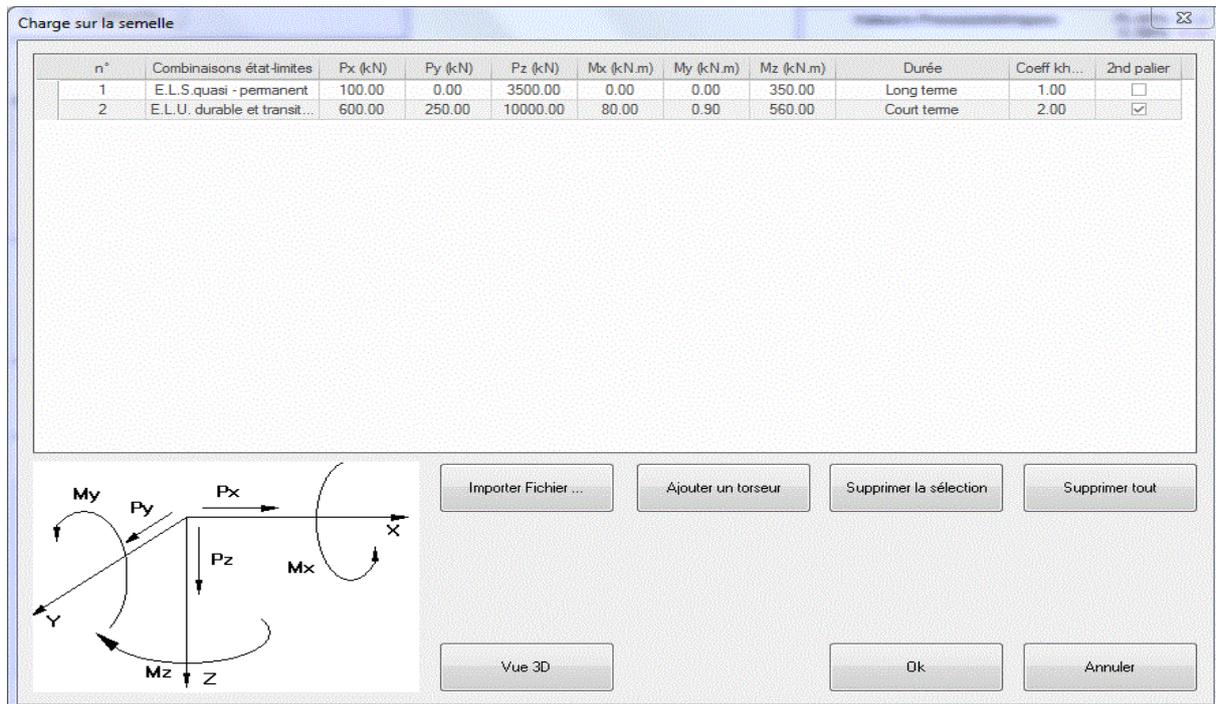


Figure 3.24 : Les charges appliquées sur la structure (Logiciel Geofond 1.22)

Cette fenêtre permet la saisie des différentes combinaisons de charges (ELS ou ELU) et donne également la possibilité de visualiser en 3D le groupe de pieux, la semelle et les efforts.

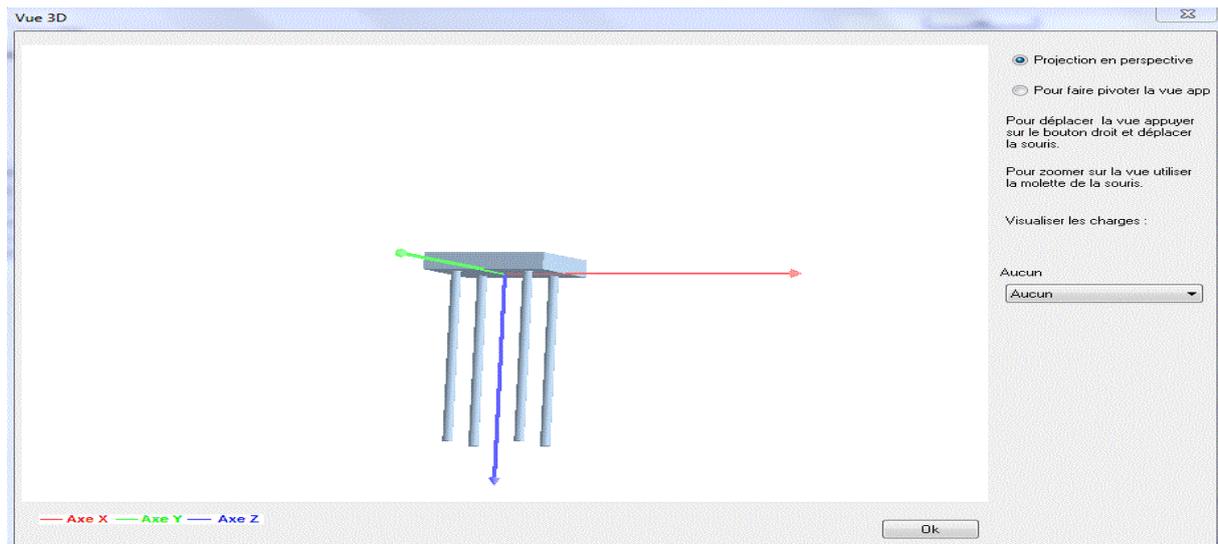


Figure 3.25 : vue 3D de la structure (Logiciel Geofond 1.22)

5. Résultats de calcul par GEOFOND

Voir les résultats (ANNEXE B)

Pour les besoins de calculs, on a repris l'exemple effectué dans la Wilaya de Batna, étude rapportée par (Boumaza, 2015).

5.1. Méthode préssiométriques

➤ Pour un pieu de 15 m de hauteur et 1 m de diamètre ; avec NF P 94-262, les résultats sont illustrés au tableau suivant :

✓ Model de terrain

D'après l'utilisation de logiciel GEONFOND 1.22, Pour la procédure model de terrain, On résultant les valeurs suivant (Tableau 3.15) de chaque sondage.

Tableau 3.16: Résultat des essais pressiométriques model de terrain

Sondages	SC 05	SC 06	SC 07	SC 08	SC 09
K_p	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Pl_e^* MPa	2.18	1.8	1.56	2.05	2.09
R_s	5.09	5.22	4.55	6.13	6.17
R_b	2.48	2.45	1.77	2.63	2.48
$R_{b;k}$	1.96	1.62	1.4	1.85	1.88
$R_{s;k}$ MN	4.03	3.09	3.6	4.85	4.88
D_{ef} m	7.34	7.02	9.32	7.07	6.94
q_b MPa	3.16	2.61	2.26	2.97	3.03

✓ **Pieu modèle**

Ensuite, on présentera les résultats de différentes valeurs pour la procédure pieu modèle qui sont illustrés au tableau suivant :

Tableau 3.17: essai pressiométrique pieu modèle

Sondages	SC 05	SC 06	SC 07	SC08	SC 09
K_p	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
Pl_e^* MPa	2.18	1.8	1.56	2.05	2.09
R_s	5.09	5.22	4.55	6.13	6.17
R_b	2.46	2.05	1.77	2.33	2.36
D_{ef}	7.34	7.02	9.32	7.07	6.94
q_b	3.16	2.61	2.26	2.97	3.03

- Pour un pieu de 44 m de hauteur et 1.2 m de diamètre, en utilisant NF P 94-262, les résultats sont montrés pour un sondage SC 01 au tableau suivant (Boumaza, 2015):

Tableau 3.18: Résultat essai pressiométriques pour un pieu de 44m

Sondages	SC 01
K_c	0.31
Pl_e	9.36
R_s	10.2
R_b	15.3
$R_{b;k}$	12.1
$R_{s;k}$	8.03
D_{ef}	7.9
q_b	13.6

5.2. Méthode pénétromètre statique :

Pour un pieu de 30 m de hauteur et 1.2 m de diamètre, (SETA ANNABA) avec NF P 94-262.

Type de pieu : foré fut béton (Boumaza, 2015)

Prof. Base : 30 m

Largueur B : 1.2 m

Exécution soignée du pieu

Type de sol : Argile molle /sable lâche

Tableau 3.19: Résultat essai pénétromètre statique

Sondage	SC 01
K_p	0.4 MN
q_{ce}	25.9 MN
R_s	3.47 MN
R_b	9.7 MN
D_{ef}	1.85 MN
Q_u	13.2MN

5.3. Capacité portance d'un Groupe de pieux :

Pour un Groupe de pieux de longueur 10m et 0.4m de diamètre. On présentera au **Tableau 3.5** la structure et la géométrie, paramètre du sol de notre exemple pour le Groupe de pieux

Tableau 3.5 : Les données de groupe de pieux

Structure	Géométrie	Paramètre du sol
Largueur de la dalle de fondation ($b_x = 5$; $b_y = 5$)	Épaisseur de la dalle de fondation $h = 1$ m	Hauteur de 0 à 3 m sols sable, grave
Diamètre de pieux = 0.4 m	Longueur de pieux $L = 10$ m	Hauteur de 4 à 17 m sols Marne
Nombre de pieux ($n_x = 2$; $n_y = 2$)	Type de pieux : foré boue (pieux et barrettes)	
Distance axiale ($S_x = 2$ m ; $S_y = 2$ m)	Facteur $\lambda = 1$	
	Coefficient de poisson = 0.15	
	Module de Young = 27000 MPa	

Ci-après de l'utilisation de logiciel GEOFOND 1.22, On résultant la capacité portante en (KN) à l'ELU et l'ELS pour group de pieux aux tableaux suivant :

✓ **Résulte de la capacité portante à ELS quasi-permanent :****Tableau 3.6 : Résultat à ELS quasi-permanent**

N° pieu	$R_{c;cr;d}$ (KN)	$R_{t;cr;d}$ (KN)
1	1117	539
2	1117	539
3	1117	539
4	1117	539

✓ **Résulte de la capacité portante à ELU quasi-permanent :****Tableau 3.7 : Résultat à ELU quasi-permanent**

N° Pieu	$R_{c;d}$ (KN)	$R_{t;d}$ (KN)
1	1722	1004
2	1722	1004
3	1722	1004
4	1722	1004

L'ensemble des détails des résultats sont reportés en annexe B.

On présente dans le tableau 3.8 un récapitulatif de toutes les valeurs de la capacité portante déterminée analytiquement et par le logiciel GEOFOND1.22 selon la norme NF P 94-262 datant de juillet 2012 (calcul de fondations profondes par l'Eurocode 7).

Analytiquement on a trouvé les valeurs de la capacité portante pour un exemple de sondage en utilisant le Pressiomètre, et le pénétromètre statique sont assez proches de celles déterminées par logiciel GEOFOND.

Ainsi que la méthode pénétrométriques donne des valeurs plus élevées que la méthode pressiométriques. Étant donné que la pression limite est assez bien corrélée avec la résistance de pointe cette différence s'explique par un biais dans la méthode de calcul, notamment par les facteurs de portance K_p et K_c .

Les valeurs obtenues par NF P 94-262 sont les plus basses par rapport aux résultats de la norme DTU 13.2, ce qui nous place dans le cas le plus sécuritaire.

Tableau 3.20: comparatif des capacités portantes calculés manuellement et par GEOFOND

Sondage	Calcul Analytique(MN)	GEOFOND 1.22(MN)		
		NF P 94-262		DTU 13.2
	Pressiomètre	Model de terrain	Pieu modèle	
SC05 (à 15m)	7.50	7.77	7.57	7.97
SC06 (à 15m)	x	7.67	7.27	7.77
SC07 (à 15m)	x	6.32	6.32	6.63
SC08 (à 15m)	x	8.66	8.46	9.04
SC09 (à 15m)	x	8.65	8.47	9.08
SC01CMA (à 44m)	x	25.5	26.5	26
SC01 Pont Y (à 30m)	Pénétrromètre statique	13.1	13.1	14.5
	12.21			

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le calcul de fondations profondes en utilisant la norme française de l'Eurocode 7. Le but principal du chapitre étant de simplifier la méthode de calcul aux étudiants et aux jeunes ingénieurs. Dans cette optique, un organigramme détaillé de la méthode a été établi. Des exemples de calculs manuels et numériques par le logiciel Geofond1.22 ont été traité afin d'appliquer les calculs avec l'Eurocode 7, chose que jusqu'à présent n'est pas répondu ni dans les matières enseignées en graduation ni dans la pratique des bureaux d'études.

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a pour principal objectif de passer en revue les méthodes de calcul classique et les méthodes de calcul selon l'EUROCODE 7 des fondations profondes et appliquer des exemples de calcul avec un logiciel professionnel de calcul permettant le calcul numérique de la capacité portante.

L'EUROCODE 7 est le dernier règlement actuel qui a apporté des modifications pour quelques paramètres ou coefficients dans les calculs de la capacité portante pour les fondations profondes.

L'objectif du mémoire étant pédagogique en premier lieu, on a abordé les méthodes classiques de calculs et ensuite les nouvelles méthodes suivant l'Eurocode7. Le calcula été abordé en sous deux angles : analytique et numérique en utilisant GEOFOND 1.22 selon la norme NF P 94-262.

Une étude comparative des deux méthodes de calcul a été menée dans le chapitre application. Le résultat obtenu montre que le calcul des fondations mené avec l'EUROCODE 7 est le plus satisfaisant du moment que les paramètres utilisés sont plus proches de la réalité. Les valeurs obtenues sont les plus basses, ce qui nous place dans le cas le plus sécuritaire.

L'utilisation du logiciel GEOFOND1.22 nous montre que le calcul numérique est très proche du calcul analytique pour les exemples de validation suivis.

Après l'étape de validation, on pourra faire des simulations par le logiciel a des projets réels et d'envergure. Malheureusement, la version du logiciel dont on dispose qui est limité dans le temps nous a pas permis de traiter d'autres cas plus complexes.

Néanmoins, l'objectif initial étant pédagogique, donc nous estimons qu'on a essayé de bien présenter d'où faciliter l'utilisation de l'EUROCODE 7 par les jeunes ingénieurs.

Personnellement, vu le volume de temps passé à écrire ce travail et durant cette période on a côtoyé plein de choses : courage, découragement, stress, Mais à la fin on éprouve le sentiment de n'avoir rien perdu, au contraire on a acquis une petite expérience qui certainement sera dans une grande utilité dans la vie professionnelle dans le domaine du génie-civil en général et en géotechnique en particulier.

Références bibliographiques

- Frederic (2008), les fondations profondes,lycee pierre caraminot 19300 Egletons.
- Bouguenina, O. (2017) Cours Master I Structures Fondations et Soutènements, Centre Universitaire – nour bachir el bayadh, Institut des Sciences département de Technologies.
- Montcho, G. (2005), fondation profondes dimensionnement et conception d'un programme de calcul, mémoire d'ingénieur en Génie Civil, université de Cheikh anta diop de dakar.
- Elgonnoui, M., (2009) Fondation profonde, Master 2 génie civil, Université cheikh Anta Diop de Dakar.
- Cen (2005) Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales, NF EN 1997-1 (P94-251-1).
- Cen (2006) Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais, NF EN 1997-2 (P94-252).
- Plumelle, C. (2005) cour fondation profonde et pieux, C.N.A.M .Géotechnique B1/B6.
- Burlon, S., Carpinteiro, M., Glandy, M., (2015) Calcul géotechnique selon l'Eurocode 7 et ses normes d'application, Service Relation clientèle Techniques de l'Ingénieur Immeuble Pleyad 1 39, boulevard Ornano 93288 Saint-Denis Cedex.
- Baguelin,F., Burlon,S.,Bustamante,M., Frank,R.,Gianeselli,L., Habert,J., Legrand,S., justification de la portance ses pieux avec la norme « fondations profondes» NF P 94-262 et le Pressiomètre, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2012–Bordeaux 4-6 juillet 2012.
- Burlon, S.,Desodt,C., Habert,J.,Reiffsteck,P.(2017) Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode7. Dunod Technique.2017.1p .
- Andrianina zo hasinavalona, (2013), conception, optimisation et informatisation des calculs de fondation du superficiels cas du Coliseum Antsonjombe, mémoire d'ingénieur en Bâtiment et Travaux Publics, université d'Antananarivo.
- Hassini, I, (2016), Evaluation des tassements pour une fondation profonde, mémoire en vue d'obtention du diplôme de Master 2 génie civil, université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou
- Eurocode 7, Calcul géotechnique –Partie 1 : Règles générales, XP ENV 1997-1,30 oct. 1994, Comité Européen de Normalisation.
- Luc,S. Module MXG4 T.P. Terrain: Reconnaissance de sol in situ Génie Civil et Construction Durable. Licence. France. 2016.
- Zamoum,S. (2015), Modélisation du comportement d'un quai sur pieux. Application à un

quai du port de Djen - Djen (Jijel), Thèse en vue l'obtention du diplôme de Master 2 Genie civil ,université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou.

Moulouel, K. (2020), Analyse Numérique du Comportement d'un Pieu Isolé et du Sol Avoisinant, Mémoire de fin d'études de Master Académique, université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou.

Bourokba Mrabent,A.(2015) calcul pratique des fondations, Polycopié, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.

Frank, R., CUIRA, F., BURLON, S. (1995) Fondations profondes, Construction et travaux publics | Mécanique des sols et géotechnique, Service Relation clientèle Techniques de l'Ingénieur Immeuble Pleyad 1 39, boulevard Ornano 93288 Saint-Denis Cedex

Boumaza,N., Khebbab,M.(2015) Conception et calcul des fondations sur pieux, Mémoire de Master Génie Civil option Géotechnique, université de Guelma.

Document manuel utilisation Geofond 2014, (2014)

<http://youtu.be/fm9pJFGVISQ>.

LES ANNEXES

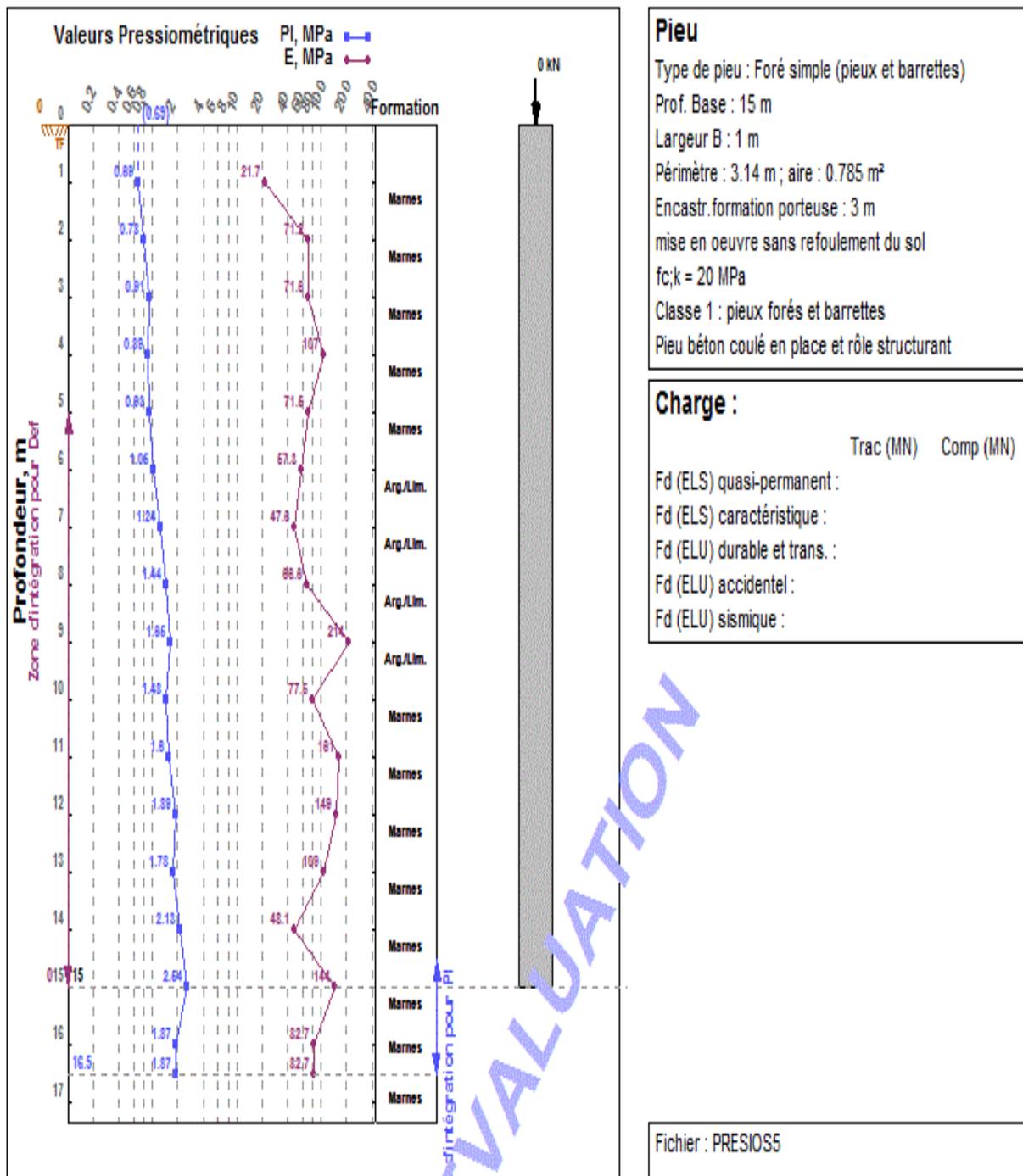
ANNEXE A

Annexe A.1

Résultat des essais pressiométrique avec le Geofond 1.22

- Pour un pieu de 15m de hauteur et 1 m de diamètre (choot Gadain Batna)

Sondage 05 :



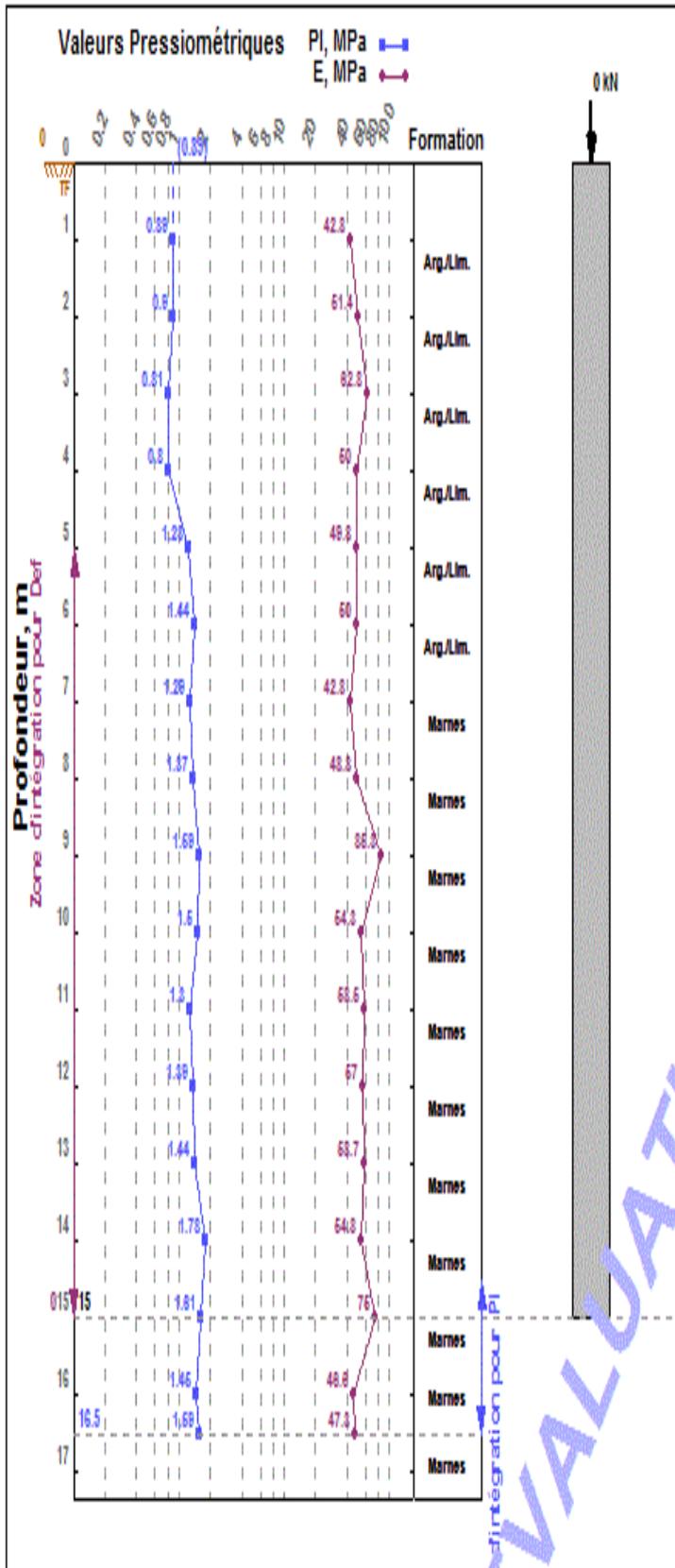
Pieu
 Type de pieu : Foré simple (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 15 m
 Largeur B : 1 m
 Périmètre : 3.14 m ; aire : 0.785 m²
 Encastr. formation porteuse : 3 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol
 fc;k = 20 MPa
 Classe 1 : pieux forés et barrettes
 Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Charge :

	Trac (MN)	Comp (MN)
Fd (ELS) quasi-permanent :		
Fd (ELS) caractéristique :		
Fd (ELU) durable et trans. :		
Fd (ELU) accidentel :		
Fd (ELU) sismique :		

Fichier : PRESIOS5

Sondage 06 :



Pieu

Type de pieu : Foré simple (pieux et barrettes)

Prof. Base : 15 m

Largeur B : 1 m

Périmètre : 3.14 m ; aire : 0.785 m²

Encastr. formation porteuse : 3 m

mise en oeuvre sans refoulement du sol

f_{c;k} = 20 MPa

Classe 1 : pieux forés et barrettes

Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

Fd (ELS) quasi-permanent :

Fd (ELS) caractéristique :

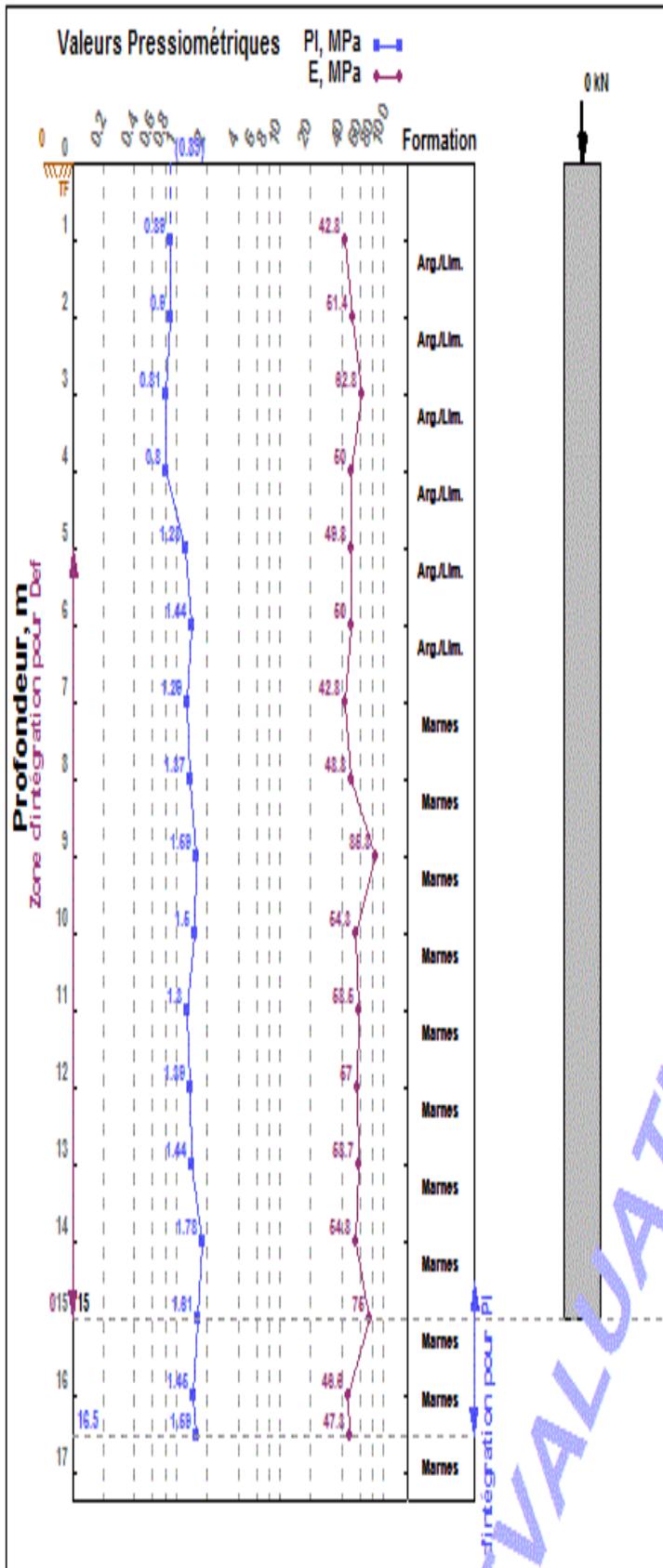
Fd (ELU) durable et trans. :

Fd (ELU) accidentel :

Fd (ELU) sismique :

Fichier : PRESIOS7

Sondage 07 :



Pieu

Type de pieu : Foré simple (pieux et barrettes)

Prof. Base : 15 m

Largeur B : 1 m

Périmètre : 3.14 m ; aire : 0.785 m²

Encastr. formation porteuse : 3 m

mise en oeuvre sans refoulement du sol

$f_{c;k} = 20$ MPa

Classe 1 : pieux forés et barrettes

Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

Fd (ELS) quasi-permanent :

Fd (ELS) caractéristique :

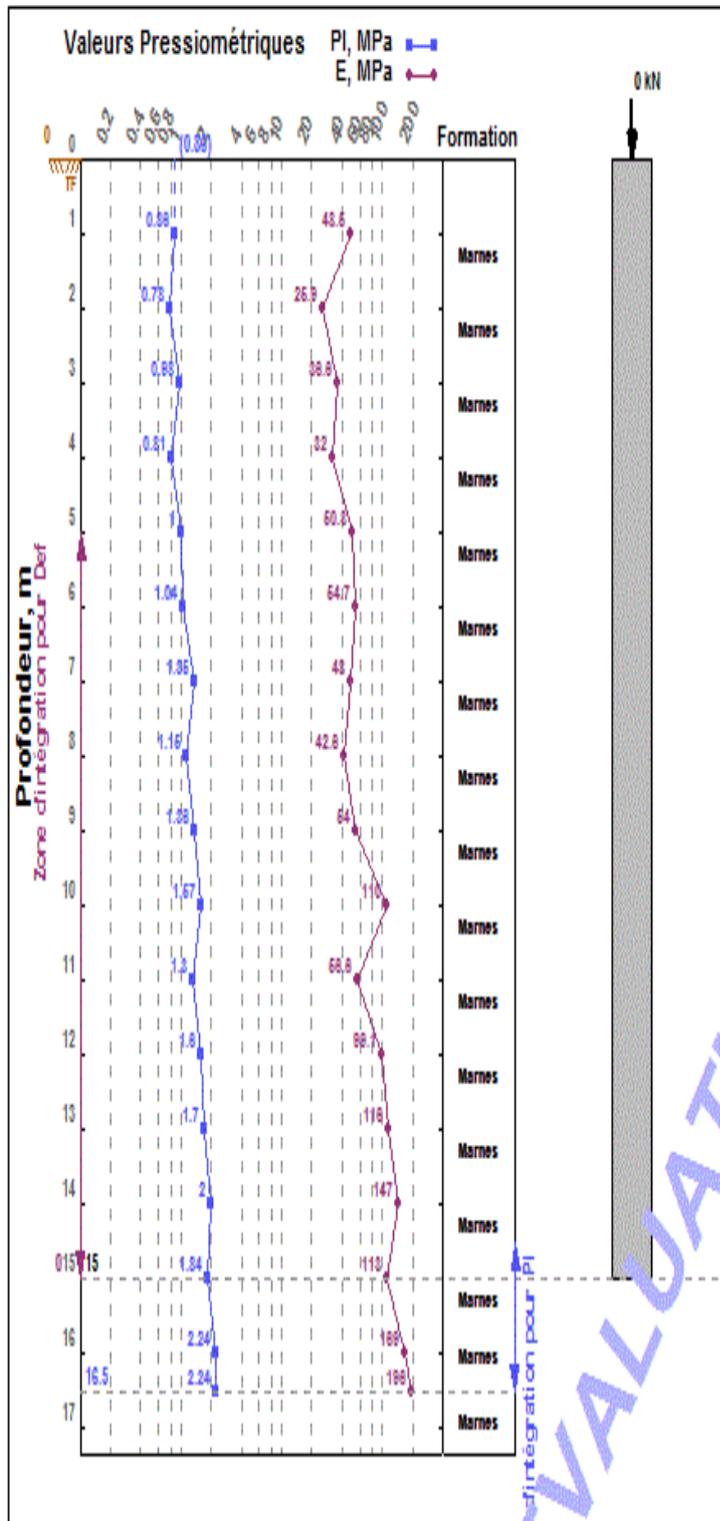
Fd (ELU) durable et trans. :

Fd (ELU) accidentel :

Fd (ELU) sismique :

Fichier : PRESIOS7

Sondage 08 :



Pieu

Type de pieu : Foré simple (pieux et barrettes)

Prof. Base : 15 m

Largeur B : 1 m

Périmètre : 3.14 m ; aire : 0.785 m²

Encastr. formation porteuse : 3 m

mise en oeuvre sans refoulement du sol

fc;k = 20 MPa

Classe 1 : pieux forés et barrettes

Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

Fd (ELS) quasi-permanent :

Fd (ELS) caractéristique :

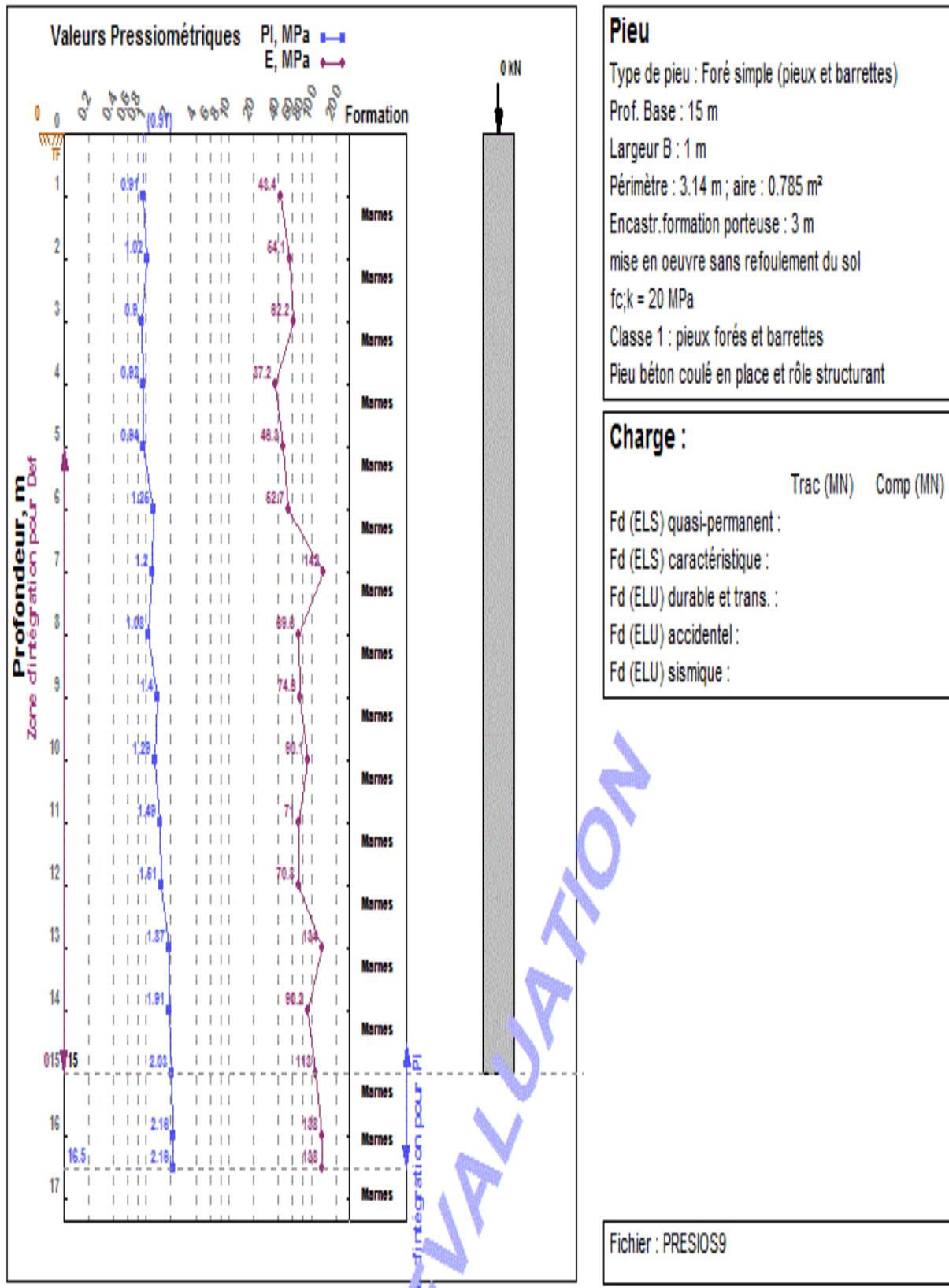
Fd (ELU) durable et trans. :

Fd (ELU) accidentel :

Fd (ELU) sismique :

Fichier : PRESIOS8

Sondage 09 :



Pieu

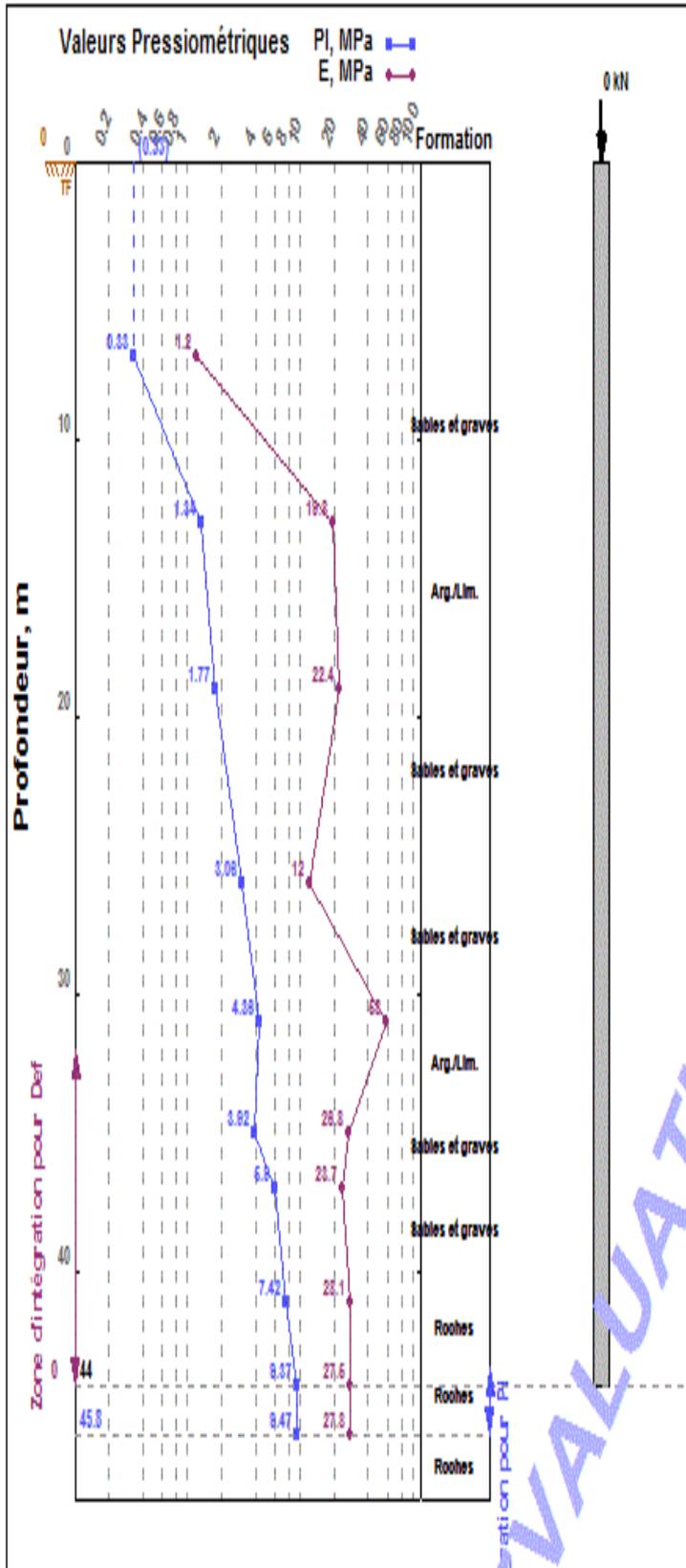
Type de pieu : Foré simple (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 15 m
 Largeur B : 1 m
 Périmètre : 3.14 m ; aire : 0.785 m²
 Encastr. formation porteuse : 3 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol
 $f_c/k = 20$ MPa
 Classe 1 : pieux forés et barrettes
 Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

Fd (ELS) quasi-permanent :
 Fd (ELS) caractéristique :
 Fd (ELU) durable et trans. :
 Fd (ELU) accidentel :
 Fd (ELU) sismique :

➤ Pour un pieu de 44 m et 1.2 m de diamètre



Pieu

Type de pieu : Foré simple (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 44 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 4 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol
 f_c;k = 20 MPa
 Classe 1 : pieux forés et barrettes
 Pieu béton coulé en place et rôle structurant

Charge :

	Trac (MN)	Comp (MN)
Fd (ELS) quasi-permanent :		
Fd (ELS) caractéristique :		
Fd (ELU) durable et trans. :		
Fd (ELU) accidentel :		
Fd (ELU) sismique :		

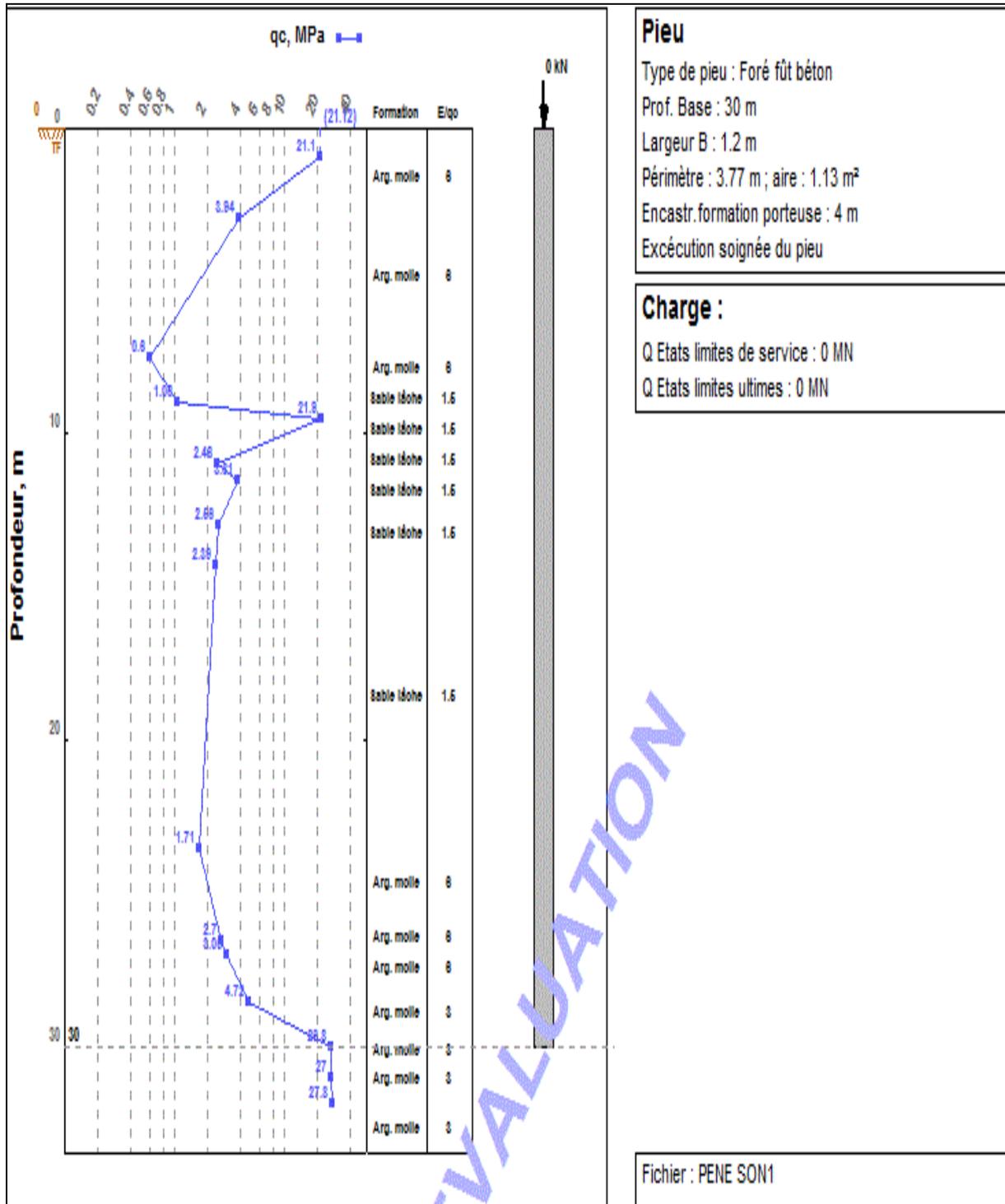
Fichier : A 44

ANNEXE A.2

Résultat d'essai de pénétromètre statique avec Geofond 1.22

Sondage 01 :

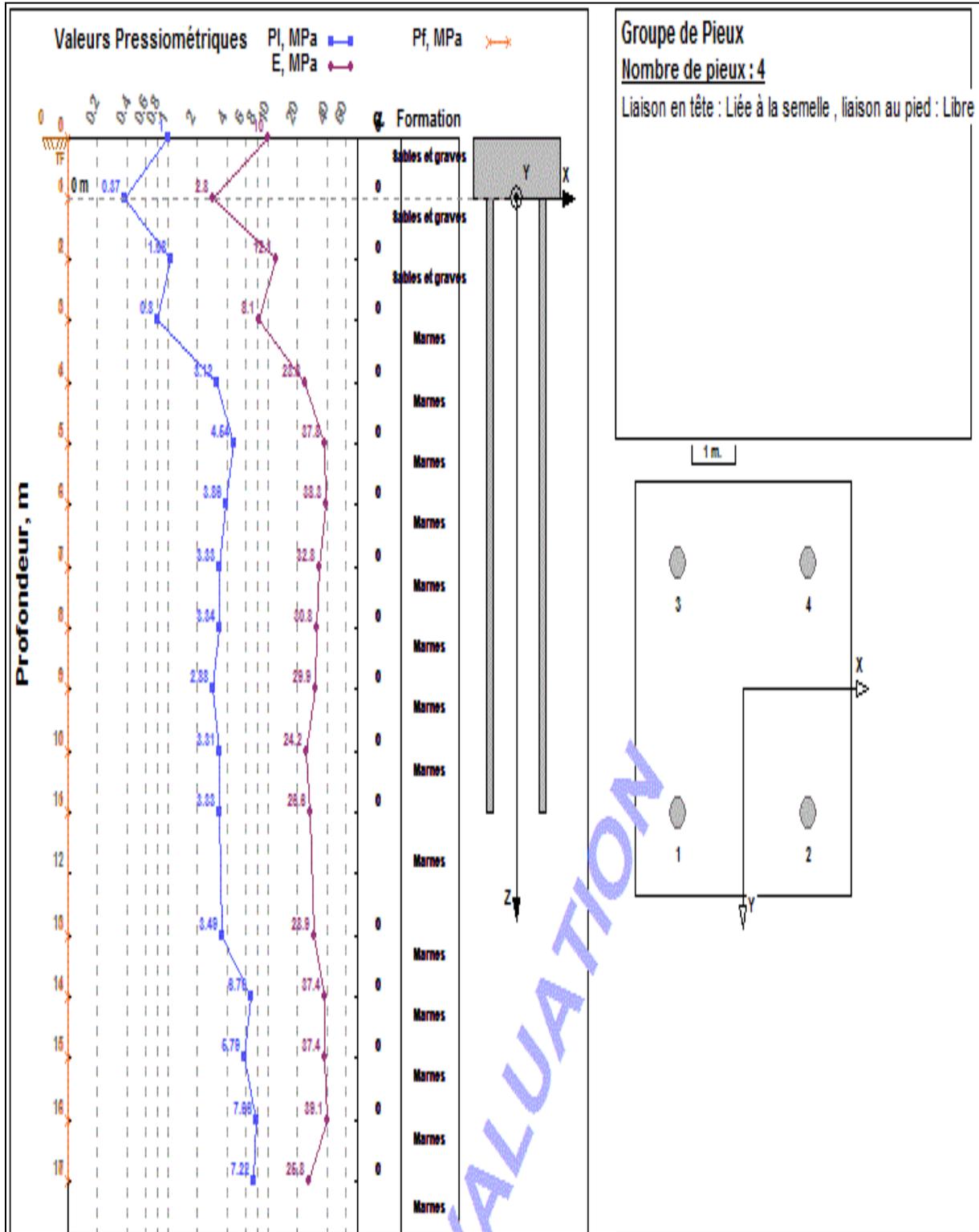
- Pour un pieu de 30 m et 1.2 m de diamètre du pont y



ANNEXE A.2

Résultat d'essai pressiométriques avec Geofond 1.22 :

➤ Pour Groupe de pieux :



➤ Résultats du Groupe de pieux :

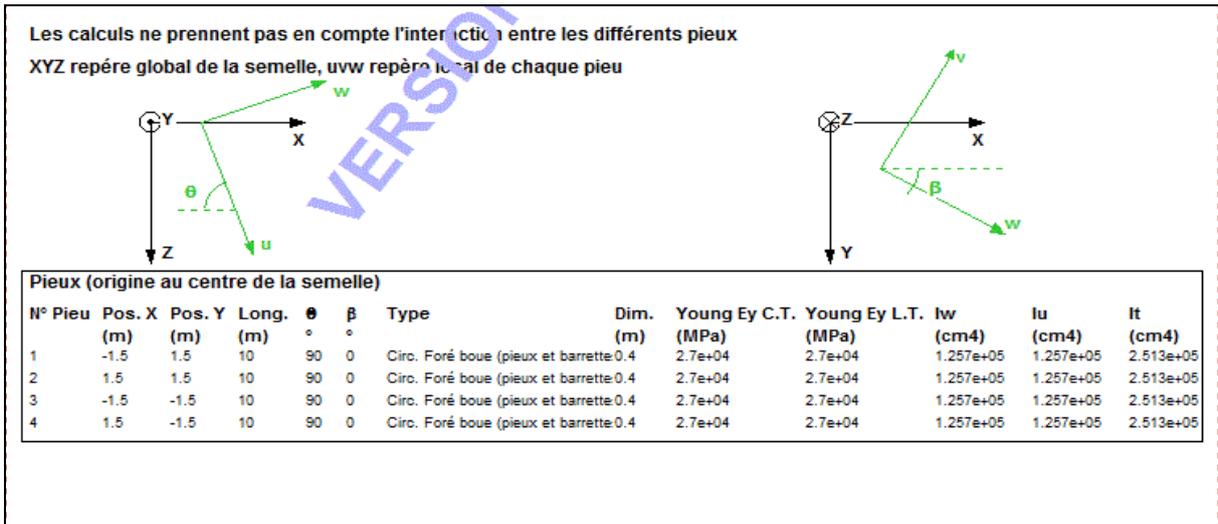


Figure A.1 : le calcul de la charge

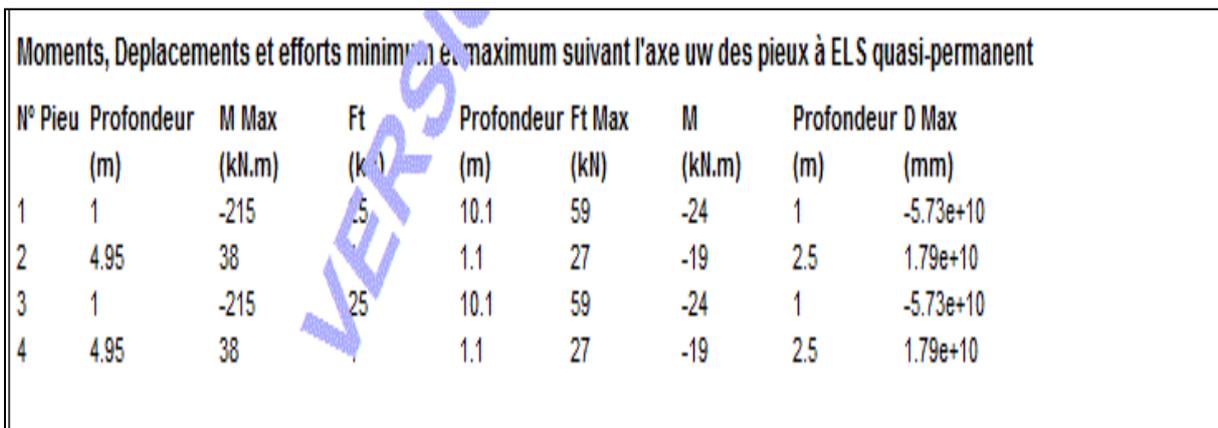


Figure A.2 : la capacité portante en ELS

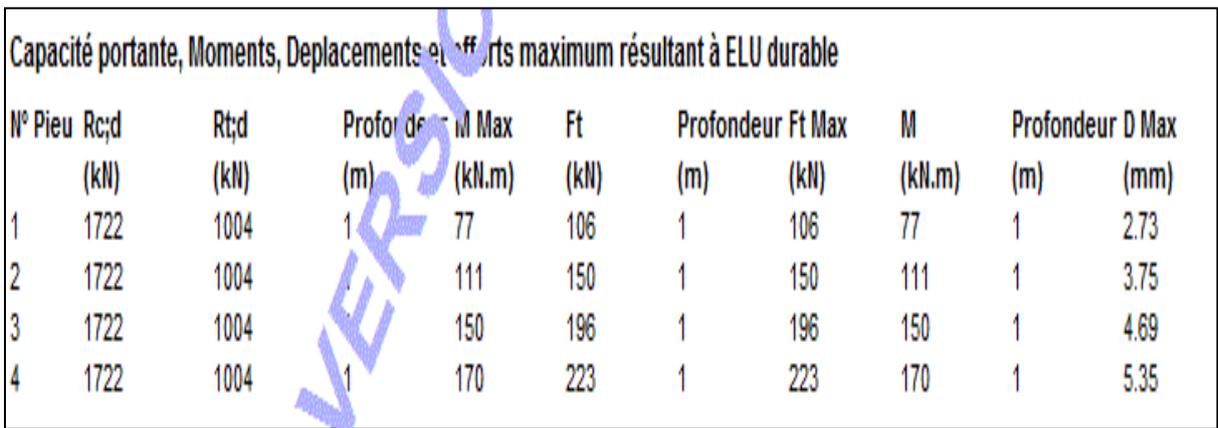


Figure A3 : la capacité portante en ELU

ANNEXE B

Annexe B.1 Pressiomètre

Tableau B.1 Résultats des essais pressiométriques (SETA Annaba) (Boumaza, 2015).

➤ Pour le pieux de 15 m et 1m de diamètre (Choot Gadaine Batna).

Prof m	SC 05		SC 06		SC07		SC08		SC09	
	E MPa	PL MPa								
1	21.7	0.69	11.1	0.65	42.8	0.89	48.5	0.86	43.4	0.91
2	71.2	0.78	79.7	0.71	51.4	0.9	25.9	0.78	54.1	1.02
3	71.6	0.91	29	0.48	62.8	0.81	36.6	0.98	62.2	0.9
4	107.1	0.89	18.5	0.53	50.8	0.8	23	0.81	37.2	0.92
5	71.5	0.93	18.2	0.71	49.6	1.23	50.3	1	46.3	0.94
6	57.3	1.05	36.6	0.84	50	1.44	54.7	1.04	52.7	1.25
7	57.6	1.24	51.	0.85	42.8	1.29	48	1.35	142.30	1.2
8	66.6	1.44	52	0.95	48.3	1.37	42.6	1.15	69.6	1.08
9	214.3	1.65	56.3	1.58	85.3	1.59	54	1.36	74.6	1.4
10	77.5	1.48	51.2	1.54	54.3	1.50	110.4	1.57	90.1	1.29
11	160.7	1.6	44.4	1.35	58.5	1.30	56.6	1.3	71	1.49
12	149.2	1.89	75.7	1.31	57	1.39	99.1	1.6	10.8	1.51
13	108.7	1.87	58	1.43	58.7	1.44	116.3	1.7	134.1	1.87
14	48.1	2.13	54.5	1.56	54.8	1.78	147.4	2	90.2	1.91
15	143.8	2.54	74.1	1.78	75	1.61	112.8	1.84	113.2	2.03
16	82.7	1.87	98.3	1.86	46.6	1.45	196.2	2.24	138.1	2.16
16.5	82.7	1.87	98.3	1.86	46.6	1.45	196.2	2.24	138.1	2.16

Tableau B.2 Résultats des essais pressiométriques (LTP Est Annaba)

- Pour le pieu de 44 m et 1.2 m de diamètre du Centre multifonctionnel d'Annaba (CMA)

Prof (m)	SC 01	
	E MPa	PL MPa
7	1.20	0.33
13	19.80	1.34
19	22.40	1.77
26	12.00	3.06
31	58.00	4.36
35	26.80	3.92
37	23.70	5.90
41	28.10	7.42
44	27.50	9.37
45.8	27.50	9.37

ANNEXE B.3

Pénétrromètre Statique

Tableau B.4 Résultats d'essai pénétromètre statique (LTP Est Annaba)

➤ Pour le pieu de 30 m et 1.2 m de diamètre du pont y (**Boumaza, 2015**)

Profondeur (m)	Rp (Mpa)
0	21.12
3	3.94
7.5	0.60
9	1.06
9.5	21.88
11	2.46
11.5	3.81
13	2.56
14.25	2.39
23.5	1.71
26.50	2.7
27	3.05
28.5	4.72
30	26.77
31	27
31.8	27

ANNEXE B.4

Tableau B.5 Résultat d'essai pressiométriques avec Geofond 1.22 :

➤ Pour Groupe de pieux :

Profondeur (m)	E (Mpa)	Pl (Mpa)
0	10	1
1	2.8	0.37
2	12.1	1.08
3	8.1	0.8
4	23.8	3.12
5	37.8	4.54
6	38.3	3.86
7	32.8	3.33
8	30.8	3.34
9	29.9	2.88
10	24.2	3.31
11	26.6	3.33
12	26.6	3.33
13	28.93	3.49
14	37.4	6.79
15	37.4	5.79
16	39.1	7.66
17	25.8	7.22