

APPROCHE COMPARATIVE DES RÉSULTATS DE CALCUL DE LA CAPACITÉ PORTANTE DES PIEUX FORÉS AVEC LES PIEUX BATTUS PAR LA MÉTHODE PRESSIOMÉTRIQUE AINSI QUE CELLE DE LEURS TECHNIQUES DE MISE EN ŒUVRE : « CAS DES PIEUX ISOLÉS »

Par

Jean René PHAMBU NGEMBO

Assistant à l'Institut du Bâtiment et des Travaux Publics de Matadi

RÉSUMÉ

Le présent article expose brièvement les techniques de réalisation des fondations sur pieux forés et celles des fondations sur pieux battus, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les principes de calcul de la capacité portante des pieux dans les deux cas, sur base des résultats des essais pressiométriques.

A cet effet, après avoir défini les concepts du sujet, faire une typologie des pieux forés et battus, et énoncer brièvement les différentes phases d'exécution de l'essai pressiométrique ainsi que les principes de calcul de la capacité portante des pieux forés et battus sur base des résultats dudit essai, un exemple illustratif de calcul de capacité portante des pieux forés avec tube récupéré et de pieux en béton préfabriqué battu, tous deux considérés comme isolés, de forme circulaire, avec un diamètre de 45 cm, devant être mis en place sur un même site dont le profil pressiométrique a été donné, a été résolu puis suivi d'une synthèse sur les techniques de mise en œuvre des pieux étudiés ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Les recherches menées ont permis de trouver pour les deux cas des pieux étudiés, deux valeurs différentes de capacité portante et de constater une différence dans leurs techniques de mise en œuvre, avantages et inconvénients. Ce qui a permis de faire une conclusion comparative sur base des résultats obtenus et dégager la solution la meilleure.

Mots-clés : *Fondation, pieu foré, pieu battu, essai pressiométrique, résistance à la pointe, résistance au frottement, capacité portante, technique, mise en œuvre*

SUMMARY

This article briefly explains the techniques for the realization of bored and rammed pile foundations, their advantages and disadvantages, as well as the principles of calculation of the bearing capacity of the piles in both cases, based on the results of pressuremeter tests.

To this end, after defining the concepts of the subject, make a typology of bored and driven piles, and briefly state the different phases of execution of the pressuremeter test

as well as the principles of calculation of the bearing capacity of bored and driven piles based on the results of the said test, an illustrative example of calculation of bearing capacity of bored piles with recovered pipe and precast concrete driven piles, both considered as isolated, of circular shape, with a diameter of 45 cm, to be placed on the same site whose pressiometric profile was given, was solved and then followed by a synthesis on the techniques of implementation of the studied piles as well as their advantages and disadvantages.

The research carried out allowed to find for the two cases of the studied piles, two different values of bearing capacity and to note a difference in their techniques of implementation, advantages and disadvantages. This allowed to make a comparative conclusion based on the results obtained and to identify the best solution.

Keywords: *Foundation, bored pile, driven pile, pressuremeter test, peak resistance, friction resistance, bearing capacity, technique, implementation*

INTRODUCTION

La fondation est la partie inférieure d'une construction ayant pour objet de reprendre les charges et surcharges de cette dernière en vue de les transmettre au sol tout en assurant la stabilité de sa structure.

Etant donné qu'elle supporte les charges et surcharges de la superstructure de l'ouvrage, elle doit elle-même être stable c'est-à-dire conçue, dimensionnée et réalisée suivant les normes.

Si la conception et le choix du type de fondation implique la connaissance des caractéristiques géotechniques du sol d'assise et de la profondeur du bon sol, par contre son dimensionnement tient compte de la nature de la construction, des charges et surcharges à supporter et des matériaux de construction à utiliser et enfin, sa réalisation se fait sur base des technologies conformes aux normes et règles d'art.

Les défauts de conception, de dimensionnement et parfois de réalisation des fondations sont souvent à la base de dégradation et d'accidents de plusieurs ouvrages tels qu'immeubles, ponts, réservoirs ...

A l'origine des dégradations et accidents sont les tassements uniformes ou différentiels dus soit aux faiblesses des contraintes admissibles de compression du sol à celles transmises par la fondation ou soit le fondement de la fondation sur une couche de sol de capacité portante insuffisante

Ainsi la connaissance du sol d'assise est la première démarche à faire lors d'une étude de fondation d'une construction. Elle consistera à déterminer au laboratoire des caractéristiques du sol à partir des échantillons prélevés sur chantier et ensuite de déterminer in situ la profondeur à laquelle se situe le bon

sol d'assise de la fondation ainsi que la résistance de ce dernier en compression, soit grâce aux essais pénétrométriques ou soit, par des essais pressiométriques.

Suivant la profondeur où se situe le bon sol, il y a possibilité de réaliser trois types de fondations :

- Les fondations superficielles si le bon sol est à moins de 3,00 m de profondeur (semelles continues, semelles isolées et radier général tous en béton armé) ;
- Les fondations semi profondes si le bon sol est situé à une profondeur comprise entre 3 et 6.00 m de profondeur (fondation par puits) ;
- Les fondations sur pieux si le bon sol est situé à plus de 6.00 m de profondeur.

De tous ces types cités ci-hauts, les fondations sur pieux sont plus complexes à réaliser suite aux questions suivantes :

- Quel est le choix de la méthode de sondage pour déterminer la profondeur du bon sol ?
- Quel est le choix du type de pieu et son adaptation sur la nature du sol du site ?
- Quelle est l'utilisation de la technologie conforme aux normes pour la mise en place du pieu dans le sol (choix des engins et leurs manipulations) ?
- Quelle est la capacité des pieux à pouvoir résister contre les chocs dus au battage et aux réactions du sol ?
- Quelle est la capacité des pieux à pouvoir supporter les charges et surcharges totales de la construction ?
- Quelle est la stabilité des constructions environnantes du site vis à vis des vibrations de sols dus aux chocs d'enfoncements des pieux ?

En réponse aux questions ci-dessus, nous nous posons les hypothèses suivantes :

- La méthode de sondage préconisée dans ce cas est l'essai au pénétromètre ;
- Les types des pieux à utiliser dans cette étude sont les pieux forés et battus ;
- Une analyse comparative de technologie de réalisation de chaque fondation sera faite ;
- La capacité portante des deux types des pieux seront déterminés par diverses méthodes sur bases des résultats des essais pénétrométriques et des types sols ;
- Une conclusion sera faite à l'issue de l'étude sur base d'une orientation technique finale.

I. DÉFINITIONS DES CONCEPTS DU SUJETS

- **Approche** : selon le dictionnaire Larousse, c'est la manière d'aborder un sujet, un problème.
 - **Approche comparative** : consiste à comparer les phénomènes à étudier et est utilisée comme un instrument de mesure.
 - **Fondation** : elle se définit comme étant la partie inférieure d'un bâtiment ou d'un autre ouvrage des travaux publics qui assure la transmission dans le sol de la totalité des charges (poids propres, surcharges d'exploitation, forces climatiques, forces dues aux effets sismiques).
 - **Pieu** : est une fondation profonde de forme élancée, destinée à asseoir un ouvrage sur un bon sol lorsque les couches superficielles sont des résistances médiocres, réalisé en acier, en béton ou en béton armé (autrefois en bois).
 - **Pieu forée** : c'est un pieu béton armé coulé sur place dans un forage.
 - **Pieu battu** : peut-être Pieu en béton armé préfabriquée ou en acier, (profil H à âme renforcée ou palpieu) mise en place par battage avec refoulement du sol.
 - **Essai pressiométriques** : est un essai de sondage de sol réalisé in situ afin de déterminer à l'aide d'un pressiomètre la résistance du sol et la profondeur de la couche porteuse de la fondation.
 - **Pieu isolée** : c'est un pieu préfabriqué battu seul ou encore un pieu foré coulé sur place seul.
 - **Fondation profonde** : c'est une fondation réalisée lorsque la profondeur du substratum résistant est située à plus de 6,00 m de profondeur.

Dans ce cas, la fondation est constituée des pieux préfabriqués battus dans le sol ou encore des pieux forés (constitués des bétons coulés sur place dans des puits forés de plus de 6 m de profondeur).
 - **Technique** : ensemble des procédés employés pour produire une œuvre ou obtenir un résultat déterminé (selon dictionnaire le Robert).
 - **Mise en œuvre** : emploi de quelque chose qui débute pour un usage détermine. C'est le fait de mettre en place un projet.
- N.B** : Les pieux forés et les pieux préfabriqués en béton armé qui fait l'objet de cette étude sont représentés dans les figures 1 et 2 ci-dessous.



Figure 1 : Pieu foré



Figure 2 : Pieu préfabriqué en béton armé

II. DESCRIPTION D'UN PIEU ET JUSTIFICATION GÉOMÉTRIQUE

II.1. Description (cfr. Figure 3)

Un pieu est constitué de trois parties suivantes :

- **La tête** : Partie supérieure du pieu qui reçoit directement les charges de la superstructure par l'intermédiaire parfois d'une semelle de répartition ou encore d'une poutre longrine.
- **Le fut** : partie intermédiaire comprise entre la tête et la pointe, qui assure la transmission des efforts latéraux au sol
- **La pointe** : partie inférieure en contact avec le substratum résistant, assurant la transmission des charges reprises par la base du pieu au sol.

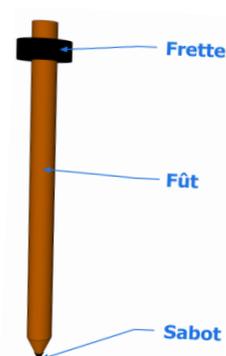


Figure 3

II.2. Justification géométrique¹

En considérant B comme la dimension du plus petit côté de la section du pieu et D la hauteur d'ancrage du pieu dans le sol, géométriquement une fondation est dite profonde si le rapport :

$$\frac{B}{D} < 1/6 \quad \text{ou} \quad \text{encore} \quad \frac{D}{B} \geq 10$$

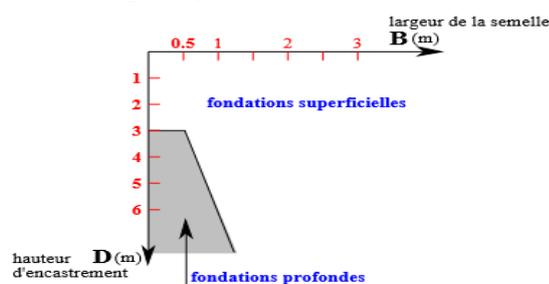


Figure 4

¹ CHEIKHI. SARR et GORA SARR, *Etude comparative entre méthodes de calcul des pieux : Application à l'échangeur de la Patte d'OIE*, Ecole supérieure Polytechnique de Thiès, Sénégal 2007, p. 3 ; FREDERIC, *Technologie Fondations profondes*, Lycée Pierre Caraminot, 2008, p. 3.

III. TYPOLOGIE DES PIEUX

La typologie des pieux peut se faire de la manière suivante :

- Les matériaux de fabrication ;
- La technique de mise en œuvre ;
- Leurs modes de résistances aux charges sollicitantes ;
- Leurs dispositions sous la semelle de répartition des charges de la superstructure.

1) Suivant le matériau de fabrication

On distingue quatre types :

- Le pieu en bois ;
- Le pieu en béton armé ;
- Le pieu en béton précontraint ;
- Le pieu en acier.

2) Suivant la technique de mise en œuvre

Il y a deux grandes classes des pieux :

- Les pieux mis en place sans refoulement du sol ;
- Les pieux mis en place avec refoulement du sol.

Dans ces deux classes sont distingués au total vingt sortes de pieux réparties dans neuf catégories telles qu'indiquées dans l'organigramme² de la figure 6 et dans le tableau N° 1.

3) Suivant la résistance aux charges sollicitant le pieu³

Lorsqu'un pieu est enfoncé dans le sol par battage, avec une capacité portante Q_u , le sol s'oppose à cette force avec la résistance à la pointe du pieu Q_{pu} et la résistance au frottement latéral sol-pieu Q_{su} .

Dans ce contexte, on distingue ;

- Le **pieu enfoncé par battage jusqu'à refus** : pieu ayant atteint le substratum résistant présentant donc une résistance à la pointe et une résistance au frottement dans ce cas $Q_{pu} \neq 0$; $Q_{su} \neq 0$ et $Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$;
- Le **pieu flottant** : pieu n'ayant pas atteint le substratum résistant mais présentant un frottement latéral sol-pieu dans ce cas : $Q_{pu} = 0$; $Q_{su} \neq 0$ et $Q_u = Q_{su}$;
- Le **pieu à frottement négatif** : c'est un pieu ayant atteint le substratum résistant après enfoncement mais ne présente aucune résistance au frottement sol.

² LMR, *Classification des pieux*, École polytechnique de Lausanne, p. 1.

³ FREDERIC, *Technologie Fondations profondes*, Lycée Pierre Caraminot, 2008, p. 5.

Dans ce cas $Q_{pu} \neq 0$; $Q_{su} = 0$ et $Q_u = Q_{pu}$

Ce pieu est autre appelé pieu colonne, sur ce pour inciter le frottement on prend la disposition de faire le chemisage. (Cfr. Figure 5)

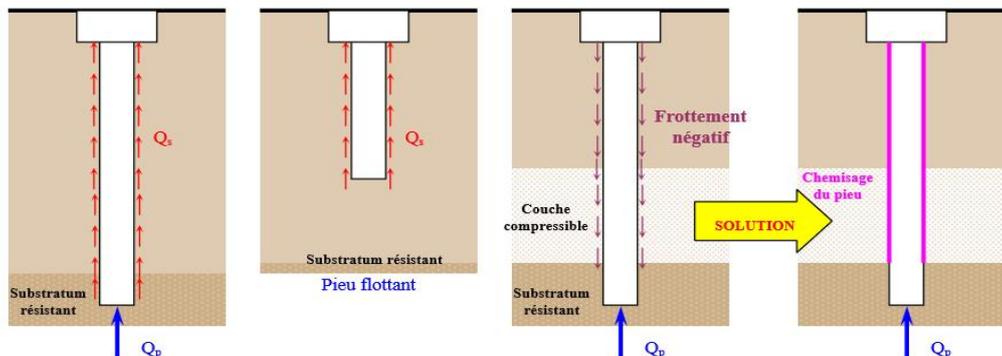


Figure 5

4) Suivant leurs dispositions sous la superstructure

Nous distinguons :

- **Le pieu isolé**

Un pieu est dit isolé lorsqu'il est disposé seul sous la semelle de répartition des charges de la superstructure. Dans ce cas, il transmet seul au sol les charges reprises par la semelle de répartition. (Cfr. figure 6)

- **Le groupe de pieux**

Un groupe de pieux est un ensemble de deux ou plusieurs pieux disposés avec écartement équidistant sous la semelle de répartition des charges de la superstructure de l'ouvrage. Dans ce cas, la charge reprise par la semelle de répartition est transmise au sol par l'ensemble des pieux. (Cfr. figure 7)

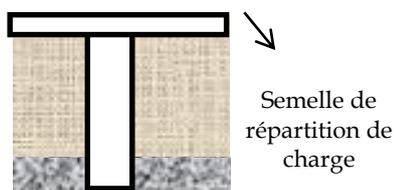


Figure 6 : Pieu isolé

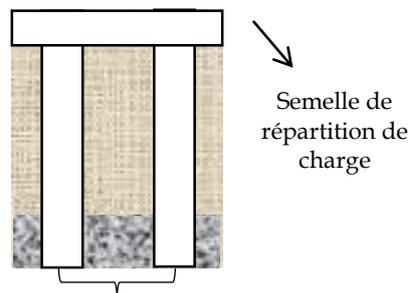


Figure 7 : Groupe de pieux

ORGANIGRAMME DE CLASSIFICATION DE PIEUX

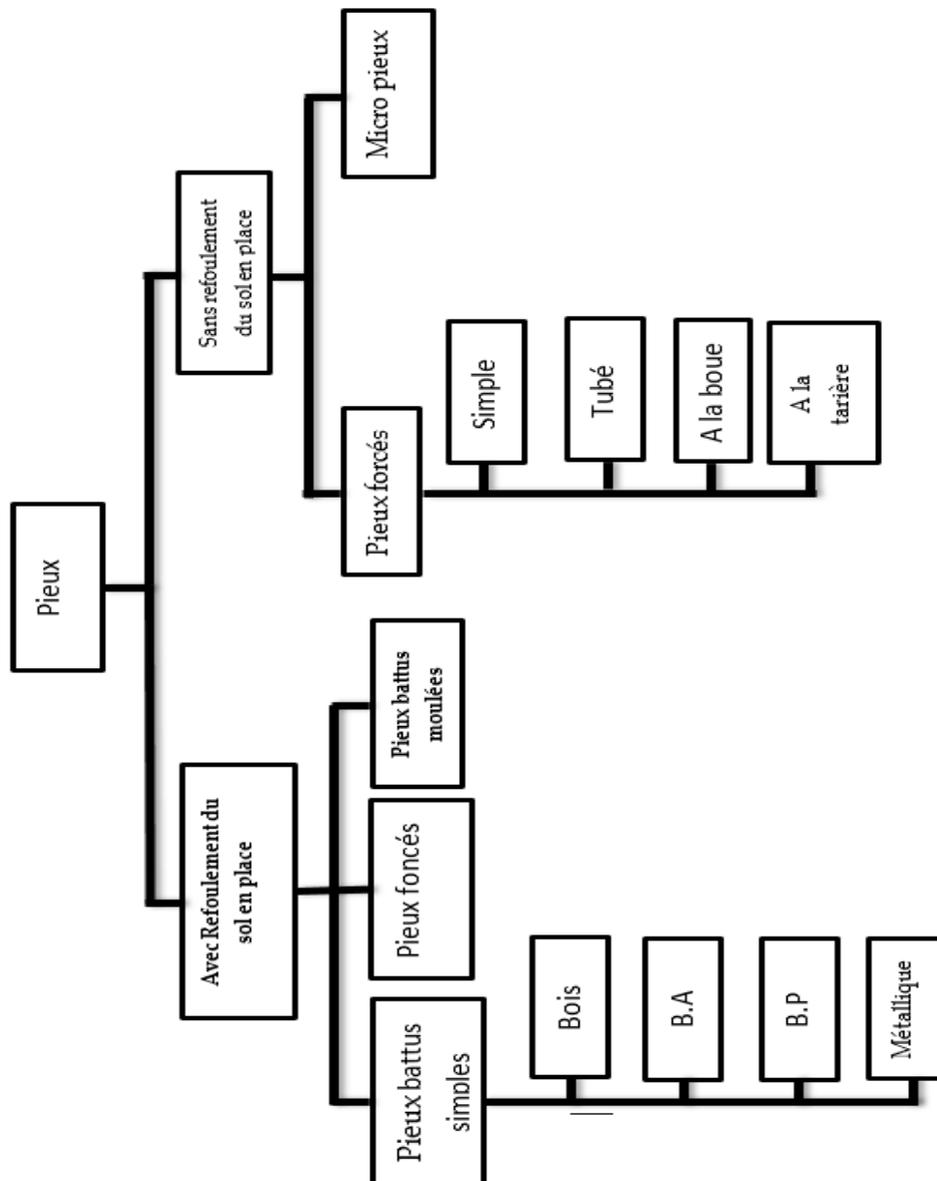


Tableau N° 1 : Classe de pieux ⁴

Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de Reference
CLASSE I. PIEUX MISE EN PLACE SANS REFOULEMENT			
I. Pieux forés sans refoulement			
1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
4	Foré tubé (virole récupéré)	FTR	
5	Foré simple ou boue avec rainurage du puits	FFR, FBR	
II. Pieux forés tarière creuse			
6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
CLASSE II. PIEUX MIS EN PLACE AVEC REFOULEMENT DU SOL			
III. Pieux vissés avec refoulement			
7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
8	Vissé tubé	VT	
IV. Pieux battus fermes avec refoulement			
9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
10	Battu enrobé (béton-mortier-coulis)	BE	
11	Battu moulé	BM	
12	Battu acier fermé	BAF	
V. Pieux battus acier ouvert avec refoulement			
13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
VI. Profilés H battus avec refoulement			
14	Profil H battu	HB	NF EN 12699
15	Profil H battu injecte	HB	
VII. Palplanches battus avec refoulement			
16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
CLASSE I BIS LES MICRO PIEUX			
VIII. Micro pieux sans refoulement			
17	Micropieux type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
18	Micropieux type II	M2	
IX. Micropieux sans refoulement			
19	Pieu ou micropieu injecte mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	NF EN 1536/14199/12699
20	Pieu ou micropieu injecte mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

⁴ LIONEL FIX, *Fondations profondes*, Cerema, Ile de France, ENPC 2019, pp. 7-8.

IV. RÉALISATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Il sera aberrant de procéder à la réalisation d'une fondation sur pieu sans pourtant définir les caractéristiques géotechniques du sol telles que la lithologie, la profondeur du substratum résistant, la localisation de la nappe, la résistance en compression du sol.

En ce qui concerne les études de fondations sur pieux, la connaissance du site peut être faite soit à l'aide des essais :

- CPT : essai de pénétration au cône ;
- SPT : standard pénétration test ;
- Pressiométriques (au Pressiomètre Menard).

Dans cet article, l'essai utilisé est l'essai pressiométrique.

IV.1 Objectif de l'essai

L'essai pressiométrique est effectué à l'aide du pressiomètre Menard.

C'est un essai de chargement statique du terrain en place, effectué grâce à une sonde cylindrique dilatable radialement introduite dans un forage qui permet de recueillir les informations.

Les caractéristiques mécaniques obtenues lors des essais permettent :

- De faire la lithologie du site ;
- De définir l'aptitude des terrains à recevoir certains types de constructions et d'orienter le choix des fondations d'ouvrages ;
- De dimensionner les fondations ;
- D'évaluer les déplacements des structures en fonction des sollicitations auxquelles elles sont soumises.

Cet essai fait l'objet de la norme française **NF P 94110-1**

L'ensemble du matériel pressiométrique comprend : un contrôleur pression-volume CPV, une sonde et les tubulures.



Figure 8 : Contrôleur pression volume⁵



Figure 9 : Sonde pressiométrique.

⁵ ZADJAOUI A et ASSAOUI S., *Essais & géotechniques*, TP essais pressiométrique, Université Themcen, Algérie, 2014, p.2.

IV.2 Principe de l'essai

La sonde cylindrique dilatable reliée à un appareil de mesure pression-volume, appelé Contrôleur Pression Volume (CPV), situé à la surface du sol est introduite dans le forage,

Pour obtenir une courbe "pression appliquée - volume injecté", représentative de la relation contrainte -déformation jusqu'à la rupture du sol en place.

On injecte de l'eau sous pression dans la sonde de mesure qui vient déformer le sol.

Le volume injecté et la pression appliquée sont mesurés.

Le volume d'eau injecté renseigne sur la déformation du sol, et la pression de l'eau renseigne sur la contrainte reprise par le sol.

L'exploitation des résultats permettra de connaître deux caractéristiques pressiométriques importantes du sol que l'on utilise pour le dimensionnement des fondations :

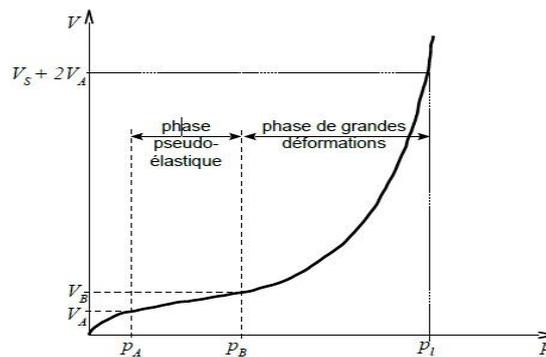
- P_l : pression limite du sol (caractéristique de rupture du sol) ;
- E_M : module pressiométrique Ménard (caractéristique de déformabilité du sol)

Le mode de mise en place de la sonde, est lié à la nature des sols, à leur état, à la présence ou non d'une nappe.

IV.3 Exploitation des résultats

Pour un essai à une profondeur donnée, la courbe pressiométrique brute est la représentation graphique du volume d'eau injecté dans la sonde en fonction de la pression d'eau $V = f(p_r)$. p_r est la pression d'eau lue au manomètre du CPV et V le volume de liquide injecté dans la sonde et mesuré à la fin de chaque palier de pression.

Cette courbe brute doit être corrigée en prenant en compte la **résistance propre de la sonde**, et la **pression hydrostatique** dans les tubulures.



La **courbe pressiométrique corrigée** est la représentation de $V = f(p)$ et prend donc en compte la pression réellement appliquée au sol.

On repère sur cette courbe les points A ($p_A ; V_A$) et B ($p_B ; V_B$) marquant les limites inférieures et supérieures de la partie linéaire (pseudo-élastique, voir la figure ci-dessous)

A partir de cette courbe trois phases sont identifiables :

- Partie OA : phase de **mise en contact de la sonde** avec le sol ;
- Partie AB : phase **pseudo-élastique** ;
- Partie BC : phase de **grandes déformations** et de développement de la **rupture**.

Le module pressiométrique E_M est déterminé dans la plage **pseudo élastique** qui a pour origine ($p_A ; V_A$) et pour extrémités ($p_B ; V_B$).

Il est calculé en considérant le sol en élasticité linéaire, en déformation plane :

$$E_M = 2(1 + \nu) \left[V_s + \frac{V_a + V_b}{2} \right] \frac{P_b - P_a}{V_b - V_a}$$

Où :

- V_s est le volume de la cellule centrale de mesure de la sonde
- V_a est le volume correspondant à l'origine de la plage pseudo-élastique de la courbe
- V_b est le Volume correspondant à l'extrémité de la plage pseudo-élastique de la courbe
- P_a est la Pression correspondant à l'origine de la plage pseudo-élastique de la courbe
- P_b est la Pression correspondant à l'extrémité de la plage pseudo-élastique de la courbe
- ν est le Coefficient de Poisson

IV.4 Présentation des résultats

Les résultats expérimentaux relevés par l'opérateur ou enregistrés sont interprétés soit « manuellement », soit le plus souvent par ordinateur.

Dans ce dernier cas, le programme calcule la courbe corrigée qu'il présente à l'écran et sur imprimante puis les caractéristiques pressiométriques E_M et P_1 .

Les valeurs de E_M et P_1 déterminées sur un forage sont ensuite présentées sur un profil dit profil pressiométrique en fonction de la profondeur Z . (Cfr. Figure 10).

Ce profil indique la nature des sols rencontrés ainsi que le niveau éventuel de la nappe d'eau souterraine, ces informations étant obtenues lors du forage préalable nécessaire à la mise en œuvre de la sonde. L'outil de forage utilisé est également indiqué.

Suite au manque de pressiomètre Menard dans mon laboratoire d'accueil de l'office des Routes Matadi, dans le cadre de cet article, je considère pour illustration des calculs de la capacité portante de pieux dans les deux cas, le profil pressiométrique ci-dessous issu d'un essai réalisé dont l'interprétation des résultats n'était pas faite, laquelle a été retrouvée dans deux ouvrages différents, celui du professeur Zadjouai de l'université de Themcen en Algérie et de Samuel AMAR avec Jean Pierre JEZEQUEL⁶.

Sur ce, dans le point qui suit j'interprète premièrement les résultats puis ensuite, je procède au calcul des capacités portantes des pieux isolés qui pourraient être mise en place sur ledit site.

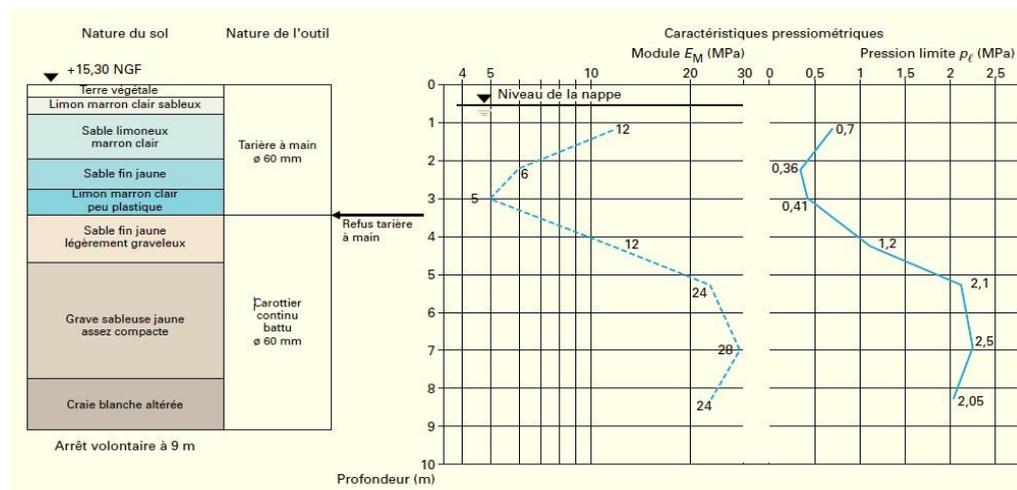


Figure 10 : Profil pressiométrique

V. DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ PORTANTE DES PIEUX

V.1. Définition

La capacité portante d'un pieu est donc la charge que peut supporter ce dernier de manière à être équilibrer par la somme des deux résistances du sol c'est à dire la résistance à la pointe et la résistance au frottement.

V.2. Méthodes de calcul

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour calculer la force portante d'un pieu. Il s'agit de :

- La méthode SPT ;
- La méthode pénétronométrique ;
- La méthode pressiométrique.

⁶ ZADJAOUI A. et ASSAOUI S., *op. cit.*, p.5. ; S. AMAR et J.-F. JEZEQUEL, *Propriétés mécaniques des sols déterminés en place*, AFNOR, 1996, p. 15.

Dans ce cas, la méthode pressiométrique est celle qui est utilisée

V.3. Calcul de la capacité portante par la méthode pressiométrique

V.3.1. Considérations

- L'essai à considérer pour ce faire est celui dont la courbe pressiométrique est représenté ci-dessus à la figure N°8 ;
- Les valeurs du Module E_M et de la pression limite P_1 sont à prélever dans le profil pressiométrique figure N°8 après interprétation des résultats ;
- Pour l'approche comparative de mon étude, je considère les cas des pieux forés tubés avec virole récupéré FTR appartenant dans la catégorie 4 de la classe des pieux mis en place avec refoulement du sol et celui des pieux battus ferme en béton armé Préfabriqué appartenant à la catégorie 9 dans la classe de pieux mise en place sans refoulement du sol BFB (cfr tableau N°1) ;
- Les caractéristiques géométriques du pieu à considérer dans les deux cas sont les suivantes : forme circulaire, section 1590 cm², diamètre 45 cm ; Hauteur du pieu 10 m.

V.3.2. Vérification de la conformité des caractéristiques géométriques du pieu choisi

Pour vérifier la conformité de la stabilité géométrique de pieux vis-à-vis de la compression axiale, on vérifie les risques de flambement en calculant l'élanement par la relation suivante $\lambda = L/B < 60$

Dans ce cas, L = hauteur du pieu et B = plus petite dimension de la section du pieu ou le Diamètre du pieu

En ce qui concerne le pieu que j'ai choisi $\lambda = 1000/45 = 22.22 < 60$

Les dimensions sont donc conformes, il n'y a pas risque de flambement.

V.3.3. Formule Générale de calcul cde la capacité portante des pieux (1)⁷

La capacité portante ultime du pieu est déterminée par la relation $Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$

Dans laquelle :

- Q_{pu} résistance ultime à la pointe du pieu et
- Q_{su} résistance due au frottement latéral sol-pieu.

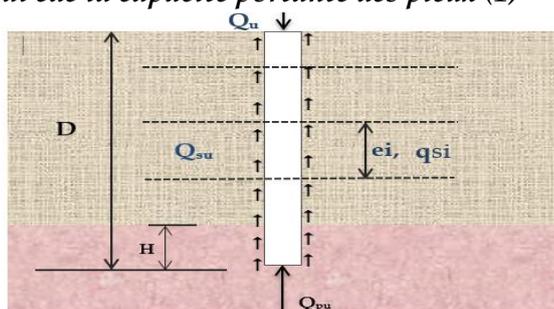


Figure 11

⁷ FREDERIC, *op. cit.*, p.5.

V.3.4. Calcul de la résistance ultime à la pointe

1) Théorie générale

La résistance ultime à la pointe du pieu vaut $Q_{pu} = \rho_p A q_{pu}$

- ρ_p coefficient réducteur de l'effort de pointe dépendant de la nature du sol voir tableau N°2.
- A : aire de la section droite.
- q_{pu} ; résistance limite de pointe ou pression de rupture à la base du pieu.

La résistance limite à la pointe ou pression de rupture $q_{pu} = K_p P_{le}^*$

Avec : k_p = facteur de portance du pieu dépendant du sol (voir tableau N°3)

P_{le}^* pression limite nette a la profondeur Z calculé à partir de la relation

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

La valeur de Z vaut : $Z= b+3a$ et $b = 2/3h$ (voir figure 8 : profil pressiométrique et figure 14)

Si B = base du pieu, D = ancrage du pieu dans le sol et h = hauteur d'ancrage du pieu dans le substratum rocheux

$$B = \min (a,h) \quad ; \quad a = \max \left(\frac{B}{2}, 0,50 \right)$$

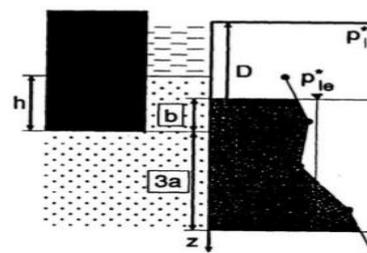


Figure N°12

2) Détermination des éléments de calcul et calcul de la résistance à la pointe

a) Hauteur d'encastrement du pieu dans la couche porteuse h

$h = 1,20$ m mesure à partir du profil pressiométrique de la figure 8

b) Le Diamètre du pieu B

Le diamètre du pieu considéré est de 45 cm ou 0,45 m

c) Calcul de la profondeur limite de pression Z

Tableau N°2

Elément	H en m	B en m	a max (B/2 , 0,5) en m	b =2/3 h en m	Z=b+3a en m
Valeur	1,20	0,45	(0,225, 0,5) nous prenons 0,25	$2/3 \times 1,20 = 0,8$	$0,8 + 3 \times 0,25 = 1,55$

d) Calcul de la pression limite nette sur la profondeur Z

Elle se calcule par la relation suivante : $P_{le}^* = \frac{1}{b+3a} \int_{D-b}^{D+3a} Pl^*(z). dz$

En résolvant cette intégrale avec les valeurs suivantes :

- $b+3a = Z = 1,55 \text{ m}$; $b = 0,8 \text{ m}$; $a = 0,25$
- $D =$ ancrage du pieu dans le sol = 9,00 m voir profil pressiométrique figure 10
- $Pl(z) = 1,8 \text{ MPa}$ pression limite mesurée à la profondeur $Z = 1,5 \text{ m}$ sur le profil pressiométrique figure n° 10.

On obtient $P_{le}^* = 1,8 \text{ MPa}$

e) Calcul de la résistance limite à la pointe du pieu ou pression de rupture

Cette résistance se calcule par la relation $q_{pu} = K_p P_{le}^*$

Dans la quelle :

- $K_p =$ coefficient de portance de la couche porteuse
- $P_{le}^* =$ pression limite nette équivalente

f) Détermination du coefficient de portance de la couche porteuse K_p

Le coefficient de portance traduit la proportionnalité entre la contrainte limite de pointe et la pression limite nette équivalente mesurée au pressiomètre.

Les valeurs de K_p sont données dans le tableau n°4 ci-dessous suivant le fascicule 62 titre V en fonction de la nature de la couche porteuse et de la classe du pieu⁸.

⁸ FREDERIC, *op. cit.*, p. 6.

Tableau N°3 : Valeur de K_p suivant fascicule 62 titre V

Nature des terrains		Eléments mis en œuvre sans refoulement du sol	Eléments mis en œuvre avec refoulement du sol
ARGILES - LIMONS	A	1,1	1,4
	B	1,2	1,5
	C	1,3	1,6
SABLES - GRAVES	A	1,0	4,2
	B	1,1	3,7
	C	1,2	3,2
CRAIES	A	1,1	1,6
	B	1,4	2,2
	C	1,8	2,6
MARNES, MARNO-CALCAIRE		1,8	2,6
ROCHES ALTEREES (1)		1,1 à 1,8	1,8 à 3,2
(1) la valeur de K_p pour ces formations est prise égale à celle de la formation meuble du tableau à laquelle le matériau concerné s'apparente le plus			

En ce qui concerne notre profil pressiométrique, la couche porteuse étant la craie les valeurs de k_p à prendre en compte sont :

- Pour les pieux forés $K_p = 1.8$;
- Pour les pieux battus $K_p = 2.6$;
- Valeur de la pression limite nette équivalente $P^*le = 1,8$ MPa.

g) Calcul de la section du pieu et choix du coefficient ρ_p

A : section du pieu $A = 3,14 \times (45)^2 / 4 = 1589,625$ on adopte 1590 cm^2

ρ_p : coefficient dépendant de la forme de la section du pieu et de la nature de la couche traversée e_i .

Ces valeurs sont données dans le tableau N°4 ci-dessous

Tableau N°4 : Valeurs des ρ_p et ρ_s

Type de pieu	Argiles		Sables	
	ρ_p	ρ_s	ρ_p	ρ_s
Section pleine tubulaire fermé	1,00	1,00	1,00	1,00
Tubulaire ouvert Palpieu	0,50	1,00	0,50	1,00
Pieu H	0,50	1,00	0,75	1,00
Palplanches	0,50	1,00	0,30	0,50

Le pieu étant de section pleine tubulaire et la couche e_i est le sable nous adoptons $\rho_p = 1$

3) Calcul de la résistance à la pointe ultime à la pointe Q_{pu} (cfr. Tableau N°5)

Tableau N°5 : Calcul de résistance à la pointe

N°	Éléments	ρ_p	A en cm ²	K_p	P^*l_e En Kg/cm ²	$q_{pu} = K_p P^*l_e$ en Kg/cm ²	$Q_{pu} = \rho_p A q_{pu}$ en Kg
1	Pieux foré	1.00	1590	1.8	18	32.4	1590X32,4 =51516
2	Pieu battu	1.00	1590	2.6	18	46.8	1590x 46,9 = 74412

V.3.5 Calcul de la résistance au frottement latéral sol-pieu dans les deux cas

La résistance au frottement latéral d'un pieu sur le sol a pour rôle de lutter contre le glissement latéral du pieu pendant et après sa mise en place.

Elle est déterminée à partir de la relation suivante : $Q_{su} = \rho_s P \sum q_{su} e_i$

Dans la quelle :

- ρ_s = coefficient réducteur de section de l'effort de frottement latéral tire suivant le cas du tableau N°14 ci-dessous ;
- P = périmètre de la Section du pieu ;
- q_{su} = frottement latéral unitaire dans la couche e_i ;
- e_i = épaisseur de la couche i (voir figure N° 11).

1) Détermination des éléments de calcul

a) Coefficient réducteur de l'effort de frottement latéral ρ_s

Il dépend du type de pieu et de la nature de la couche e_i

Le pieu choisi est de forme tubulaire et dans la coupe de sondage de l'essai pressiométrique, la couche e_i est constituée du sable fin jaune légèrement granuleux ; en se référant du tableau N° 4 ci-dessus nous adoptons $\rho_s = 1,00$

b) Périmètre de la Section du pieu P

$P = \pi R$ comme le diamètre du Pieu est de 45 cm donc le rayon est de 22.5 cm d'où $P = 3.14 \times (22.5) = 70.65$ cm

c) Epaisseur de la couche e_i

Après interprétation de résultat de l'essai pressiométrique ; il est constaté que la couche du sol e_i de 1,30 m d'épaisseur

d) Le frottement latéral unitaire q_{su} dans la couche du sol e

Le frottement latéral unitaire est fonction de la pression limite nette pl^* .

D'où les valeurs de $q_{su} = f(P1^*)$ seront prélevés dans l'abaque graphique ci-contre sur base des indications du tableau N°6 qui oriente le choix de la courbe à exploiter de Q_1 à Q_7 pour chaque couche e_i considérée

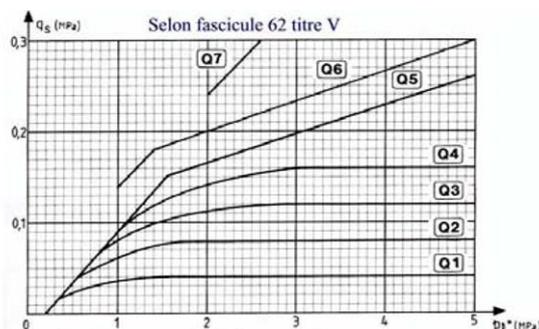


Figure N°15 courbes de frottement latéral - $qs=f(P1^*)$

Tableau N°6 : Tableau d'orientation du choix de la courbe Q_1 à Q_7

	ARGILE-LIMONS			SABLE - GRAVES			CRAIES			MARNES		ROCHES
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	
Foré simple	Q_1	$Q_1 \cdot Q_2^{(1)}$	$Q_2 \cdot Q_3^{(1)}$	-			Q_1	Q_3	$Q_4 \cdot Q_5^{(1)}$	Q_3	$Q_4 \cdot Q_5^{(1)}$	Q_6
Foré boue	Q_1	$Q_1 \cdot Q_2^{(1)}$		Q_1	$Q_2 \cdot Q_3^{(2)}$	$Q_3 \cdot Q_2^{(2)}$	Q_1	Q_3	$Q_4 \cdot Q_5^{(1)}$	Q_3	$Q_4 \cdot Q_5^{(1)}$	Q_6
Foré tube (tube récupéré)	Q_1	$Q_1 \cdot Q_2^{(3)}$		Q_1	$Q_2 \cdot Q_1^{(2)}$	$Q_3 \cdot Q_2^{(2)}$	Q_1	Q_2	$Q_3 \cdot Q_4^{(5)}$	Q_3	Q_4	-
Foré tube (tube perdu)	Q_1			Q_1	Q_2	(4)		Q_2		-		
Puits (5)	Q_1	Q_2	Q_3	-			Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6
Métal battu ferme	Q_1	Q_2		Q_2	Q_3		(4)			Q_3	Q_4	Q_4
Battu préfabriqué béton	Q_1	Q_2		Q_3			(4)			Q_3	Q_4	Q_5
Battu moulé	Q_1	Q_2		Q_2	Q_3		Q_1	Q_2	Q_3	Q_3	Q_4	-
Battu enrobé	Q_1	Q_2		Q_3	Q_4		Q_4			Q_3	Q_4	-
Injecté basse pression	Q_1	Q_2		Q_3			Q_2	Q_3	Q_4	Q_5		-
Injection haute pression	-	Q_4	Q_5	Q_5	Q_6	-	Q_5	Q_6	Q_6	Q_6		$Q_7^{(7)}$

(1) réalésage et rainurage en fin de forage
 (2) pieu de grande longueur (supérieur à 30m)
 (3) Forage à sec tubé non louvoyé
 (4) Dans le cas des craies, le frottement latéral pieu et sol est faible pour certain type de pieu
 (5) Sans tubage, ni virole foncés perdus (parois rugueuses)
 (6) Injection sélective et répétitive à faible débit
 (7) Injection sélective et répétitives à faible débit et traitement préalables de massifs fissurés ou fracturés avec obturation des cavités.

Pour le profil pressiométrique, les valeurs de q_{su} sont calculées dans le tableau n°7 ci-dessous :

Tableau N°7

N°	Type de pieu	Nature de la couche du sol e_i	Courbe considérée	PI* en MPa	$\sum q_{su}$ en MPa
1	Pieu foré à tube récupéré	Sable jaune graveleux	Q3 et Q2	1.8 MPa	0.11
2	Pieu béton préfabriqué battu	Sable jaune graveleux	Q3	1.8 MPa	0.11

2) Calcul de la résistance au frottement latéral sol - pieu Q_{su}

Tableau N°8

N°	TYPE DE PIEU	ρ_s	P en cm	$\sum q_{su}$ en kg/cm ²	e_i en cm	$Q_{su} = \rho_s P \sum q_{su} e_i$ en Kg
1	Pieu foré à virole récupéré	1.00	70.65	1.1	130	10102.95
2	Pieu béton préfabriqué battu	1.00	70.65	1.1	130	10102.95

V.3.6 Calcul de la capacité portante totale

Tableau N°9

N°	Type de pieu	Q_{pu} en Kg	Q_{su} en Kg	$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$ en Kg
1	Pieu foré à tube récupéré	51516	10102.95	61618.95
2	Pieu béton préfabriqué battu	74412	10102.95	84514.95

V.3.7. Calcul de la capacité portante réelle⁹

Tableau N°10

N°	Type de pieu	$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$ en Kg	G pieu en Kg	Q_u en Kg
1	Pieu foré à tube récupéré	61618.95	0.1590x10x2500=3975	57643.25
2	Pieu béton préfabriqué battu	84514.95	0.1590x2500= 3975	80539.95

V.3.8. Comparaison des résultats obtenus

Pour un pieu foré à virole récupéré et un pieu en béton préfabriqué battu de même caractéristiques géométriques mise en place d'une manière isolée sur un même site sur deux points de caractéristiques géotechniques identiques définies après essais pressiométriques, les calculs de leurs capacités portantes révèlent ce qui suit :

⁹ MARCEL FORNI, *Fondations spéciales et reprise en sous œuvre*, Edition Eyrolles, Paris, p.74.

- La résistance à la pointe du pieu en béton préfabriqué battu est supérieure de 44% de celle du pieu foré à virole récupérer ;
- La résistance au frottement latéral sol- pieu du pieu en béton préfabriqué battu est inférieure de 57 ?8% de celle du pieu foré a virole récupérer ;
- La capacité portante du pieu en béton préfabriqué battu est supérieure de 22.5% de celle du pieu foré à virole récupérée.

Ce qui permet de conclure que le pieu isolé en béton armé préfabriqué mise en place avec refoulement dans le sol ; par battage a une capacité portance plus élevée de 22.5% que le pieu isolé en béton armé mis en place sans refoulement par bétonnages dans un forage à virole récupérée

Par contre lorsqu'il s'agit de réaliser les pieux forés de grand diamètre, la résistance à la pointe et au frottement augmente, dans ce cas comme il serait difficile de réaliser les pieux préfabriqués en béton armé de grand diamètre à cause des difficultés de manutention, les pieux forés seront préférables.

VI. TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE, AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES PIEUX BATTUS ET DES PIEUX FORÉS

Bien que l'objectif poursuivi dans l'usage des pieux battus et des pieux forés soit le même, c'est-à-dire atteindre le substratum rocheux et transmettre la charge totale de l'ouvrage dans le sol dans le cas de fondations profondes, leurs techniques de mise en œuvre ainsi que les outils ou engins à utiliser diffèrent par contre pour chacune des catégories des pieux.

Les pieux battus qui sont d'office préfabriqués d'avance ne sont pas mise en place dans le sol de la même manière que les pieux forés et en plus les outils à utiliser pour ce travail diffèrent dans les deux cas.

VI.1. Techniques de mise en place, avantages et inconvénients des pieux Battus

Tableau N°11

PIEUX BATTUS
I. Techniques de mise en place ¹⁰
<ul style="list-style-type: none"> • Les pieux foncés : Les pieux foncés sont des pieux préfabriqués en béton armé ou en béton précontraint mis en place dans le sol sans refoulement non par battage mais plutôt par fonçage. L'outil utilisé dans ce cas est le vérin s'appuyant sur un massif à réaction. • Les pieux battus moulés : Ce sont des pieux en béton armé moulés dans des tubes métalliques munis d'un sabot tubes battus d'avance dans lesquels sont introduites des cages d'armatures avant le bétonnage. Les tubes sont considérés perdus car ils ne sont pas retirés du sol : L'outil du battage du tube est le marteau hydraulique.

¹⁰ LIONEL FIX, *Fondations profondes*, Cerema, Ile de France, ENPC 2019, pp. 22-23.

<p>• Les pieux battus : Ce sont des pieux préfabriqués d'avance puis enfoncés dans le sol soit par battage ou soit par vibration. Dans ce cas se retrouvent les pieux en béton armé ou béton précontraint, les pieux en bois, les pieux métalliques en H ainsi que les palplanches métalliques. L'outil utilisé dans ce cas est celui du vibrofonçage c'est-à-dire le marteau à vibreur.</p>	
II. Avantages	III. Inconvénients
Pieux battus en général	
<ul style="list-style-type: none"> - Exécution rapide parce qu'ils sont préfabriqués d'avance ; - Pas d'excavation préalable ; - Facilité d'être incliné ; - Pouvoir d'être pieu flottant en terrain cohérent. 	<ul style="list-style-type: none"> - Risque d'endommagement des têtes des pieux lors du battage ; - Exigence de manutention des pieux préfabriqués avec risques dus aux chocs ; - Mis en danger des bâtiments environnants le site suite aux vibrations.

VI.2. Technique de mise en place, avantages et inconvénients des pieux Forés

Tableau N°12

PIEUX FORÉS	
I. Technique de mise en place	
<ul style="list-style-type: none"> • Pieux forés simples : sont des pieux dont le béton est coulé dans des forages exécutés d'avance soit avec tubage pour le sol pulvérulent, soit sans tubage pour le sol cohérent ; le béton est alors coulé après introduction de la cage d'armature dans le forage. • Les pieux forés boue : sont des pieux à tubes métalliques battus exécutés sur place de la manière suivante : <ul style="list-style-type: none"> - Battage dans le sol du tube métallique muni d'un sabot ; - Introduction de la cage d'armature ; - Bétonnage. • Les pieux à la tarière creuse : sont des pieux mis en place après : <ul style="list-style-type: none"> - Vissage dans le sol d'une tarière à axe creux sur la profondeur totale du pieu ; - Extraction du sol sans dévisser tout en injectant simultanément le béton avec l'axe creux de la tarière. 	
II. Avantages	III. Inconvénients
1) Pieux forés simples	
<ul style="list-style-type: none"> - Adaptabilité aux conditions de terrain (sols durs / sols mous) - Diamètre de 20 cm à plus de 2 m : optimisation du béton - Possibilité d'atteindre de grandes profondeurs (>50 m) 	<ul style="list-style-type: none"> - Matériel et personnel très spécialisé - Qualité et contrôle de la boue de forage - Evacuation et mise en décharge des déblais - Très sensible aux erreurs d'exécution - Cadences faibles

2) Pieux forés tarière creuse	
<ul style="list-style-type: none"> - Productivité suite à l'absence de boue ; - Adaptée à une large gamme de terrains ; - Cadences plus élevées que les pieux forés simples. 	<ul style="list-style-type: none"> - Limité en terrains résistants ; - Installation de la cage d'armatures (longueur limitée) - Formule de béton spécifique et maîtrisée - Obligation d'enregistrer les paramètres de forage pour pieux OA

VII. TABLEAU D'APPROCHE COMPARATIVE SYNTHÈSE DES PIEUX EN BÉTON BATTUS ET DES PIEUX FORÉS

Tableau N°13

N°	Éléments de comparaison	Pieux battus	Pieux forés
1.	Catégories	<ul style="list-style-type: none"> - Pieux foncés - Pieux battus moulés - Pieux battus 	<ul style="list-style-type: none"> - Pieu foré simple - Pieu foré boue - Pieu foré tarière - Pieu foré tubé - Micropieux
2	Matériaux	Bois, Béton armé Béton précontraint, Métallique	Tube métallique, Béton armé
3	Particularités	Préfabriqués d'avance	Coulés sur place
3	Formes	<ul style="list-style-type: none"> - Rectangulaire, - Circulaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Circulaire
4	Diamètre	Très souvent inférieur à 60 cm	<ul style="list-style-type: none"> - Supérieur à 60 cm pour le non tubé - supérieur à 1.00m pour les gros ouvrages
5	Profondeur limite	Faible par rapport aux pieux forés	Peut aller jusqu'au-delà de 30 m
6	Résistance à la pointe	Plus grande que le pieu foré de même diamètre	Faible par rapport au pieu battu de même diamètre
7	Résistance au frottement latéral	Identique à celle de pieu fore à virole récupéré de même diamètre	Identique à celle de pieu battu en béton préfabriqué de même diamètre
8	Capacité portante	Supérieure à celle du pieu foré de même diamètre	Inférieure à celle de pieu battu en béton préfabriqué de même diamètre
9	Mode de mise en place	Avec refoulement du sol	Sans refoulement du sol
10	Technique de mise en place	- Fonçage du pieu cas des pieux foncés	- Forage avec ou sans tubage

N°	Éléments de comparaison	Pieux battus	Pieux forés
		<ul style="list-style-type: none"> - Moulage dans les pieux à tubes battus non récupéré, - Battage du pieu cas des pieux simples 	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place des cages d'armature - Bétonnage à la colonne - Extraction du tube provisoire si nécessaire
11	Outils de mise en place	<ul style="list-style-type: none"> - Vérin hydraulique - Marteau hydraulique - Vibrofonçage 	<ul style="list-style-type: none"> - Sonnette a trépan - Sonnette avec tarière - Carotteuse
11	Problème de repage	Existant au cas les pieux débordent le sol après battage avec des niveaux différents	Inexistant parce que le bétonnage se fait jusqu'au niveau souhaité
12	Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne capacité - portante, - Rapidité d'exécution, - Possibilité d'inclinaison des pieux jusqu'à 30°. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconnaissance de la stratification du sol, - Possibilité d'atteindre de grande profondeur, - Possibilité de reprise en sous œuvre
13	Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Remaniement des sols, - Déviation lors du battage, - Difficultés de manutention, - Endommagement de têtes des pieux par les chocs du battage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Risques d'éboulements des parois des puits de forage, - - Exécution lente, demande une haute technologie - Evacuation et mise en décharge des déblais

CONCLUSION

A l'issue de recherches menées sur l'approche comparative entre les résultats de calcul de la capacité portante des pieux forés avec les pieux préfabriqués en béton armé battus ainsi que leurs techniques de mise en œuvre, avantages et inconvénients, les conclusions suivantes sont dégagées :

- 1) Pour les pieux isolés de même diamètre, foré ou en béton préfabriqué battu mis en place sur un même site à une profondeur inférieure à 20 m :
 - la résistance à la pointe des pieux préfabriqués en béton armé est supérieure de par rapport à celle de pieu foré ;
 - la résistance au frottement sol-pieu de pieu préfabriqué en béton armé est égale à celle de pieu foré pour une hauteur inférieure à 20 m, et supérieure pour des pieux de hauteur au-delà de 30 m ;
 - la capacité portante des pieux préfabriqués en béton armé est supérieure par rapport aux pieux forés.

Par contre, lorsqu'il s'agit de réaliser les pieux forés de grand diamètre, leurs résistances à la pointe et au frottement augmentent, dans ce cas comme il serait difficile de réaliser les pieux préfabriqués en béton armé de grand diamètre pour difficulté de manutentions, les pieux forés seront préférables.

- 2) Leurs techniques de mise en place différent parce que pour les pieux battus cela se fait par battage des éléments préfabriqués avec refoulement des sols, mais par contre pour les pieux forés cela se fait par installation des cages d'armatures dans des forages dument exécutés soit avec boue ou sans boue. Cette différence des techniques implique l'usage des outils différents.

Malgré l'avantage de mise en place rapide que présentent les pieux battus par rapport aux pieux forés, ceux derniers présentent l'inconvénient de ne pas atteindre de grande profondeur par rapport aux pieux forés.

Donc les pieux forés malgré les défauts de boue et de décharge des déblais excavés lors de forage, seront plus avantageux que les pieux battus lorsqu'il s'agirait d'atteindre des grandes profondeurs et de supporter des ouvrages de grande importance car ces derniers peuvent être exécutés à grand diamètre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. APAGEO SEGELM, *Règles de réalisation des essais au pressiomètre Menard et d'exploitation des résultats obtenus pour le dimensionnement des fondations*, 1996.
2. BUSTAMANTE, FRANK R., CHRISTOULAS S., « Évaluation de quelques méthodes de calculs des pieux forés », in *Revue Française de géotechnique* N°54, pp.39-62.
3. CHEIKH. I. SARR et GORA SARR, *Etude comparative entre méthodes de calcul des pieux : Application à l'échangeur de la Patte d'OIE*, Ecole supérieure Polytechnique de Thiès, Sénégal 2007, 129 pages.
4. COSTET JEAN et SANGLERAT GUY, *Cours pratiques de mécanique des sols*, Tome 1 : Plasticité et calcul des tassements, 3^e édition, Dunod, 1975, 28 pages.
5. COSTET JEAN et SANGLERAT GUY, *Cours pratiques de mécanique des sols*, Tome 2 : Calcul des ouvrages, 2^e édition, Dunod, 1975, 351 pages.
6. FORNI MARCEL, *Fondations spéciales et reprise en sous œuvre*, Edition Eyrolles, Paris, 171 pages.
7. FREDERIC, *Technologie Fondations profondes*, Lycée Pierre Caraminot, 2008, 15 pages.
8. LIONEL FIX, *Fondations profondes*, Cerema, Ile de France, ENPC 2019, 59 pages.
9. LMR, *Fondations profondes : procédés de construction*, école polytechnique de Lausanne, 14 pages.
10. MAGNAN JEAN PIERRE, *Eurocodes 7, calcul géotechnique*, CEN 1994, Edition AFNOR, 1995.
11. Procèdes Généraux de construction des fondations profondes, parois de soutènements et amélioration des sols in <http://www.soletanche-bachy.com>.
12. ROGER FRANK, *Calcul des fondations superficielles et profondes*, Edition Techniques de l'Ingénieur, 2003, 141 pages.
13. SAMUEL AMAR et JEZEQUEL JEAN FRANÇOIS, *Propriétés mécaniques des sols déterminés en place*, AFNOR 1996, 25 pages.
14. ZADJAOUI, AISSAOUI S., *Essais géotechniques*, TP essais pressiométrique, université de Themcem, Algérie 2014/2020.