



ETUDE COMPARATIVE DES NORMES DE DIMENSIONNEMENT DES PIEUX EN COTE D'IVOIRE ET ELABORATION D'UN LOGICIEL D'AIDE AU DIMENSIONNEMENT DES PIEUX PAR LA METHODE PRESSIOMETRIQUE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE
MASTER – SPECIALITE - GENIE CIVIL BATIMENT ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement le 30 Janvier 2023 par

Kouakou Ismael Kader SIMPORE (2019 0126)

Encadrant 2iE : Dr. Philbert NSHIMIYIMANA, Enseignant à 2iE, Département Génie Civil

Maître de stage : M. Éric GUEU, Ingénieur des Travaux Publics, Chef de service Calcul structure à TERRABO Ingénieur Conseil

Structure (s) d'accueil du stage : TERRABO Ingénieur Conseil

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr. Malicki ZOROM

Membres et correcteurs : Dr. Yasmine TRAORE
M. Iliassou NOUHOUN

Promotion [2022/2023]

DEDICACES

Au nom d'ALLAH, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux ;

A mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant toutes ces années d'études

A toute ma famille et tous ceux qui ont m'ont aidé de près ou de loin.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de :

- L'administration et au corps professoral de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), pour ces années d'apprentissage et de formation dans le domaine du génie civil ;
- Dr. Philbert NSHIMIYIMANA, mon encadreur interne, pour sa disponibilité et son encadrement pédagogique et son soutien tout au long du stage ;
- TERRABO Ingénieur Conseil pour l'opportunité et la confiance accordée tout au long de ce stage de fin d'études ;
- M. Séraphin KOUAME, Directeur général de TERRABO Ingénieur Conseil pour avoir bien voulu m'accepter comme stagiaire pour cette première expérience professionnelle dans le domaine des pieux
- M. Éric GUEU, Chef de Service Calcul Structure, mon maître de stage, pour sa disponibilité, ses explications, ses conseils et aussi pour m'avoir transmis sa passion pour le calcul ;
- M. Yves YAHIRI, Ingénieur chargé d'études pour ses conseils avisés et sa confiance dans les tâches confiées au cours du stage ;
- Mme Mariette KOUADIO, pour les réponses et les orientations conseillées lors de mes recherches ;
- L'ensemble du personnel de TERRABO Ingénieur Conseil pour l'accueil et la disponibilité.

RESUME

Le présent mémoire traite d'une étude comparative entre deux (02) normes de dimensionnement de pieux par la méthode pressiométrique, le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262 de l'Eurocode 7. Elle aboutit à la conception d'un outil de dimensionnement via ces deux (02) normes.

Ces normes ont d'abord été évaluées sur la base de leur texte normatif en tenant compte des critères de performances dégagés, à savoir la prise en compte du rapport sol-pieu, la limitation de l'utilisation des données empiriques, l'approche des propriétés de sol et l'actualité de la technologie des pieux.

Il en est ressorti une meilleure approche technique de la NF P 94-262 sur l'ensemble de ces critères de performances. Un cas pratique de dimensionnement a été réalisé et a abouti à des capacités portantes plus élevées pour la NF P 94-262 par rapport au Fascicule 62 Titre V avec un écart de 90 tonnes en moyenne. Ce qui implique moins de pieux pour reprendre les efforts pour la NF P 94 – 262. On en conclut alors que la NF P 94 -262 présente un meilleur rapport technico-économique que le Fascicule 62 Titre V.

Le logiciel quant à lui a été réalisé via Visual Basic for Application de Excel, il a fallu écrire les lignes de codes de programmation et lui créer une interface. Ce logiciel permet entre autres de calculer les efforts, les valeurs de calcul de portance, les combinaisons aux états limites et de déterminer le nombre de pieux nécessaires pour reprendre les charges.

Les résultats du logiciel ont été confrontés à ceux du logiciel GEOFOND. Des écarts de valeurs de 0,22 MN de moyenne ont été observés pour les valeurs de l'effort de frottement latéral du Fascicule 62 Titre V. Ces écarts sont dû principalement à l'approximation des lectures sur courbes pour la détermination de la contrainte de frottement latéral. Hormis cela le logiciel reste fiable et permettra à l'entreprise de disposer d'un outil fiable pour ses calculs et vérifications et lui fera gagner en temps et productivité.

Mots Clés :

-
- 1 - Eurocode 7 (NF P 94-262)**
 - 2 – Etude comparative**
 - 3 – Fascicule 62 Titre V**
 - 4 – Fondations profondes**
 - 5 – Logiciel de Calcul**

ABSTRACT

This paper deals with a comparative study between two (02) standards of pile sizing by the pressiometric method, Paper 62 Title V and NF P 94-262 of Eurocode 7 , and leads to the design of a sizing tool via these two (02) standards.

These standards were first assessed on the basis of their normative text, taking into account the performance criteria identified, namely the ground-pile ratio, the limitation of the use of empirical data, approach to soil properties and topicality of pile technology.

This resulted in a better technical approach to the NF P 94-262 on all these performance criteria. A practical design case was carried out and resulted in higher load-bearing capacities for NF P 94-262 compared to Paper 62 Title V with an average deviation of 90 tonnes. This means fewer piles to resume efforts for NF P 94 – 262. It follows that NF P 94 -262 has a better technical-economic ratio than Paper 62 Title V.

The software was made via Visual Basic for Application of Excel, it was necessary to write lines of programming codes and create an interface. This software allows, among other things, to calculate the forces, the values of calculation of lift, the combinations at limit states and to determine the number of piles necessary to resume the loads.

The results of the software were compared with those of the GEOFOND software. Differences in values of 0.22 MN of mean were observed only for Paper 62 Title V more precisely on the values of the lateral friction force due mainly to the approximation of the readings on curves for the determination of the lateral friction stress. Apart from this, the software remains reliable and will allow the company to have a reliable tool for its calculations and checks and will save time and productivity.

Keywords :

-
- 1 - Eurocode 7 NF P 94-262**
 - 2 – Comparative study**
 - 3 – Fascicule 62 Titre V**
 - 4 – Deep Foundations**
 - 5 – Calculation Software**

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement

AGERROUTE : Agence de Gestion des routes

BAEL : Béton Armé aux Etats Limites

CEN : Comité européen de normalisation

CPT : Essai de Pénétration au Cône ou Essai de Pénétration Statique

EC7 : Eurocode 7

LBTP : Laboratoire des bâtiments et travaux publics

MEER : Ministère de l'Equipement et de l'Entretien Routier

NF EN : Norme Française Norme Européenne

PI : Pression limite

PMT : Essai au Pressiomètre Ménard

SPT : Standard Pénétration Test

VBA : Visual Basic for Application

VBE : Visual Basic Editor

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Combinaisons aux états limites	14
Tableau 2 : Catégories géotechniques en fonction des classes de conséquences et des conditions du site	17
Tableau 3 : Valeurs du facteur de portance K_p dans le Fascicule 62 Titre V	25
Tableau 4 : Valeur de $k_{p\ max}$ en fonction de la classe des pieux et de la catégorie de terrain	26
Tableau 5 : Choix des courbes pour le calcul du frottement latéral unitaire q_s	27
Tableau 6 : Valeurs numériques des paramètres a,b et c des courbes f_{sol}	28
Tableau 7 : Coefficients partiels de modèle et de méthode pour la méthode pressiométrique.....	31
Tableau 8 : Situations de calcul à vérifier aux états limites pour une fondation profonde.....	33
Tableau 9 : Valeurs des coefficients de sécurité aux différents états limites	33
Tableau 10 : Récapitulatif des comparaisons entre le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262	35
Tableau 11 : Caractéristiques des armatures	50
Tableau 12 : Récapitulatif des combinaisons d'actions à l'ELU et l'ELS	51
Tableau 13 : Coordonnées des points des sondages géotechniques	52
Tableau 14 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon le Fascicule 62 par GeoPieu	53
Tableau 15 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon le Fascicule 62 par GEOFOND	53
Tableau 16 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon la NF P 94-262 par GeoPieu	56
Tableau 17 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon la NF P 94 -262 par GEOFOND	57
Tableau 18 : Résultats de calcul suivant les deux (02) normes	59

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique De.....	7
Figure 2 : Diagramme de classification des pieux	10
Figure 3 : Mécanismes du frottement latéral positif et négatif.....	11
Figure 4 : Courbe type d'un essai pressiométrique.....	21
Figure 5 : Profil pressiométrique.....	22
Figure 6 : Détermination de l'encastrement effectif.....	26
Figure 7 : Valeurs du frottement latéral unitaire	28
Figure 8 : Courbe fsol pour la méthode pressiométrique	29
Figure 9 : Codification des vérifications dans les Eurocodes.....	33
Figure 10 : Environnement de Visual Basic for Application	39
Figure 11 : Exemple d'écriture de lignes de codes de VBA	40
Figure 12 : Schéma de principe du logiciel.....	40
Figure 13 : Interface de démarrage	41
Figure 14 : Menu du programme GeoPieu Fondations Profondes	41
Figure 15 : Insertion des couches de terrain.....	42
Figure 16 : Aperçu des données de sondage pressiométrique	43
Figure 17 : Formulaire de saisie des caractéristiques du pieu	44
Figure 18 : Formulaire de saisie des efforts en tête de pieu	44
Figure 19 : Note de calcul de GeoPieu Fondations Profondes	45
Figure 20 : Cadre référence des caractéristiques du pieu	46
Figure 21 : Cadre référence aux efforts en tête de pieu.....	46
Figure 22 : Cadre référence aux résultats de calcul de la capacité portante	47
Figure 23 : Localisation du site.....	49

SOMMAIRE

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
SOMMAIRE	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET	5
I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL.....	5
II. PRESENTATION DU PROJET	6
CHAPITRE II : REVUE DE LITTERATURE.....	7
INTRODUCTION.....	7
I. GENERALITES SUR LES FONDATIONS PROFONDES	7
II. PRESENTATION DES APPROCHES DE DIMENSIONNEMENT DE TEXTES NORMATIFS.....	12
A. APPROCHE DE CALCUL SUIVANT LE FASCICULE 62 TITRE V	13
B. APPROCHE DE CALCUL SUIVANT L'EUROCODE 7 NF P 94-262	16
III. PRESENTATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE	20
CONCLUSION PARTIELLE.....	22
CHAPITRE III : ETUDE COMPARATIVE DES APPROCHES DE CALCUL DES PIEUX	23
INTRODUCTION.....	23
I. CLASSIFICATION DES PIEUX ET DES SOLS.....	23
II. DETERMINATION DES CONTRAINTES LIMITES.....	24

III.	CALCUL DE PORTANCE ET JUSTIFICATIONS AUX ETATS LIMITES	30
	CONCLUSION PARTIELLE.....	36
CHAPITRE IV : MISE AU POINT DU PROGRAMME DE DIMENSIONNEMENT		37
	INTRODUCTION.....	37
I.	PROPOSITION DU LOGICIEL.....	37
II.	DESCRIPTION DU LANGAGE DE PROGRAMMATION.....	38
III.	FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME	40
	CONCLUSION PARTIELLE.....	47
CHAPITRE V : ETUDE D'UN CAS D'APPLICATION.....		48
	INTRODUCTION.....	48
I.	PRESENTATION DU PROJET	48
II.	ETUDES TECHNIQUES REALISEES	50
III.	DIMENSIONNEMENT SUIVANT LE FASCICULE 62 TITRE V	52
IV.	DIMENSIONNEMENT SUIVANT L'EUROCODE 7 NF P 94-262	56
	CONCLUSION PARTIELLE.....	59
CONCLUSION GENERALE		60
	PERSPECTIVE DE RECHERCHE.....	xi
BIBLIOGRAPHIE.....		xii
WEBOGRAPHIE.....		xiii
Annexes		xiv

INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte

Tout ouvrage quel que soit sa forme prend toujours appui sur un sol d'assise, les éléments qui jouent le rôle d'interface entre la structure porteuse et le sol d'assise sont appelés fondations. Elles forment la partie structurelle qui assure la transmission des charges entre l'ouvrage et le sol. Adaptées à la fois à l'ouvrage et à la nature du sol, elles prennent des formes diverses de manière à assurer une bonne répartition des charges.

Lorsque ces ouvrages se situent dans des zones de mauvaises portances ou dans des zones urbaines où la proximité des ouvrages ne permet pas la mise en place de fondations élargies on utilise les fondations profondes pour atteindre le bon sol et ainsi pérenniser la stabilité de l'ouvrage.

Ces éléments de structures peuvent être déterminés à partir de différentes méthodes de calculs.

2. Problématique

En Côte d'Ivoire et dans certains pays de l'Afrique de l'Ouest, la norme de justifications de ce type de fondation pour les ouvrages génie civil la plus couramment utilisée est le Fascicule 62 Titre V. Mais ces dernières années, une nouvelle alternative est née avec l'apparition de la NF P 94-262 de l'Eurocode 7. Contrairement à d'autres pays où une norme est imposée, en Côte d'Ivoire, le choix de la norme de justification des fondations est contractuel et est laissé à l'appréciation du maître d'œuvre sur proposition de l'entreprise.

TERRABO Ingénieur Conseil, notre structure d'accueil n'étant pas un laboratoire géotechnique n'a pas jugé utile de se doter d'un logiciel de dimensionnement des fondations profondes de façon permanente. Cependant l'entreprise est quelques fois confronté à la vérification des notes de calcul des pieux issues des rapports géotechniques fournis par ses sous-traitant ou des entreprises dont elle assure le contrôle. Ce qui représente une contrainte pour l'entreprise vu la longueur du calcul manuel. Il nous a donc été confié la mission d'optimiser le temps de calcul de ses éléments en élaborant un logiciel interne de dimensionnement des pieux.

Au vu de ce qui précède, il en ressort deux (02) problématiques :

Quelle est la norme qui permet d'optimiser le plus sur le plan technique ?

Comment mettre au point un logiciel de dimensionnement des pieux sous charges axial ?

D'où la nécessité de faire une étude détaillée de chacune de ces procédures afin de mieux appréhender leurs différences et d'avoir une idée sur les avantages de chacune d'elles par

rapport à l'autre.

3. Objectif de l'étude

L'objectif général de cette étude est de réaliser une étude comparative entre deux (02) normes de dimensionnement des fondations profondes le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94 – 262 de l'Eurocode 7 , et d'élaborer un logiciel de dimensionnement des fondations profondes par la méthode pressiométrique suivant les deux (02) normes.

Pour atteindre cet objectif, des objectifs spécifiques ont été fixés à savoir :

- comparer les approches de dimensionnement de ces normes ;
- concevoir un logiciel de dimensionnement ;
- faire un cas pratique de dimensionnement suivant chaque norme puis comparer les deux résultats obtenus.

4. Démarche méthodologique

Pour atteindre les différents objectifs et pour mieux appréhender les contours de ce thème, il a été choisi la méthodologie ci-après :

- Une recherche documentaire : La recherche documentaire s'est déroulée au sein de TERRABO Ingénieur Conseil. Nous nous sommes également appuyés sur des recherches via internet.
- Ensuite des entretiens avec des personnes ressources : il s'agit d'entrevues individuelles avec des personnes choisies pour leurs connaissances et leurs expériences sur le sujet.

5. Plan de travail

Les parties de ce mémoire sont organisées de la façon suivante :

Chapitre I : Présentation de la structure d'accueil et du projet

Chapitre II : Revue de littérature

Chapitre III : Etude comparative des approches de calcul des pieux

Chapitre IV : Mise au point de l'utilitaire d'aide au dimensionnement

Chapitre V : Etude d'un cas d'application

6. Justification du thème

6.1. Intérêt personnel

Le dimensionnement des fondations reste un élément crucial pour tout ouvrage de génie civil. La connaissance et la maîtrise des différentes normes de dimensionnement en vigueur dans notre pays sont essentiels pour nous en tant que futur ingénieur des travaux publics afin de réussir nos projets.

C'est donc une grande opportunité, qui s'offre à nous au travers de ce travail de fin d'études, de renforcer et enrichir nos connaissances non seulement en géotechnique mais également en programmation à travers le langage VBA Excel ; qui est aujourd'hui incontournable dans le monde professionnel dans sa quasi-totalité. C'est également l'occasion propice pour nous de contribuer à la mise au point d'un utilitaire de calcul pour les fondations profondes qui permettra à l'entreprise de disposer d'un outil fiable de calcul pour ses différentes vérifications.

6.2. Pertinence technique et financière

La question du développement durable est un enjeu majeur pour notre siècle face aux nombreux problèmes d'ordre environnemental, au dérèglement climatique et la rareté de ressources. Elle est incluse dans la politique de développement de plusieurs pays à travers le monde et dans les domaines de la recherche et de la science.

Ainsi l'optimisation de l'utilisation de ces ressources notamment les matériaux de construction tel que le béton qui est le matériau de construction le plus utilisé au monde et qui représente la substance la plus consommée par l'homme après l'eau se révèle être un indicateur de développement durable

Pouvoir choisir une norme possédant le meilleur avantage technico-économique en fonction des différentes caractéristiques du projet (ouvrage, sol, ...) permettra non seulement de s'aligner sur cette politique de développement à notre échelle mais aussi de garantir des coûts plus réduits pour ce type de fondations.

6.3. Pertinence Scientifique

De façon générale, avec l'avancée des moyens scientifiques et technologiques, les techniques de construction sont sans cesse améliorer et reste une question d'actualité chez tous les chercheurs du domaine en témoigne l'apparition ces dernières années de nouvelles normes comme l'Eurocode. Et parmi ces techniques le dimensionnement des fondations profondes n'est pas mis de côté.

Etant donné que ces méthodes sont diverses, il y a eu de nombreuses études comparatives et

résultats de recherche qui ont abouti au fait que la méthode pressiométrique apporterait de meilleurs résultats. Cette étude se situe dans la continuité des précédents résultats surtout en Côte d'Ivoire où il n'existe pas de cadre normatif imposant une unique norme pour le dimensionnement des pieux.

La création d'un logiciel de calcul adapté permettra également non seulement un gain de temps considérable pour l'entreprise dans le dimensionnement des pieux mais aussi un gain économique vu qu'il est totalement gratuit pour celle-ci.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DU PROJET

I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

1. Historique et statut

TERRABO Ingénieur Conseil est un bureau d'étude ivoirien créé en 1996. Il est reconnu comme l'une des meilleures références de l'expertise privée en Côte d'Ivoire. Il a su s'illustrer par la qualité de son management et le professionnalisme de ses experts. Ses atouts lui ont permis de se hisser au rang des meilleures entreprises en Côte d'Ivoire et en Afrique. Il est situé à Abidjan Cocody au 2 Plateaux, rue des jardins, représentée par son Directeur Général, Monsieur KOUAME Konan Séraphin.

Adresse : 06 BP 791 Abidjan 06

Tél : 22 42 40 40,

Email : terrabo@aviso.ci

Site web : Terrabo.com

2. Domaine d'activités

TERRABO-Ingénieur Conseil intervient dans les domaines d'activité et d'ingénierie qui sont :

- Etudes d'identification, études de faisabilité
- Etudes techniques et économiques
- Etudes d'impact environnement et social
- Etudes réglementaires
- Suivi et contrôle de travaux
- Maîtrise d'œuvre de conception et d'exécution
- Schémas directeurs

II. PRESENTATION DU PROJET

Ce projet s'inscrit dans une démarche d'amélioration des techniques et méthodes de dimensionnement des pieux soumis à une charge axiale.

En effet, les méthodes de dimensionnement des pieux se font de manière itérative, les faire donc de façon manuelle s'avère très long et redondant. Vu que le dimensionnement des fondations profondes n'est pas l'une des spécialités de TERRABO Ingénieur conseil. L'entreprise ne possède pas de logiciel de dimensionnement de ces éléments. Cependant l'entreprise est quelques fois contraintes à vérifier les résultats de dimensionnement des fondations profondes qu'elle reçoit de l'extérieur ce qui lui nécessite un temps assez long de vérification.

C'est dans ce cadre que se situe notre étude. Cet utilitaire est donc basé sur les standards de TERRABO INGENIEUR Conseil, mais peut aussi servir pour le calcul d'autres types de combinaisons hors de ces standards. Il permettra de réduire le temps de calcul des pieux sous charge axial par la méthode pressiométrique sans avoir à s'offrir un logiciel coûteux. Le logiciel de calcul se fera selon le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262 de l'Eurocode 7. Normes qui feront également l'objet d'une étude comparative afin de mieux appréhender les différences et avantages dans le cadre du calcul des fondations profondes.

CHAPITRE II : REVUE DE LITTÉRATURE

INTRODUCTION

Ce chapitre a pour but de rassembler toutes les informations techniques et scientifiques, utiles à la compréhension de l'étude. Elle permettra de mieux cerner les différents contours de notre étude.

I. GENERALITES SUR LES FONDATIONS PROFONDES

1. Définition

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. Le mot pieu désigne aussi bien les pieux, les puits et les barrettes. On désigne par pieu, une fondation profonde réalisée mécaniquement et par puits une fondation profonde creusée à la main sous la protection d'un blindage. Une barrette est un pieu foré de section allongée ou composite (en T ou en croix par exemple) 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. D'un point de vue mécanique on distingue la longueur D du pieu de la hauteur d'encastrement mécanique D_e . 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.

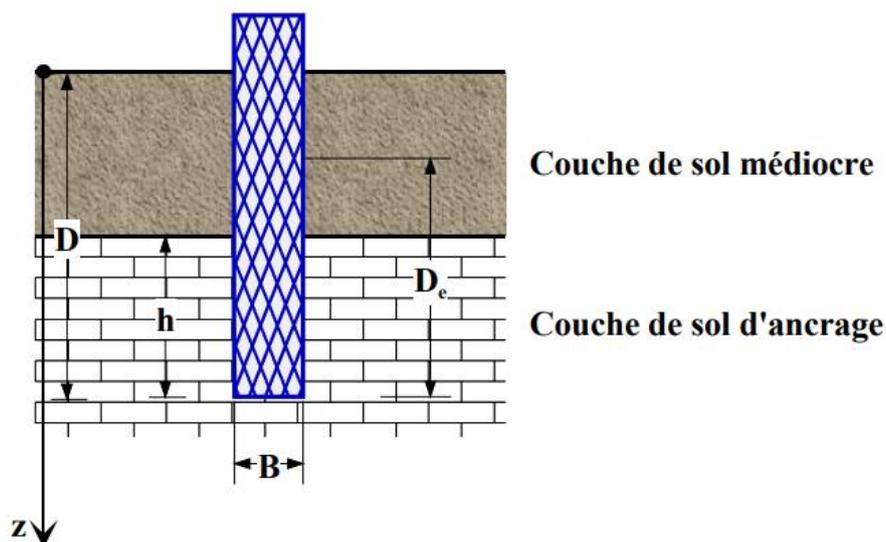


Figure 1 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique D_e

2. Principaux types de fondations profondes

Traditionnellement, on classe les pieux :

- ❖ soit suivant la nature du matériau constitutif : bois, métal, béton ;
- ❖ soit suivant le mode d'introduction dans le sol :
 - pieux battus, façonnés à l'avance et mis en place, le plus souvent, par battage,
 - pieux forés, exécutés en place par bétonnage dans un forage, à l'abri ou non d'un tube métallique.

Pour l'évaluation de la force portante, notamment, il est plus important de considérer le type de sollicitation imposée au sol par la mise en place du pieu. C'est ainsi que l'on distingue :

- ❖ les pieux dont la mise en place provoque un refoulement du sol ;
- ❖ les pieux dont l'exécution se fait après extraction du sol du forage et qui, de ce fait, ne provoquent pas de refoulement du sol ;
- ❖ Certains pieux particuliers dont le comportement est intermédiaire.

Dans ces groupes il existe plusieurs types qui diffèrent par leur mode d'exécution, leur forme et leur matériau, dans le cadre de ce chapitre on fera une description des principaux types de pieux selon le critère du type de sollicitation imposée au sol.

2.1. Pieux refoulant le sol à la mise en place

a. Typologie et mode de mise en œuvre

❖ Pieux battus simples

Ces pieux, façonnés à l'avance, sont souvent soit en métal sous forme de tube ou en forme de H, soit préfabriqués en béton armé. Ils sont mis en place par battage ou par vibration.

Le mode de battage des pieux (verticaux ou inclinés) s'effectue à l'aide d'une sonnette soit sur terre ferme soit sur ponton flottant sur l'eau (Figure 1.4). Pendant le battage, la tête des pieux préfabriqués est protégée d'une coiffe métallique avec intercalation d'une pièce en bois dur.

❖ Pieux battus moulés

Ce sont des pieux à tubes battus exécutés sur place. L'exécution consiste d'abord à battre un tube muni à sa base d'une plaque métallique dans le sol, à mettre, si nécessaire, en place la cage d'armature, puis à remplir le tube de béton pendant son extraction.

❖ Pieux en béton foncé

Ils sont constitués d'éléments en béton armé préfabriqué. Les éléments sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction. Le point d'appui doit pouvoir

fournir une réaction au moins égale à la force du vérin, et le système de calage du vérin doit éviter de communiquer des efforts horizontaux aux pieux.

b. Avantages et inconvénients

En général les pieux refoulant le sol à la mise en place et particulièrement les pieux battus, présentent certains avantages qui sont principalement dus à, la simplicité et la rapidité de mise en œuvre, la possibilité d'inclinaison jusqu'à 30 voire 45°, la vérification de la capacité portante à l'exécution ...etc.

Mais ces types de pieux sont aussi sujets à certains inconvénients tels que: l'endommagement de la tête du pieu lors du battage, la déviation, le remaniement du sol, la vibration, la difficulté de manutention étant donné que la hauteur de la sonnette est limitée, l'interférence entre les pieux due au battage...etc.

2.2. Pieu ne refoulant pas le sol à la mise en place

a. Typologie et mode de mise en œuvre

❖ Pieux forés simple

Ce sont des pieux dont la mise en place consiste à excaver le sol par des moyens mécaniques et ensuite à le remplir par du béton et des armatures (éventuellement).

Le forage se fait avec des outils appropriés avec ou sans protection d'un tubage ou de boue permettant d'assurer la stabilité des parois du forage.

Le procédé, qui n'utilise pas de parois, ne s'applique que dans les sols suffisamment cohérents et situés au-dessus des nappes phréatiques.

❖ Pieux forés à la boue

Le principe du forage est similaire au précédent mais sous protection d'une boue de forage. Le plus souvent la boue utilisée est de la bentonite dont les caractéristiques doivent respecter certaines normes (densité, pH, viscosité, filtrat, teneur en sable, thixotropie).

La boue permet le refroidissement et la lubrification de l'outil de travail, la remontée des déblais de forage (cuttings), la stabilisation des parois du forage à l'intérieur du trou par le dépôt d'une croûte résistante appelée « cake », l'équilibre des pressions hydrostatiques empêchant la submersion du trou de forage par les eaux des nappes.

La mise en place du béton, à l'aide d'un tube plongeur, peut se faire sans mélange du béton avec la boue étant donné que ces deux types de matériaux ont des densités différentes.

Mais de plus en plus les boues à la bentonite sont remplacées par des boues au REVERT dont L'avantage majeur réside dans l'évolution plus ou moins contrôlable de leur viscosité dans le temps. Au bout de généralement 3 à 4 jours, elle devient aussi fluide que l'eau.

❖ Pieux à la tarière creuse

Le principe consiste à visser dans le sol une tarière à axe creux sur une longueur totale au moins égale à la longueur du pieu à réaliser, puis à l'extraire du sol sans dévisser pendant que, simultanément, le béton est injecté par l'axe creux de la tarière.

b. Avantages et inconvénients

Les avantages des pieux forés résident sur :

- la reconnaissance sur place des sols par la stratigraphie du terrain mais aussi au laboratoire grâce à des essais sur des échantillons prélevés sur le terrain;
- la possibilité d'atteindre les grandes profondeurs (30 voire 40m) ;
- l'absence de risque d'ébranlement du sol ou des constructions avoisinantes;
- la possibilité de reprise en sous-œuvre et de renforcement des fondations.

D'une façon générale, les pieux forés présentent beaucoup d'avantages, mais ils exigent une exécution minutieuse sans laquelle, on risque le délayage du béton, l'éboulement des parois de la fondation, la striction du pieu, ...etc.

Une classification plus générale des pieux est représentée dans le diagramme ci-dessous.

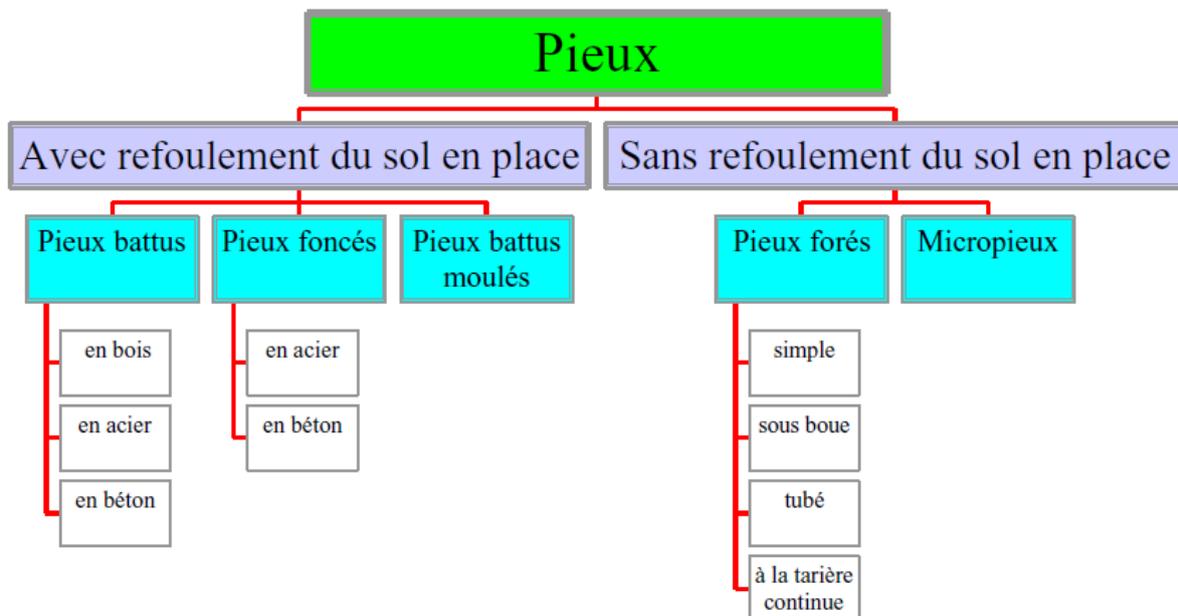


Figure 2 : Diagramme de classification des pieux

3. Mécanisme général et notion de frottement négatif

Un pieu transmet au sol les charges qu'il supporte par l'appui de sa base sur le sol résistant (effort de pointe) et par le frottement latéral entre le sol et le pieu (effort de frottement latéral)

L'effort de pointe est proportionnel à :

- La section de la base du pieu
- A la résistance du substratum

L'effort de frottement latéral est proportionnel :

- A la surface de contact entre le pieu et le sol
- Au coefficient de frottement pieu-sol (rugosité du pieu, pression latérale, coefficient de frottement interne du sol)

Le frottement du pieu n'est mobilisable que s'il y a déplacement relatif entre le pieu et le sol.

Si le pieu a tendance à s'enfoncer dans un sol stable le frottement sol pieu génère un effort vertical ascendant (frottement positif)

Si au contraire, le pieu étant immobile, le sol à tendance à tasser, le frottement sol-pieu est négatif. Cela a pour conséquence de surcharger le pieu. Pour remédier à ce problème (couches compressibles), on cheminera le pieu par un tubage afin de diminuer l'effet du frottement négatif

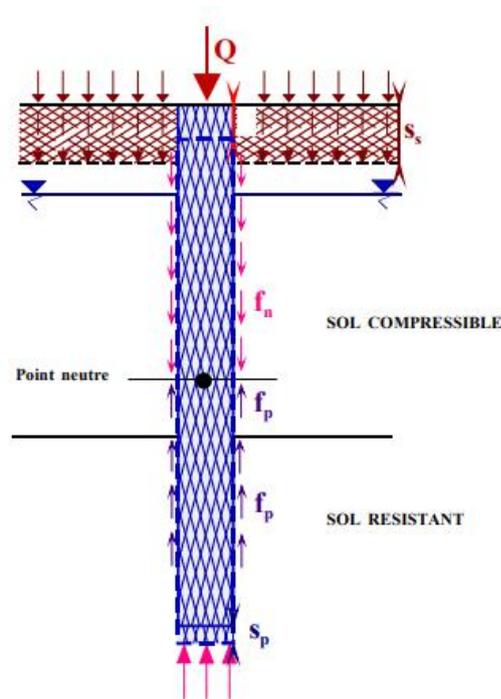


Figure 3 : Mécanismes du frottement latéral positif et négatif

Le frottement négatif se produit généralement dans des sols fins saturés qui se consolident avec le temps. Il augmente donc avec la consolidation du sol et devient maximal à long terme (généralement plusieurs années). Le frottement négatif maximal dépend :

- de la compressibilité du sol,
- des surcharges de longue durée appliquées sur le terre-plein,
- de l'interface entre le sol et le pieu.

II. PRESENTATION DES APPROCHES DE DIMENSIONNEMENT DE TEXTES NORMATIFS

Les méthodes de calcul de la capacité portante des pieux peuvent être classées en trois catégories :

- les méthodes « classiques » à partir des essais de laboratoire (caractéristiques de résistance au cisaillement). Ces méthodes sont décrites dans la plupart des cours de mécanique des sols. On peut, notamment, consulter CHRISTOULAS (1988)
- les méthodes dynamiques, que ce soit tant les formules classiques dites de « battage » que les méthodes, plus récentes, utilisant l'analyse de la propagation des ondes (voir BOURGES et FRANK, 1989, par exemple) ;
- les méthodes utilisant directement les résultats d'essais en place : essentiellement, SPT (Standard Pénétration Test), CPT (Essai de Pénétration au Cône ou Essai de Pénétration Statique) et PMT (Essai au Pressiomètre Ménard). La description de ces essais peut être trouvée dans ISSMFE-TC 16 (1989) pour le SPT et le CPT et dans AFNOR (1990) pour le PMT.

Des études ont montré que les méthodes résultant des résultats d'essai en place donne de meilleurs résultats notamment celle issue de l'essai pressiométrique qui est d'ailleurs recommandée par le LCPC et le SETRA.

En Côte d'Ivoire l'utilisation de cette méthode pour les ouvrages génie civil se fait généralement suivant les normes du Fascicule 62 titre V et de l'Eurocode 7 NF P94 262.

Le but de la présente est d'évaluer la méthode pressiométrique suivant ces 2 normes au travers d'une étude comparative sur un projet réel.

Dans ce chapitre, il sera question de présenter la méthode basée sur les résultats de l'essai pressiométrique et les approches de calcul de chacune des normes.

A. APPROCHE DE CALCUL SUIVANT LE FASCICULE 62 TITRE V

1. Historique du Fascicule 62 Titre V

Ce fascicule, entièrement nouveau, vient combler une lacune du C.C.T.G. en matière de conception et de calcul de fondations adaptées aux ouvrages de génie civil. Il s'appuie sur les concepts semi-probabilistes présentés dans les directives communes de 1979 et est ainsi cohérent avec les règles de conception et de calcul des structures telles que le B.A.E.L. 91 (fascicule 62, titre premier, section I).

Le document est articulé en trois grandes parties : dispositions communes, fondations superficielles, fondations profondes ; il renvoie largement, pour les modèles de comportement des fondations et les méthodes de calcul particulières, à des annexes (dix annexes au texte, contractuelles, et onze annexes aux commentaires, informatives ou éventuellement contractualisables). Cette structure du document, qui peut apparaître complexe, facilitera son adaptation aux progrès des travaux de normalisation du domaine géotechnique qui sont engagés tant au plan français qu'au plan européen (EUROCODE 7).

2. Objet et domaine d'application

Les prescriptions de la partie C du Fascicule 62 Titre V s'appliquent aux fondations constituées d'un ou plusieurs éléments, pouvant être individuellement assimilés à des éléments de fondations profondes.

On rappelle que selon le Fascicule 62 Titre V, en règle générale, on peut considérer qu'un élément de fondation est de type profond lorsque sa hauteur d'encastrement D_e , est supérieure à cinq fois sa largeur.

Ces règles de conception et de calcul sont applicables à la justification des fondations profondes des ouvrages de génie civil.

3. Approche méthodologique

Les principes de justification des fondations profondes sont conformes à la théorie générale du calcul aux états limites qui consiste, pour un état limite donné, à vérifier que la charge axiale de calcul reste égale ou inférieure à la charge maximum de l'élément de fondation.

On distingue :

- les états limites ultimes (ELU) qui ont pour objet de s'assurer que la probabilité de ruine de l'ouvrage est acceptable,
- les états limites de service (ELS) qui ont pour objet de s'assurer qu'un seuil de déplacement

jugé critique est acceptable.

La charge axiale de calcul résulte, pour une situation donnée, de la détermination de la sollicitation de calcul à partir d'une combinaison d'actions. Les actions sont multipliées par des coefficients de pondération γ et il est appliqué un coefficient de méthode de 1,125 dans le calcul de la sollicitation due aux actions.

Ensuite on vérifie que la **sollicitation axiale de calcul**, y compris éventuellement les frottements négatifs, reste **inférieure à Q_{max}** déterminée dans les deux états limites (ELU et ELS).

L'expression des **charges limites** en compression Q_u et en traction Q_{tu} d'un élément de fondation profonde est la suivante.

$$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$$

$$Q_{tu} = Q_{su}$$

Q_{pu} : effort limite mobilisable sous la pointe de l'élément de fondation

Q_{su} : effort limite mobilisable par frottement latéral sur la hauteur concerné du fut

Ces efforts sont déterminés dans notre cas par les résultats des essais pressiométriques

Les **charges de fluage** en compression Q_c et en traction Q_{tc} d'un élément de fondation profonde sont évalués, à défaut d'essai en place, à partir de Q_{pu} et de Q_{su} par les relations suivantes.

- pour les éléments de fondation mis en œuvre par **excavation du sol** :

$$Q_c = 0,5 \cdot Q_{pu} + 0,7 \cdot Q_{su}$$

$$Q_{tc} = 0,7 \cdot Q_{su}$$

- pour les éléments de fondation mis en œuvre avec **refoulement du sol**

$$Q_c = 0,7 \cdot Q_{pu} + 0,7 \cdot Q_{su} = 0,7 \cdot Q_u$$

$$Q_{tc} = 0,7 \cdot Q_{su}$$

La charge maximum, dans un état limite donné, est obtenue en divisant par un coefficient de sécurité partiel la charge limite de ce même état.

Tableau 1 : Combinaisons aux états limites

Etats Limites de Services	Q_{max}	Etats Limites Ultimes	Q_{max}
Combinaisons rares	$\frac{Q_c}{1,10}$	Combinaisons fondamentales	$\frac{Q_u}{1,40}$
Combinaison quasi-permanentes	$\frac{Q_c}{1,40}$	Combinaison accidentelles	$\frac{Q_u}{1,20}$

La vérification vis à vis des états limites ultimes est donc faite par rapport à la charge limite

Q_u et la vérification vis à vis des états limites de service par rapport à la charge critique de fluage Q_c .

3.1. Calcul de la charge limite de pointe

Selon le fascicule 62, titre V, la charge limite de pointe est donnée par la formule :

$$Q_p = A k_p Ple^*$$

A : section de pointe

k_p : facteur de portance

Ple^* : pression limite nette équivalente

La valeur de k_p , facteur de portance, est fixée par le tableau ci-dessous en fonction de la **nature du sol** et du mode de **mise en œuvre (type de pieu)**, quelle que soit la géométrie de la section droite de l'élément de fondation

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

Avec $a = B/2$ si $B > 1 m$

$a = 0.5m$ si $B < 1 m$

$b = \min(a, h)$

3.2. Calcul de la charge limite de frottement latéral

$$Q_s = P \int q_s(z) dz$$

P : Périmètre du pieu

$q_s(z)$: frottement latéral unitaire

Le frottement latéral unitaire limite est donné en fonction de la pression limite nette (qui exprime la compacité ou le serrage du sol) par les courbes de la figure

Le choix de la courbe à utiliser en fonction :

- de la nature du sol ;
- du type de pieu.

B. APPROCHE DE CALCUL SUIVANT L'EUROCODE 7 NF P 94-262

1. Historique de la NF P 94-262 de l'Eurocode 7

En 1990, le Comité européen de normalisation (CEN) a entrepris la rédaction des Eurocodes, normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil, établissant un ensemble de règles techniques, dans le but de leur donner par la suite un statut de normes européennes et pallier l'absence d'harmonisation entre ces règles à travers l'Europe. Ceci apparaissait en effet comme un obstacle au libre accès des entreprises de travaux ou des bureaux d'études techniques aux marchés des autres états membres.

Les Eurocodes sont chacun subdivisés en parties et sous-parties. Chacun vise un aspect spécifique de la conception, ou un type particulier de construction. Il existe 10 Eurocode au total, celui qui traite du calcul géotechnique est l'Eurocode 7.

Dans chaque pays de l'UE, l'Eurocode 7 est utilisé au moyen d'une annexe nationale qui fournit les valeurs des coefficient partiels à appliquer pour le calcul de chaque ouvrage, il précise les orientations nationales à suivre pour les clauses pour lesquelles les Eurocodes laissent une possibilité de choix. En France il existe six (06) normes d'application nationales complétant l'Eurocode 7 parmi lesquelles **la NF P 94 – 262 pour les fondations profondes** publiée en Juillet 2012 et puis en Février 2013 suite à des erreurs d'impressions.

2. Objet et domaine d'application

Cette norme traite de la justification, dans le cadre de l'Eurocode 7 des fondations profondes supportant des bâtiments des ouvrages d'art des tours des mats des cheminées et des silots.

D'après la NF P 94-262 le terme « fondation profonde » désigne des fondations par pieux, micropieux, barrettes ou puits dont l'élancement est élevé (typiquement des fondations dont la longueur est supérieure à 5 fois le diamètre ou la largeur).

La norme française NF P94-262 « justification des ouvrages géotechniques - Fondations profondes » est une norme d'application nationale de l'Eurocode 7 « Calcul géotechnique » norme NF EN 1997-1. Contrairement aux autres Eurocodes, pour les justifications géotechniques, chaque pays précise dans son corpus normatif les méthodes de calcul permettant d'appliquer l'Eurocode 7.

Cette norme est donc la description des méthodes de justifications des fondations profondes valables en France, que ce soient des structures de génie civil ou des bâtiments, pour des

ouvrages de catégorie géotechnique 2 (définie par le tableau suivant)

Tableau 2 : Catégories géotechniques en fonction des classes de conséquences et des conditions du site

Classe de conséquence	Conditions de site	Catégorie géotechnique ^(a)	Base des justifications
CC1	Simple et connues	1	Expérience et reconnaissances géotechniques qualitatives admises
	Complexes	2	Reconnaissances géotechniques et calculs nécessaires
CC2	Simple		
	Complexes	3	Reconnaissances géotechniques et calculs approfondis
CC3	Simple ou complexes		

^(a) Il n'y a pas de règles établies pour le choix de la catégorie géotechnique. En pratique, toutefois, on considère qu'un ouvrage fondé sur pieux relève au moins de la catégorie géotechnique 2, et on classe en catégorie géotechnique 3 les ouvrages établis dans un site instable, ou dans des conditions de risques sismiques importants, ou dans des sols évolutifs ou sensibles, les ouvrages nucléaires, de stockage GNL, etc.

3. Approche méthodologique

La détermination des valeurs de calcul par les approches semi-empiriques est basée sur des essais au pressiomètre

Ces types d'essai et leurs résultats permettent dans un premier temps de calculer les valeurs des contraintes limites :

- q_b pour la contrainte limite de pointe ;
- q_s pour la contrainte limite de frottement axial unitaire.

Ces valeurs sont alors les données d'entrée des deux procédures au choix :

- ❖ **Procédure dite du « modèle de terrain »** qui se base sur les sondages existants pour réaliser un modèle géotechnique représentatif : pour chaque couche du modèle on détermine les valeurs caractéristiques ;
- ❖ **Procédure dite du « pieu modèle »** qui consiste à réaliser directement des calculs de portance pour chaque profil de sols obtenus par des sondages avec essais pressiométriques ou pénétrométriques : les valeurs des résistances limites sont déterminées pour chaque sondage et la dispersion spatiale est prise en compte.

Ces procédures permettent d'obtenir les valeurs caractéristiques puis de calcul des résistances du terrain.

La méthode pressiométrique permet, soit pour chaque couche du modèle géotechnique retenue, soit pour chaque valeur d'essai pressiométrique, de déterminer la contrainte limite du terrain

sous la base du pieu q_b et la contrainte limite de frottement axial unitaire q_s à partir d'essais réalisés au pressiomètre « Ménard ».

3.1. Procédure du modèle de terrain

Le principe de la procédure « modèle de terrain » est de déterminer les valeurs caractéristiques de portance à partir des valeurs caractéristiques de la résistance de pointe et du frottement axial unitaire dans les différentes couches d'un modèle géotechnique du site, éventuellement découpé en zones géotechniquement homogènes.

Afin de déterminer la portance d'une fondation profonde, les trois étapes sont :

- ❖ Détermination des valeurs limites pour chaque couche de sol et de leurs valeurs caractéristiques respectives $q_{b ; k}$ et $q_{s ; i ; k}$
- ❖ Détermination des valeurs caractéristiques par application des coefficients de modèle $\gamma_{R ; d1}$ et de méthode $\gamma_{R ; d2}$:
 - $R_{c ; k}$: valeur caractéristique de la résistance en compression,
 - $R_{c ; cr ; k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en compression,
 - $R_{t,k}$: valeur caractéristique de la résistance à la traction,
 - $R_{t ; cr ; k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en traction ;
- ❖ Détermination des valeurs de calcul par application des facteurs partiels de résistance :
 - $R_{c ; d}$: valeur de calcul de la résistance en compression,
 - $R_{c ; cr ; d}$: valeur de calcul de la charge de fluage en compression,
 - $R_{t,d}$: valeur de calcul de la résistance à la traction,
 - $R_{t ; cr ; d}$: valeur de calcul de la charge de fluage en traction.

Les deux premières étapes dépendent du type d'essais de sol : pressiomètre ou pénétromètre. Le calcul se base sur un modèle géotechnique déterminé en amont de la procédure. La dernière étape pour déterminer les valeurs caractéristiques et de calcul des résistances est identique que l'on utilise des résultats pressiométriques ou pénétrométriques

3.2. Procédure du pieu modèle

Le principe de la procédure « pieu modèle » est de déterminer les valeurs caractéristiques de portance à partir de N portances calculées pour chacun des N sondages situés au sein d'une zone géotechnique homogène et d'en faire une analyse statistique.

Afin de déterminer la portance d'une fondation profonde, les trois étapes sont :

- ❖ Détermination des valeurs limites brutes
 - R_b : résistance de pointe,
 - R_s : résistance en frottement axial,
 - R_c : résistance en compression,
 - $R_{c;cr}$: charge de fluage en compression,
 - R_t : résistance à la traction,
 - $R_{t;cr}$: charge de fluage en traction ;
- ❖ Détermination des valeurs caractéristiques par combinaison de l'ensemble des valeurs brutes et application du coefficient de modèle $\gamma_R ; d1$
 - $R_{c;k}$: valeur caractéristique de la résistance en compression,
 - $R_{c;cr;k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en compression,
 - $R_{t;k}$: valeur caractéristique de la résistance à la traction,
 - $R_{t;cr;k}$: valeur caractéristique de la charge de fluage en traction) ;
- ❖ Détermination des valeurs de calcul par application des facteurs partiels de résistance
 - $R_{c;d}$: valeur de calcul de la résistance en compression,
 - $R_{c;cr;d}$: valeur de calcul de la charge de fluage en compression,
 - $R_{t;d}$: valeur de calcul de la résistance à la traction,
 - $R_{t;cr;d}$: valeur de calcul de la charge de fluage en traction).

3.3. Justifications aux états limites

Le niveau de sollicitation du terrain par une fondation profonde en service doit être compatible avec les exigences de déplacement axial de la fondation profonde soumise à une sous charge axiale. (2) Sauf autres spécifications, il convient simplement de vérifier que la mobilisation du terrain demeure inférieure, selon le cas, à la valeur de calcul de la charge de fluage de compression $R_{c;cr;d}$ ou de traction $R_{t;cr;d}$.

L'inégalité suivante doit être satisfaite :

$$F_d \leq R_{c;cr;d}$$

$$F_d \leq R_{t;cr;d}$$

III. PRESENTATION DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

1. Objectif de l'essai

Il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place, effectué grâce à une sonde cylindrique dilatable radialement introduite dans un forage. Cet essai fait l'objet de la norme française NF P 94-110-1. Les informations recueillies grâce au forage ainsi que les caractéristiques mécaniques obtenues lors des essais permettent :

- D'apprécier la succession des couches de sol et éventuellement leur nature ;
- 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.

2. Principe de l'essai

Le procédé consiste à introduire dans le sol, une sonde cylindrique dilatable. Cette sonde est reliée à un appareil de mesure pression-volume, appelé Contrôleur Pression Volume (CPV), situé à la surface du sol. L'essai permet d'obtenir une courbe "pression appliquée-volume injecté", représentative de la relation contrainte-déformation jusqu'à la rupture du sol en place. Pour cela 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 nous renseigne sur la déformation du sol, et la pression de l'eau nous 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).

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 (figure 4) est la représentation de $V = f(p)$ et prend donc en

compte la pression réellement appliquée au sol.

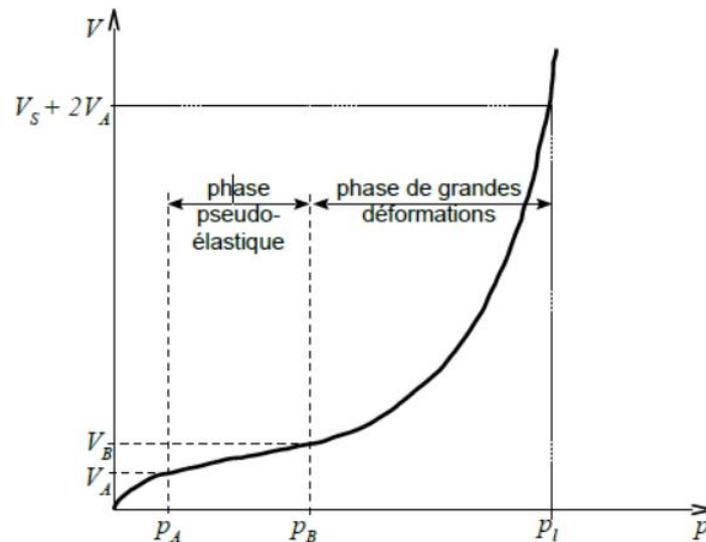


Figure 4 : Courbe type d'un essai pressiométrique

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). À 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

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_l . Les valeurs de E_M et P_l déterminées sur un forage sont ensuite présentées sur un profil en fonction de la profondeur z . Ce profil est appelé profil pressiométrique (figure 5). En plus des caractéristiques pressiométriques, 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 foration utilisé est également indiqué.

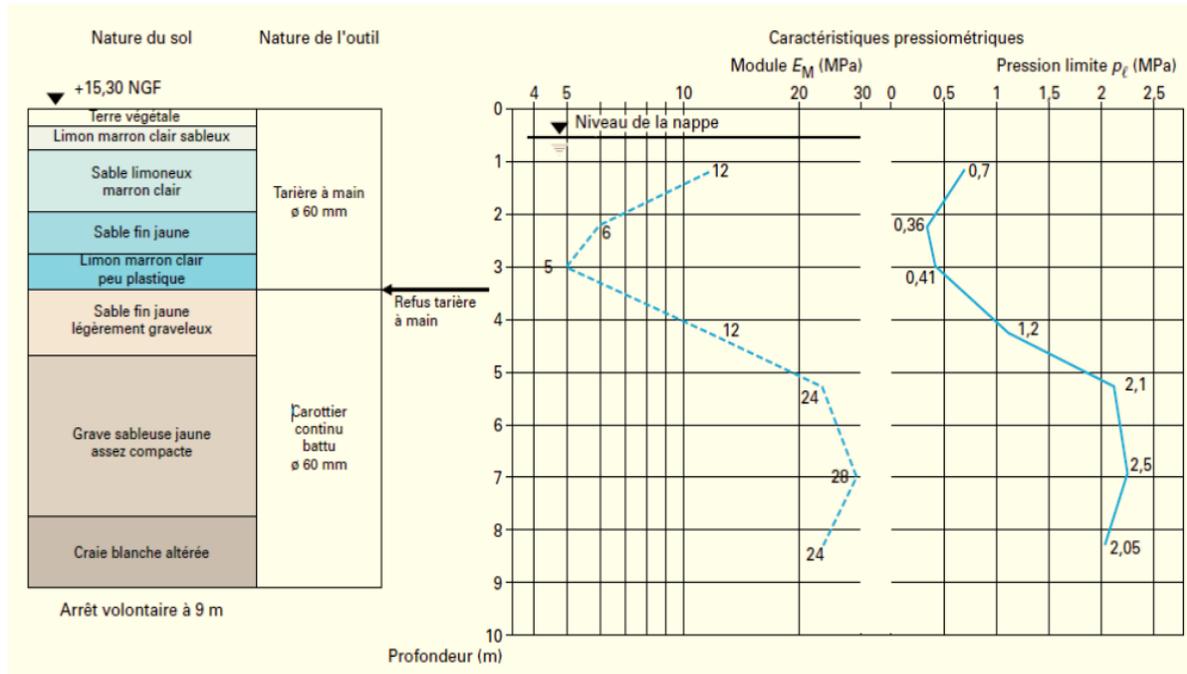


Figure 5 : Profil pressiométrique

CONCLUSION PARTIELLE

Cette revue de littérature a permis de définir les différentes notions autour desquelles l'étude se déroulera. Elle permettra également de mieux appréhender les différents aspects techniques afin de mieux effectuer l'étude comparative qui est l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE III : ETUDE COMPARATIVE DES APPROCHES DE CALCUL DES PIEUX

INTRODUCTION

Le chapitre III présente une étude comparative entre les règles du Fascicule 62 Titre V et la NF P 94 -262 de l'Eurocode 7 sur la base de leur texte normatif pour le dimensionnement d'un pieu sous charge axial à partir de l'essai pressiométrique.

Le principe de cette étude comparative consistera à mettre face à face les différents éléments majeurs de ces deux (02) normes qui seront à chaque fois suivi d'une analyse présentant leurs éventuelles similitudes et/ou différences.

La performance d'une méthode de dimensionnement se mesure par son aptitude à prendre en compte le plus de paramètres influençant le comportement des fondations. La méthode doit dans sa démarche, limiter le plus possible l'importance des données empiriques, tenir compte non seulement de l'effet du rapport pieu-sol, mais également sur l'évolution de la technologie des pieux et des propriétés des couches de sol rencontrés.

C'est sur la base de ces différents critères de performances que s'appuiera cette étude comparative.

I. CLASSIFICATION DES PIEUX ET DES SOLS

1. Classification des pieux

Fascicule 62 Titre V

Cette norme ne possède pas de classification spécifique des pieux. Il existe plusieurs classifications des pieux mais de façon générale pour l'évaluation de la portance on regroupe les pieux principalement par le type de sollicitation qu'ils imposent aux sols lors de leur mise en place en distinguant ceux qui refoulent le sol à la mise en place de ceux qui ne refoulent pas le sol et certains dont le comportement est intermédiaire.

NF P94-262

La norme NF P 94-262 quant à elle propose un découpage nouveau des types de pieux selon leur procédure de mise en œuvre en incluant les nouvelles technologies de pieux, ainsi les fondations profondes sont réparties en huit (08) classes et 20 catégories. (Voir annexe 1)

2. Classification des sols

Fascicule 62 Titre V

Les classes de terrain sont définies à partir de l'identification des sols et de leur classement suivant leur nature et leurs propriétés physico-chimique, on distingue dans le Fascicule 62 Titre V cinq (05) classes de terrain.

NF P94-262

Dans cette nouvelle norme il a été introduit en plus des 5 classes déjà existantes dans le Fascicule 62 Titre V une nouvelle catégorie appelée « **sols intermédiaires** ».

Cette catégorie comprend un ensemble de terrains dont le comportement est complexe à appréhender. Ces sols sont constitués d'un mélange de matériaux fins et pulvérulents qui leur confère, selon la nature et la durée des sollicitations auxquelles ils sont soumis, un comportement proche d'un sol soit cohérent, soit pulvérulent.

3. Analyse

Par rapport au Fascicule 62 titre V, la NF P 94-262 a revisité la classification des pieux et des sols en intégrant les nouveaux types de pieux de qui ont été développés ces dernières années et tout en prenant en compte le comportement complexe de certains types de sols qui présentent des caractéristiques intermédiaires entre les classes de sols proposées par l'ancienne norme.

Cette nouvelle classification appréhende mieux l'actualité technologique dans la mise en œuvre des pieux et offre une meilleure approche des caractéristiques du sol contrairement au Fascicule 62 Titre V.

II. DETERMINATION DES CONTRAINTES LIMITES

Dans les deux (02) normes, la résistance limite ou capacité portante est obtenue en additionnant la charge limite de pointe qui correspond au poinçonnement du sol sous la base du pieu et la charge limite mobilisable par le frottement latéral entre le sol et le pieu.

$$R_c = R_b + R_s \quad \text{NF P94-262}$$
$$Q_c = Q_p + Q_s \quad \text{Fascicule 62 Titre V}$$

1. Contrainte limite de pointe

Le principe de détermination de la contrainte limite en pointe d'un pieu est la même dans les deux (02) normes, le calcul de P_{le}^* issu des résultats des essais pressiométrique est également pareil, la différence réside dans la détermination du facteur de portance k_p .

Fascicule 62 Titre V

La valeur de k_p , facteur de portance, est fixée par le tableau ci-dessous en fonction de la **nature du sol** et du mode de **mise en œuvre (type de pieu)**, quelle que soit la géométrie de la section droite de l'élément de fondation.

Tableau 3 : Valeurs du facteur de portance K_p dans le 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-calcaires		1,8	2,6

NF P94-262

Dans la norme récente la valeur de k_p passe par la détermination de deux (02) paramètres intermédiaires : k_{pmax} et l'encastrement effectif D_{ef} .

Le tableau F.4.2.1 de la norme NF P94-262 donne la valeur de k_{pmax} en fonction de la classe de pieu, et des 6 catégories conventionnelles du terrain.

Tableau 4 : Valeur de k_p max en fonction de la classe des pieux et de la catégorie de terrain

Terrain	Argile % CaCO ₃ < 30 % Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et calcaire- marneux	Roche altérée et fragmentée (a)
Classe de pieu (c)					
1	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)
2	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30
5 #	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6 #	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7 #	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15 (b)	1,1 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)	1,45 (b)

$$D_{ef} = \frac{I}{P_{te}^*} \int_{D-h_D}^D p_l^*(z) dz \quad [Formule F.4.2.6]$$

$$h_D = \min(10B; D)$$

Au minimum, l'encastrement effectif dans la couche porteuse est pris égal à 3 diamètres ou 1,50 m pour des pieux de diamètres supérieurs à 0,5 m. Moyennant la garantie d'une bonne exécution, cette valeur peut être limitée à 0,5 m. [F.4.2 (5) NOTE 1]

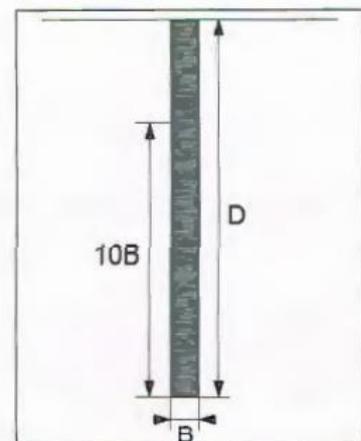


Figure 6 : Détermination de l'encastrement effectif

Pour les pieux très élancés, les terrains de surface situés à plus de 10B de la pointe du pieu ne sont donc pas pris en compte dans le calcul de l'encastrement effectif.

k_p s'obtient alors de la façon suivante :

Lorsque D_{ef} / B est supérieur à 5 : $k_p = k_{pmax}$

Lorsque D_{ef} / B est inférieur à 5 : $k_p = 1 + (k_{pmax} - 1) \left(\frac{D_{ef}/B}{5} \right)$

La détermination de k_p dans la norme NF P 94-262 dépend de la classe du pieu, de la catégorie conventionnelle du terrain dans laquelle se trouve la base de la fondation profonde et de l'encastrement effectif D_{ef} .

2. Contrainte de frottement axial unitaire

Fascicule 62 Titre V

Dans les textes du Fascicule 62, le frottement latéral unitaire limite est donné en fonction de la pression limite nette (qui exprime la compacité ou le serrage du sol) par les différentes courbes de la figure 7.

Le choix de la courbe à utiliser en fonction :

- de la nature du sol ;
- du type de pieu est indiqué au tableau suivant :

Tableau 5 : Choix des courbes pour le calcul du frottement latéral unitaire q_s

	Argiles, limons			Sables, graves			Craies			Marnes	
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B
Foré simple	Q_1	$Q_1, Q_2^{(1)}$	$Q_3, Q_3^{(1)}$				Q_1	Q_3	$Q_4, Q_5^{(1)}$	Q_3	$Q_4, Q_5^{(1)}$
Foré boue	Q_1	$Q_1, Q_2^{(1)}$		Q_1	$Q_2, Q_1^{(2)}$	$Q_3, Q_2^{(2)}$	Q_1	Q_3	$Q_4, Q_5^{(1)}$	Q_3	$Q_4, Q_5^{(1)}$
Foré tubé (tube récupéré)	Q_1	$Q_3, Q_2^{(3)}$		Q_1	$Q_3, Q_1^{(2)}$	$Q_3, Q_2^{(2)}$	Q_1	Q_2	$Q_3, Q_4^{(3)}$	Q_3	Q_4
Foré tubé (tube perdu)	Q_1			Q_1	Q_2		$^{(4)}$			Q_2	Q_3
Puits ⁽⁵⁾	Q_1	Q_2	Q_3				Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5
Métal battu fermé	Q_1	Q_2		Q_2	Q_3		$^{(4)}$			Q_3	Q_4
Battu préfabriqué béton	Q_1	Q_2		Q_3			$^{(4)}$			Q_3	Q_4
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		$^{(4)}$			Q_3	Q_4
Injecté basse pression	Q_1	Q_2		Q_3			Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	
Injecté haute pression ⁽⁶⁾		Q_4	Q_5	Q_5	Q_6			Q_5	Q_6	Q_6	

(1) Réalésage et rainurage en fin de forage.

(2) Pieux de grandes longueurs (supérieure à 30m).

(3) Forage à sec, tube non louvoyé.

(4) Dans le cas des craies, le frottement latéral peut être très faible pour certains types de pieux.

Il convient d'effectuer une étude spécifique dans chaque cas.

(5) Sans tubage ni virole foncé perdu (parois rugueuses).

(6) Injection sélective et répétitive à faible débit.

Une fois la courbe, on obtient la valeur du frottement latéral axial unitaire en lisant sur la figure suivante

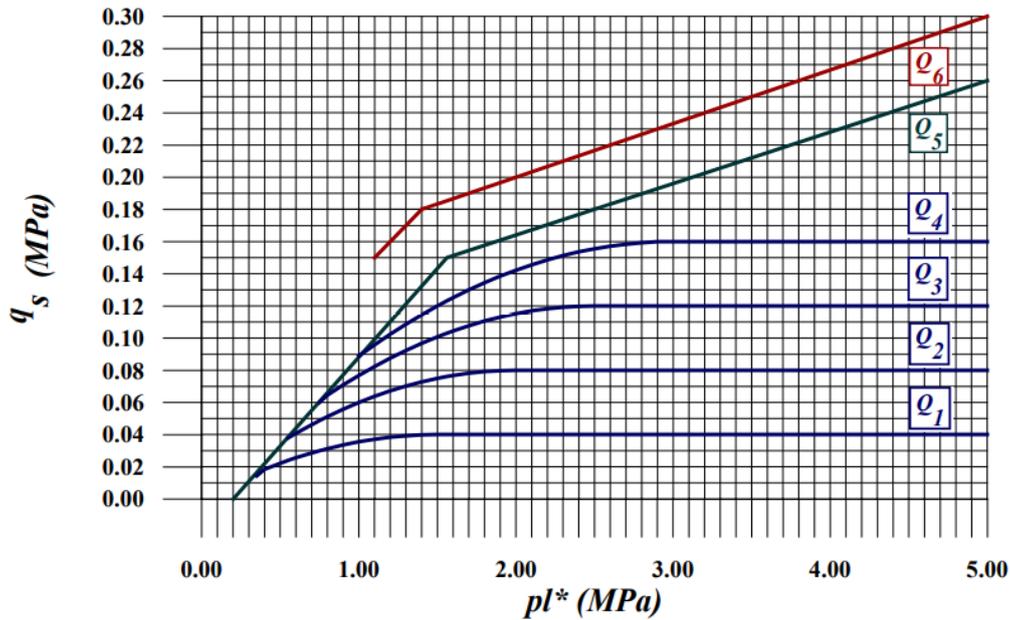


Figure 7 : Valeurs du frottement latéral unitaire

NF P94-262

À partir des résultats pressiométriques, la valeur du frottement axial unitaire q, se calcule de la façon suivante dans le texte normatif de la NF P 94 – 262 :

$$q_s(z) = \alpha_{\text{pieu-sol}} f_{\text{sol}}(Pl^*(z)) < q_{s \text{ max}}$$

Le paramètre f_{sol} (paramètre intermédiaire ne dépendant que du terrain) se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$f_{\text{sol}}(Pl^*) = (a Pl^* + b)(1 - e^{-c Pl^*})$$

On notera que cette formule s'applique avec Pl* exprimé en MPa, a, b (en MPa), c (en MPa⁻¹) sont choisis d'après le tableau suivant :

La valeur de f_{sol} obtenue est alors en MPa.

Tableau 6 : Valeurs numériques des paramètres a,b et c des courbes f_{sol}

Type de sol	Argile % CaCO ₃ < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
Choix de la courbe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
a	0,003	0,01	0,007	0,008	0,01
b	0,04	0,06	0,07	0,08	0,08
c	3,5	1,2	1,3	3	3

Les courbes f_{sol} correspondantes sont visibles à la figure F. 5.2.1 de la norme NF P94.262.

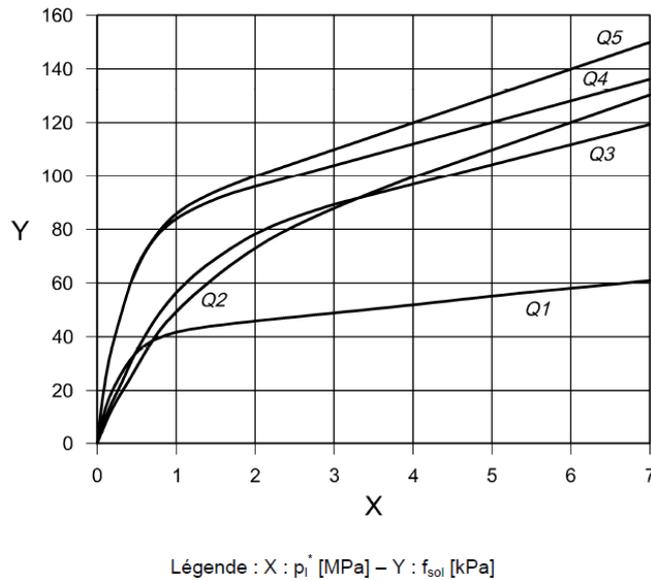


Figure 8 : Courbe f_{sol} pour la méthode pressiométrique

$\alpha_{pieu-sol}$ se détermine en fonction de la catégorie de pieux et du type de terrain dans le tableau annexe 2 du présent document.

Les valeurs de frottement axial unitaire obtenues par le produit $\alpha_{pieu-sol} f_{sol}$ sont à comparer avec les valeurs maximales prescrites pour $q_s \max$ dans le tableau en annexe 3 du présent document. (Attention, les valeurs sont données en kPa).

3. Analyse

❖ Contrainte limite de pointe

Le calcul de la contrainte limite de pointe diffère par rapport à la détermination de la valeur du facteur de portance k_p

En effet dans la norme NF P 94-262, il y a l'introduction de deux (02) nouveaux paramètres :

- k_{pmax} fonction de la nouvelle classification des sols et des pieux qui comme développé dans la partie I de ce présent chapitre est complètement différente de celle du fascicule 62 Titre V .
- D_{ef} encastrement effectif qui prend en compte la profondeur d'ancrage du pieu dans la couche porteuse.

Ce qui apporte une meilleure représentativité pour la détermination de la valeur du facteur de portance par rapport au Fascicule 62 Titre V.

En effet dans la norme NF P 94-262, la détermination de k_p prend en compte l'encastrement effectif du pieu dans le sol contrairement au Fascicule 62 Titre V où il se détermine seulement

en fonction de la nature du sol et du type de pieu.

❖ **Contrainte de frottement axial unitaire**

Contrairement au Fascicule 62 Titre V où la valeur de la contrainte de frottement axial unitaire se détermine par simple lecture d'abaque, dans la norme NF P 94-262 elle se calcule par la mise en facteur de 2 nouveaux paramètres :

$\alpha_{\text{pieu-sol}}$: est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type de pieu et de la classe de sol défini dans le tableau (voir annexe 2).

f_{sol} : est une fonction qui ne dépend que du type de sol et des valeurs de PI^* .

L'introduction de ces paramètres semblent constitué une meilleure approche de la relation pieu-sol pour la détermination de la contrainte de frottement axial unitaire.

De plus avec l'introduction de formules analytiques pour le calcul des valeurs de frottement axial unitaire il n'existe plus le risque d'erreur de lecture sur abaque rencontre dans le Fascicule 62 Titre V.

L'unité sur les abaques du Fascicule 62 Titre V sont en MPa, une erreur de lecture à 10^{-1} près serait très importante d'autant plus que ces lectures se font par couches donc elles présentent un risque important d'accumulation de ces erreurs qui donnerait une valeur assez éloignée de la valeur réelle du frottement axial.

III. CALCUL DE PORTANCE ET JUSTIFICATIONS AUX ETATS LIMITES

1. Détermination des valeurs de calcul

Fascicule 62 Titre V

A partir des contraintes limites calculés, dans le Fascicule 62 Titre V on détermine la charge limite sous pointe Q_p et la charge limite mobilisable par effort latéral Q_s .

Les valeurs de calculs sont déterminées par combinaisons en fonction du type de sollicitations imposée au sol par le pieu.

NF P94-262

Cette norme propose deux (02) procédures au choix pour la détermination de la capacité portante :

- ❖ **Procédure dite du « modèle de terrain »** qui se base sur les sondages existants pour réaliser un modèle géotechnique représentatif : pour chaque couche du modèle on détermine les valeurs caractéristiques ;
- ❖ **Procédure dite du « pieu modèle »** qui consiste à calculer dans une zone homogène la portance ou la résistance de traction d'une fondation profonde, de type et de géométrie (diamètre, longueur) fixés, au droit de chaque sondage de reconnaissance jugé représentatif du site puis de mettre en œuvre au choix deux méthodes :
 - soit d'appliquer au moyen des facteurs de corrélation ξ_3 et ξ_4 la formule générale pour déterminer la portance caractéristique de la fondation profonde ou la résistance caractéristique de traction de la fondation profonde ;
 - soit d'appliquer aux N valeurs de la portance R_c correspondant aux N sondages de la zone d'étude la procédure décrite dans l'Article D.7.2 de la norme NF EN 1990. Il est alors recommandé de supposer que la distribution des valeurs R_c est log-normale.

Dans ces approches il y l'introduction de deux (02) nouveaux facteurs, les coefficients de modèle $\gamma_R ; d_1$ et de méthode $\gamma_R ; d_2$ qui sont fonction du type de pieu et du mode de sollicitation du pieu (compression ou traction) afin d'assurer que la portance calculée soit suffisamment sécuritaire et une meilleure dispersion des données utilisé dans la procédure.

Tableau 7 : Coefficients partiels de modèle et de méthode pour la méthode pressiométrique

	$\gamma_{R,d1}$ compression	$\gamma_{R,d1}$ traction	$\gamma_{R,d2}$ compression	$\gamma_{R,d2}$ traction
Pieux non ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10 et 15	1,15	1,4	1,1	1,1
Pieux ancrés dans la craie de classe 1 à 7 hors pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20	1,4	1,7	1,1	1,1
Pieux de catégorie 10, 15, 17, 18, 19 et 20	2,0	2,0	1,1	1,1

Dans la NF P 94 -262 de l'Eurocode 7, il est appliqué coefficients de partiels aux effort de pointe et effort de frottement latéral afin d'assurer des résultats plus sécuritaires.

2. Justifications aux états limites

Fascicule 62 Titre V

Les justifications requises consistent à vérifier que la charge axiale de calcul en tête d'un

élément reste compris entre deux limites notées Q_{\min} et Q_{\max} . Les valeurs de Q_{\min} et Q_{\max} sont définies en fonction de la combinaison d'actions considérées.

❖ ELU

	Q_{\min}	Q_{\max}
Combinaisons fondamentales	$-\frac{Q_{tu}}{1,40}$	$\frac{Q_u}{1,40}$
Combinaisons accidentelles	$-\frac{Q_{tu}}{1,30}$	$\frac{Q_u}{1,20}$

❖ ELS

	Q_{\min}	Q_{\max}
Combinaisons rares	$-\frac{Q_{tc}}{1,40}$	$\frac{Q_c}{1,10}$
Combinaisons quasi permanentes	0 (*)	$\frac{Q_c}{1,40}$

(*) Cette justification n'est normalement à apporter que dans le cas d'un groupe de pieux flottants. Un élément de fondation est qualifié de flottant lorsque, pour sa charge de fluage Q_c , l'effort résistant mobilisé par frottement latéral est supérieur à l'effort résistant mobilisé sous la pointe.

NF P94-262

Les vérifications des états limites ultimes (ELU) portent sur la portance (ou la résistance à la traction), la résistance structurale des éléments de fondation, la stabilité vis-à-vis des déplacements et la stabilité générale.

Les vérifications des états limites de service (ELS) portent sur les charges de fluage, les déplacements, le fonctionnement et la durabilité des éléments de fondation. L'ensemble des justifications de fondations profondes est à mener pour les états limites et les situations de projets suivants.

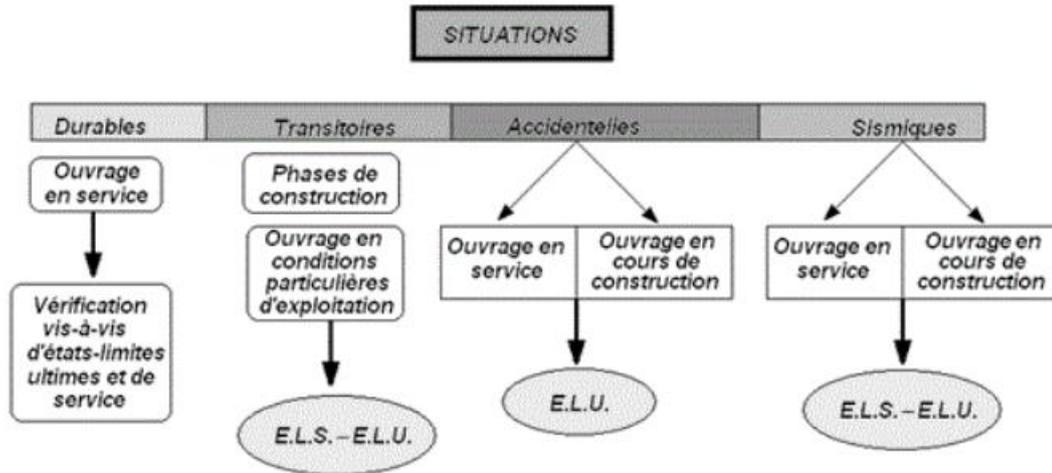


Figure 9 : Codification des vérifications dans les Eurocodes

Tableau 8 : Situations de calcul à vérifier aux états limites pour une fondation profonde

Situations de projet	États limites	Types d'État Limite
Situations durables - phase exploitation définitive (l'ouvrage est construit et supporte les charges d'exploitation définitives) - phase d'exploitation provisoire (l'ouvrage est construit, mais il supporte des charges d'exploitation provisoires, comme par exemple des charges de chantier de l'itinéraire)	ELS Caractéristiques	GEO STR
	ELS Quasi-permanents	GEO STR
	ELS Fréquents ⁽⁶⁾	STR
	ELU Fondamentaux	GEO
		STR
		UPL
ELU Stabilité générale	GEO	
Situations transitoires - phase de construction	ELS Caractéristiques	GEO STR
	ELU Fondamentaux	GEO
		STR
		UPL
		GEO
Situations accidentelles	ELU Accidentels	STR
		UPL

Tableau 9 : Valeurs des coefficients de sécurité aux différents états limites

	ELU Situations durables et transitoires	ELU Situations accidentelles
γ_t	1,1	1,0
γ_b	1,1	1,0
γ_s	1,1	1,0
$\gamma_{s,t}$	1,15	1,05
	ELS Combinaisons caractéristiques	ELS Combinaisons quasi-permanentes
γ_{cr}	0,9	1,1
$\gamma_{s,cr}$	1,1	1,5

3. Analyse

Les approches de détermination de la capacité portante et les justifications aux états limites, bien qu'ayant le même principe de base diffèrent énormément dans la procédure pour chacune des deux (02) normes.

En effet, la procédure dans la NF P 94-262 semble beaucoup plus contraignante que celle du Fascicule 62 Titre V cependant elle offre plus d'alternative dans la détermination de la capacité portante avec l'introduction de la procédure du pieu modèle et du modèle de terrain ainsi que dans la justification aux états limites à travers la mise en place des différentes situations de projets et des nouveaux types d'états limites (GEO, STR, UPL...).

Ces différentes alternatives peuvent permettre une meilleure adaptation du dimensionnement des fondations par rapport aux données disponibles et à la disposition des couches du terrain en place.

La procédure dans le Fascicule 62 Titre V quant à elle paraît assez simpliste et linéaire et beaucoup plus abordable.

De plus il est appliqué des coefficients partiels aux valeurs caractéristiques en plus des coefficients de sécurité globale appliqué pour chaque état limite correspondant afin d'obtenir les valeurs de calcul.

L'intégration de ces coefficients partiels a donné des valeurs des coefficients de sécurité globale qui sont assez proche de 1.

Cette correction, opérée au niveau des données du calcul, remplace l'application classique d'un coefficient de sécurité global unique sur les résultats des calculs.

Contrairement au Fascicule 62 Titre V qui applique un coefficient de sécurité global unique assez important, la NF P 94 – 262 de l'Eurocode 7 réduit la valeur des coefficients et applique des coefficients partiels (de modèle et de méthode) aux valeurs caractéristiques.

Ces coefficients partiels appliqués aux valeurs caractéristiques en plus du coefficient de sécurité global offre une garantie sécuritaire plus adapté pour la NF P 94 – 262.

Un récapitulatif des éléments de comparaisons est répertorié dans le tableau suivant :

Tableau 10 : Récapitulatif des comparaisons entre le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262

	Fascicule 62 Titre V	NF P 94 - 262
Domaine d'application	Fondations profondes des ouvrages Génie Civil	Fondations profondes au droit des bâtiments, des ponts, des tours, mâts et cheminées, des silos et des réservoirs
Type de pieu concernés	11	20
Classification des sols	5 classes de sol	6 classes de sol (Intégration de la classe des sols intermédiaires prenant en compte les sols au comportement complexes)
Classification des pieux	Aucune classification	8 classes et 20 catégories
Contrainte de pointe	$q = k_p P l e^*$ Calcul de $P l e^*$ pareil k_p fonction de la nature du sol et le mode de mise en œuvre	$q = k_p P l e^*$ Introduction de paramètres intermédiaires k_{pmax} et D_{ef} k_{pmax} (Classe du pieu ; Nature du sol) D_{ef} : (Profondeur d'ancrage) $k_p (k_{pmax} ; D_{ef})$
Contrainte de frottement latéral	Choix et lectures sur courbes en fonction de la Nature du sol et du type de pieu Lecture sur abaque, risque d'erreur	Introduction de α_{sol} et f_{sol} $\alpha_{pieu-sol}$: (Type de pieu ; Classe sol) f_{sol} : (Classe de sol ; Pl) Formules analytiques, suppression du risque de lecture sur abaques
Valeurs caractéristiques	$Q_u = Q_{pu} + Q_{su}$ $Q_c = (0,5 \text{ ou } 0,7) Q_{pu} + 0,7 Q_{su}$	02 procédures au choix : Pieu modèle et Modèle Terrain Application de coefficients partiels $\gamma_{R;d1}$ et $\gamma_{R;d2}$ sur les contraintes
Valeurs de calcul	Application d'un coefficient global de sécurité ELS RARE : 1,1 ELS QP : 1,4 ELU FOND : 1,4 ELU ACC : 1,2	Application d'un coefficient global de sécurité sur les valeurs caractéristiques ELS CARA : 0,9 ELS QP : 1,1 ELU D&T : 1,1 ELU ACC : 1

CONCLUSION PARTIELLE

Suite à cette comparaison sur la base des textes normatifs, il en ressort que la norme d'application aux fondations profondes NF P 94 - 262 de l'EC7 présente plus d'avantages techniques que le Fascicule 62 Titre V.

En effet le domaine d'application du Fascicule 62 Titre V est plus restreint et ne prend pas en compte les types de pieux récents et se retrouve limité pour un sol au comportement complexe, ce qui est susceptible de donner des résultats insuffisamment fiables dans ces situations.

La NF P 94-262 de l'EC7 permet une meilleure prise en compte du rapport pieu sol dans la détermination des paramètres de calcul et annule le risque d'erreurs de lectures sur abaque avec la mise en place de formules analytiques.

De plus elle offre plus d'alternatives de calcul de la capacité portante des pieux en fonction des données disponibles ce qui permettra de mieux adapter la méthode de calcul en fonction de la situation rencontrée contrairement au Fascicule 62 Titre V qui n'est pas ajustable.

En outre, l'application de coefficients partiels aux valeurs caractéristiques et de coefficient de sécurité moins important en lieu et place d'un coefficient de sécurité global unique important comme dans le Fascicule 62 Titre V permet d'obtenir une évaluation sécuritaire plus adaptée. En effet ces coefficients partiels de sécurité sont fonction de la nature du sol, du type de pieu et de son mode de sollicitation.

Ce chapitre a fait l'objet d'une étude comparative uniquement sur la base des textes normatifs. Elle sera approfondie sur la base d'un cas pratique dans les chapitres suivants après la mise au point du programme de calcul.

CHAPITRE IV : MISE AU POINT DU PROGRAMME DE DIMENSIONNEMENT

INTRODUCTION

L'utilisation d'outils de calcul dans la réalisation des études d'un projet est un facteur très important permettant aux entreprises non seulement de réduire la durée de réalisation des projets, mais aussi d'accroître leurs rentabilités. C'est pourquoi ces dernières s'orientent vers l'élaboration ou l'achat de logiciels capables de répondre à leurs attentes. Le but de ce chapitre est de proposer un logiciel qui servira d'aide au dimensionnement des pieux sous charges axiales.

I. PROPOSITION DU LOGICIEL

1. Objectif du logiciel

L'objectif principal de la conception du logiciel est de faciliter le dimensionnement des fondations profondes par le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262 de l'EC7 tout en permettant de disposer d'un outil rapide et efficace d'aide au dimensionnement des fondations profondes. Partant de cela, le logiciel permettra de

- Faire le dimensionnement des fondations profondes ;
- Calculer la capacité portante d'un pieu ainsi que tous les paramètres de calcul intermédiaires ;
- Faire des vérifications par rapport aux efforts en tête de pieux issu de la descente de charge et déterminer le nombre de pieux nécessaires pour reprendre ces efforts.

2. Choix du langage de programmation

Pour concevoir un logiciel, plusieurs langages de programmation sont disponibles. Quelquefois, il est difficile de choisir le meilleur d'entre eux. Cependant, le programmeur doit avoir à l'esprit que le choix du langage doit résider dans la maîtrise de ses caractéristiques, ses utilisations spécifiques, les multiples facettes et difficultés pouvant être rencontrées pour le manipuler. De ce fait, la plupart des grands développeurs utilisent la programmation orientée objet, en raison de ses avantages, notamment une meilleure compréhension des codes, une économie de mémoires de l'ordinateur, et une possibilité de réutilisation des codes pour le développement futur de l'application. Parmi les langages orientés objet, nous pouvons citer : le C, le C++, le

C# (CSharp) et le VBA (Visual Basic for Applications).

Pour la conception du logiciel, nous avons utilisé le langage VBA, car les objectifs qui lui ont été assignés lors de sa création sont les suivants :

- Être facile d'utilisation pour les débutants ;
- Autoriser l'ajout de fonctionnalités pour les experts (tout en gardant le langage simple pour les débutants) ;
- Être interactif ;
- Fournir des messages d'erreurs clairs et conviviaux ;
- Avoir un délai de réaction faible pour les petits programmes.

II. DESCRIPTION DU LANGAGE DE PROGRAMMATION

VBA (Visual Basic pour Applications) est un langage de programmation dédié principalement aux applications Microsoft Office. Il est basé sur le langage Visual Basic, mais ne peut s'exécuter que dans une application hôte Microsoft Office, et non de manière autonome.

C'est un outil extrêmement puissant qui vous permet de contrôler dans Excel de nombreuses méthodes que vous ne pouvez pas faire ou que vous ne voulez pas faire manuellement.

Il facilite l'écriture de programmes en mettant à notre disposition, sous forme facilement accessible, les classes d'objets les plus communes (boutons, listes, tableaux, cases, etc.)

1. Interface de Visual basic for Application

Visual Basic Editor (VBE) est l'environnement de développement intégré de VBA (Visual Basic for Application). On accède toujours à VBE à partir d'une application hôte en sélectionnant la séquence Outils/Macro/Visual Basic Editor (ou le raccourci Alt-F11). Dans cet environnement VBE, on retrouve :

- L'explorateur de projet : il permet de visualiser les différents projets et les différents éléments qui les composent (Objets, Modules, Modules de Classe, Feuille, ...) sur lesquels nous reviendrons ultérieurement et également d'accéder à ces éléments et au code qui leur est attaché.
- La fenêtre Propriétés : elle permet de visualiser et de modifier l'ensemble des propriétés des objets constituant le projet
- La fenêtre Code : elle permet d'éditer le code associé aux éléments du projet
- La fenêtre UserForm et la Boîte à Outils : elle permet de concevoir les feuilles

(Interfaces graphiques) à partir d'éléments de base (bouton, case à cocher, zone de liste modifiable, ...) disponible dans la boîte à Outils.

Ces différents éléments ne sont pas obligatoirement présents à l'écran simultanément.

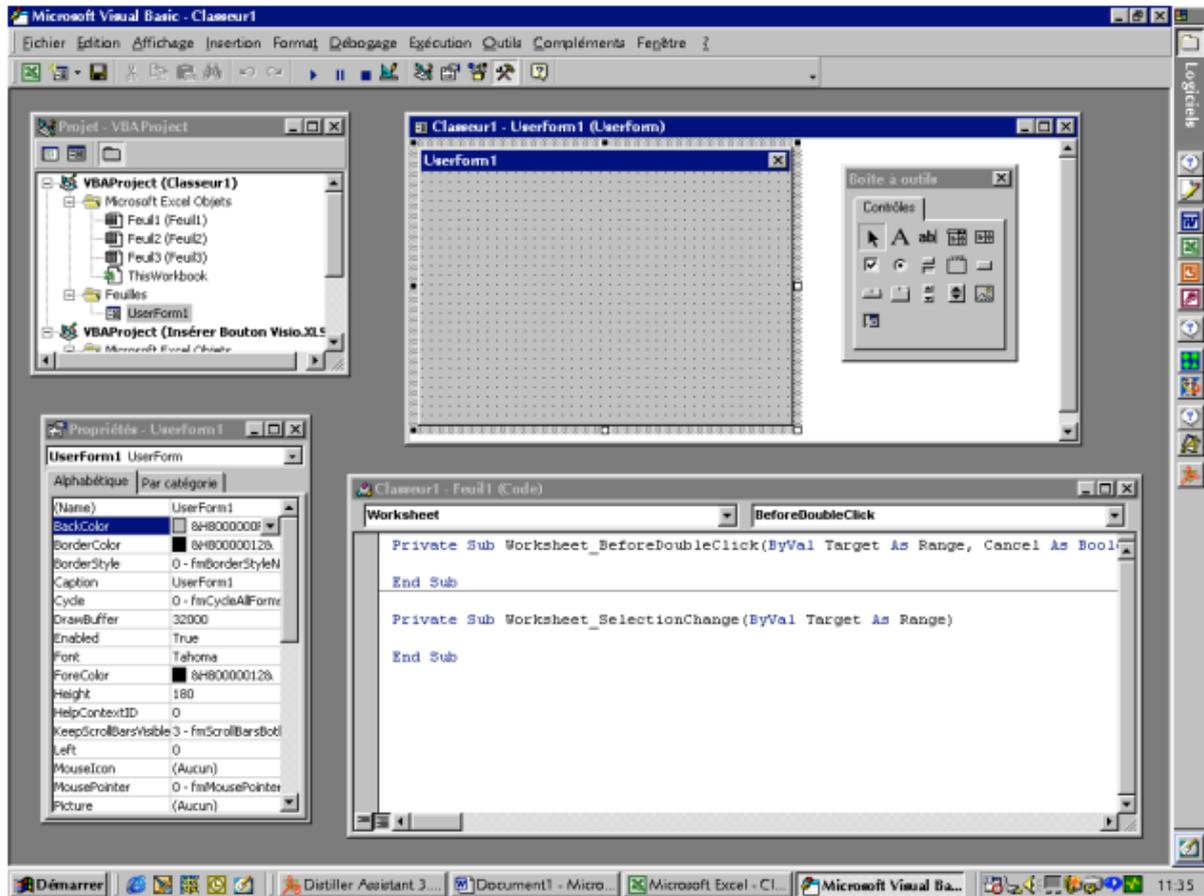


Figure 10 : Environnement de Visual Basic for Application

2. Ecriture des lignes de codes

Ces lignes se lisent et s'écrivent de haut en bas et de gauche à droite, comme un livre normal.

Aussi, une instruction écrite avant une autre sera en général exécutée avant celle-ci.

Chaque ligne de code doit être correcte syntaxiquement sinon le compilateur ne saura pas le traduire en langage exécutable.

Dans une fenêtre de l'application, il indique qu'il y a des erreurs et donne des précisions sur celles-ci avec éventuellement des pistes pour résoudre ces erreurs.

Pour faciliter la compréhension du code ou pour se rappeler un point précis, il est possible de mettre des commentaires dans son code.

Les commentaires sont ignorés par le compilateur et n'ont qu'une valeur informative pour le développeur.

Notre logiciel a généré plus de 5500 lignes.

```

Function Alpha_sol(Nature_sol As String, Categorie_pieu As String) As Variant
'Catégorie 1 - Foré simple
If Categorie_pieu = "1 - [FS] - Foré simple (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Argiles et Limons" Then
Alpha_sol = 1.1
End If
If Categorie_pieu = "1 - [FS] - Foré simple (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Sables et Graves" Then
Alpha_sol = 1
End If
If Categorie_pieu = "1 - [FS] - Foré simple (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Craies" Then
Alpha_sol = 1.8
End If
If Categorie_pieu = "1 - [FS] - Foré simple (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Marnes et Calcaire-marneux" Then
Alpha_sol = 1.5
End If
If Categorie_pieu = "1 - [FS] - Foré simple (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Roches" Then
Alpha_sol = 1.6
End If

'Catégorie 2 - Foré boue (pieux et barrettes)
If Categorie_pieu = "2 - [FB] - Foré boue (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Argiles et Limons" Then
Alpha_sol = 1.25
End If
If Categorie_pieu = "2 - [FB] - Foré boue (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Sables et Graves" Then
Alpha_sol = 1.4
End If
If Categorie_pieu = "2 - [FB] - Foré boue (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Craies" Then
Alpha_sol = 1.8
End If
If Categorie_pieu = "2 - [FB] - Foré boue (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Marnes et Calcaire-marneux" Then
Alpha_sol = 1.5
End If
If Categorie_pieu = "2 - [FB] - Foré boue (pieux et barrettes)" And Nature_sol = "Roches" Then
Alpha_sol = 1.6
End If

'Catégorie 3 - [FTP] - Foré tubé (virole perdue)
If Categorie_pieu = "3 - [FTP] - Foré tubé (virole perdue)" And Nature_sol = "Argiles et Limons" Then

```

Figure 11 : Exemple d'écriture de lignes de codes de VBA

III. FONCTIONNEMENT DU PROGRAMME

On définit une application, module ou encore logiciel comme étant un programme qui met en relation des données de départ pour produire de nouveaux éléments d'arrivée. La figure suivante représente le schéma de principe d'un module.

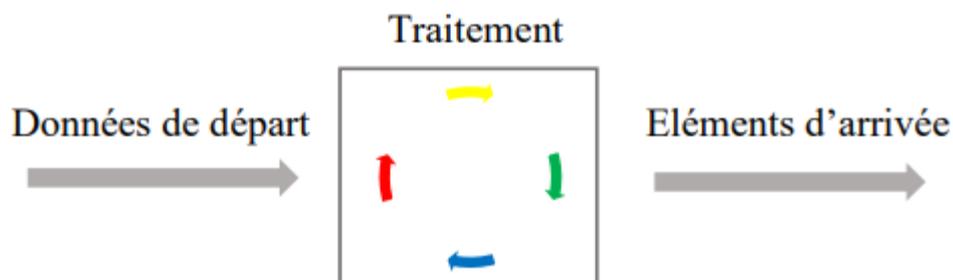


Figure 12 : Schéma de principe du logiciel

Le programme de calcul a été réalisé sur Visual Basic for Application de Excel pour une meilleure prise en main par l'utilisateur. Il a pour dénomination GeoPieu Fondations Profondes et a pour but le calcul des fondations profondes sous charges axiales de type béton armé.

Son interface de démarrage comme suit :

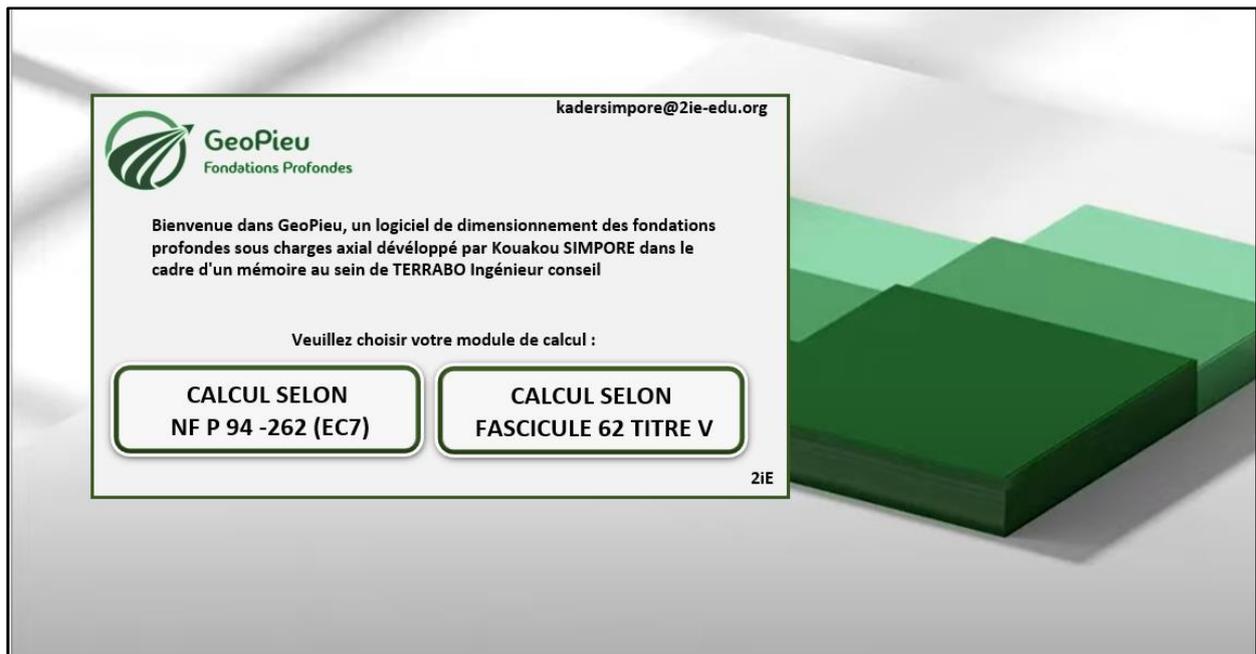


Figure 13 : Interface de démarrage

Cette interface de démarrage permet à l'utilisateur donne accès aux deux (02) différents modules de calcul

- L'EC 7 NF P 94 – 262
- Fascicule 62 Titre V

Après avoir sélectionné le module de calcul voulu, l'interface de démarrage donne accès au menu de navigation de l'outil de calcul.



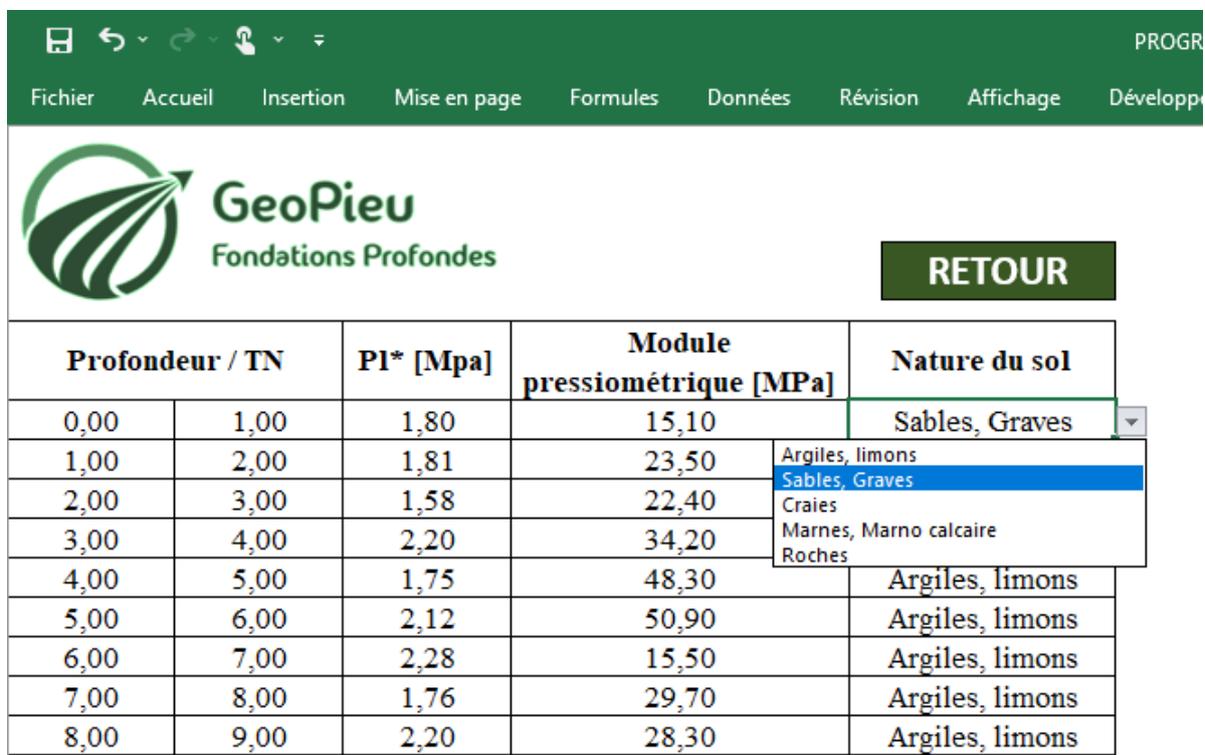
Figure 14 : Menu du programme GeoPieu Fondations Profondes

Le menu se compose de quatre (04) onglets :

- Sondage
- Saisie de données
- Résultats
- Fichier

❖ **Onglet Sondage**

L'onglet Sondage donne accès à une feuille de calcul où il est demandé à l'utilisateur d'entrer les résultats issus de l'essai pressiométrique à savoir l'épaisseur des différentes couches de terrain, les pressions limites nettes et les modules pressiométriques correspondant ainsi que la nature de ces couches.



The screenshot shows the GeoPieu software interface. At the top, there is a ribbon menu with options: Fichier, Accueil, Insertion, Mise en page, Formules, Données, Révision, Affichage, Développement. Below the menu is the GeoPieu logo and a 'RETOUR' button. The main area contains a table for entering soil layer data. The table has four columns: Profondeur / TN, PI* [Mpa], Module pressiométrique [MPa], and Nature du sol. The data is as follows:

Profondeur / TN	PI* [Mpa]	Module pressiométrique [MPa]	Nature du sol
0,00 1,00	1,80	15,10	Sables, Graves
1,00 2,00	1,81	23,50	Argiles, limons
2,00 3,00	1,58	22,40	Sables, Graves
3,00 4,00	2,20	34,20	Craies
4,00 5,00	1,75	48,30	Marnes, Marno calcaire
5,00 6,00	2,12	50,90	Roches
6,00 7,00	2,28	15,50	Argiles, limons
7,00 8,00	1,76	29,70	Argiles, limons
8,00 9,00	2,20	28,30	Argiles, limons

Figure 15 : Insertion des couches de terrain

Une fois ces données insérées, le programme génère automatiquement les profils pressiométriques sous échelle logarithmique.

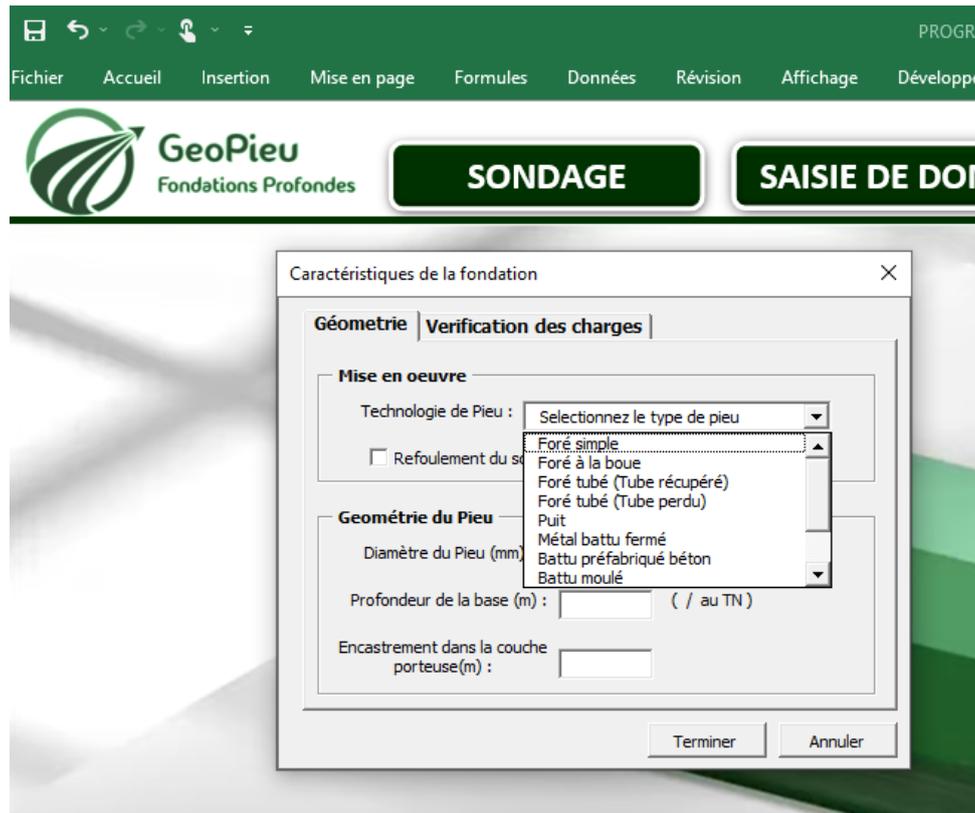


Figure 17 : Formulaire de saisie des caractéristiques du pieu

La seconde page du formulaire de saisie est réservée aux valeurs de vérification des charges. Les différentes valeurs des combinaisons de charges issues de la descente que les fondations sont censées reprendre et transmettre au sol.

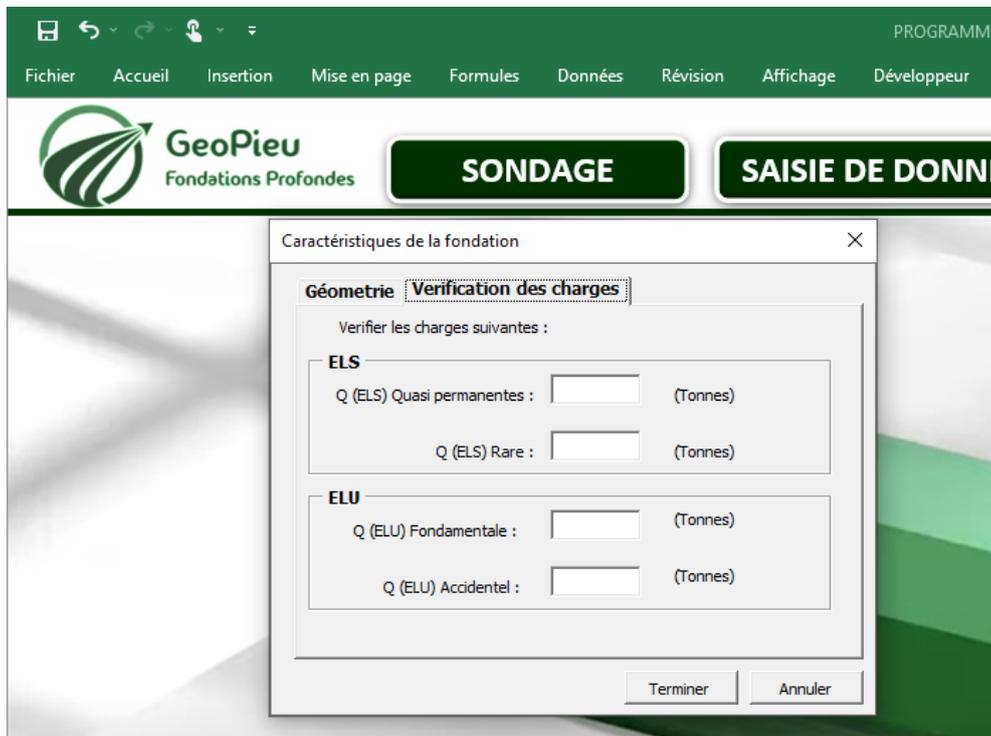


Figure 18 : Formulaire de saisie des efforts en tête de pieu

❖ Onglet Résultat

L'onglet « Résultats » génère une note de calcul présentant les résultats de calcul, les profils pressiométriques ainsi qu'un récapitulatif des données d'entrées.

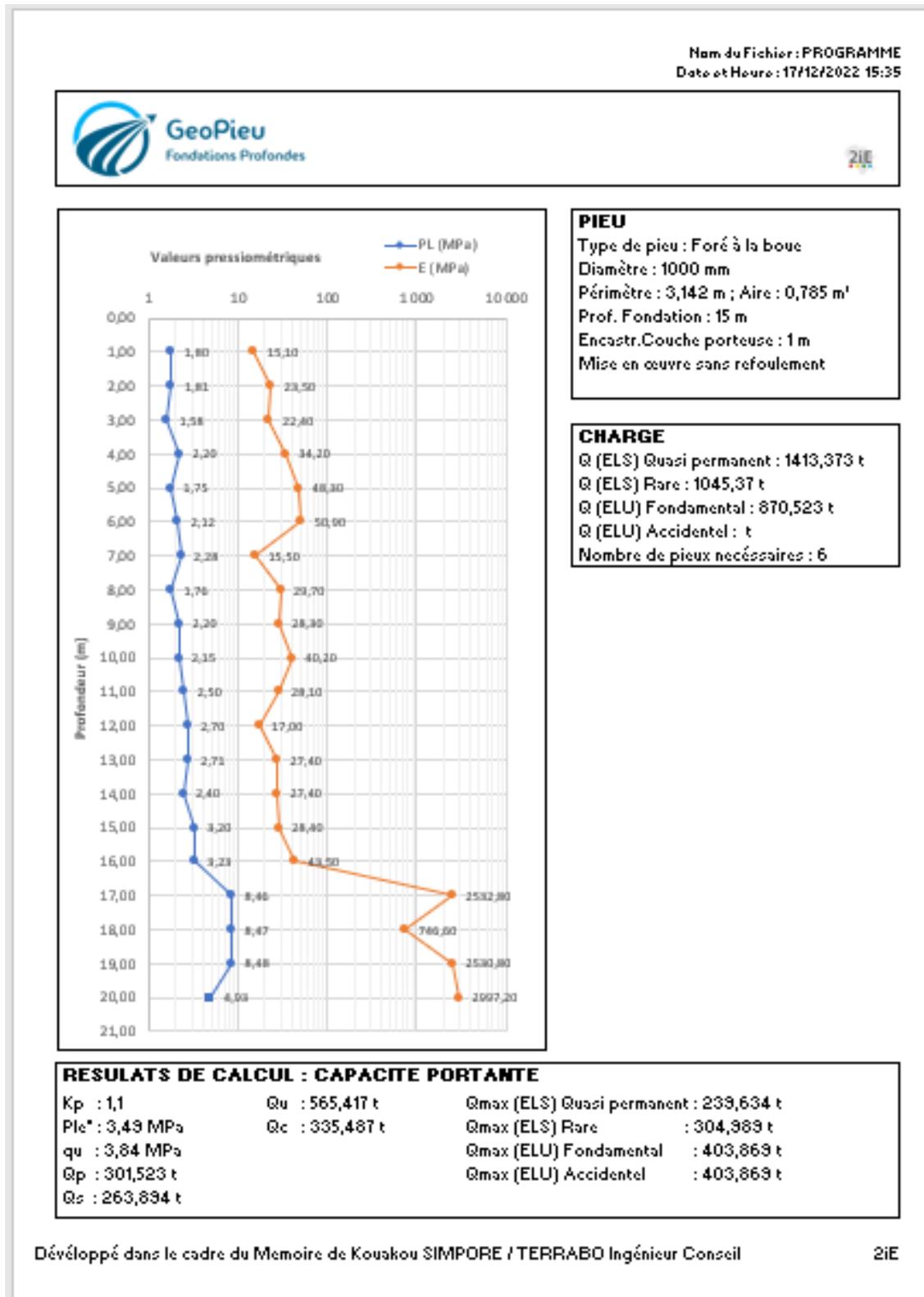


Figure 19 : Note de calcul de GeoPieu Fondations Profondes

Le cadre Pieu renvoie aux informations liées au pieu (type de pieu, diamètre, périmètre, aire, profondeur d'ancrage...).

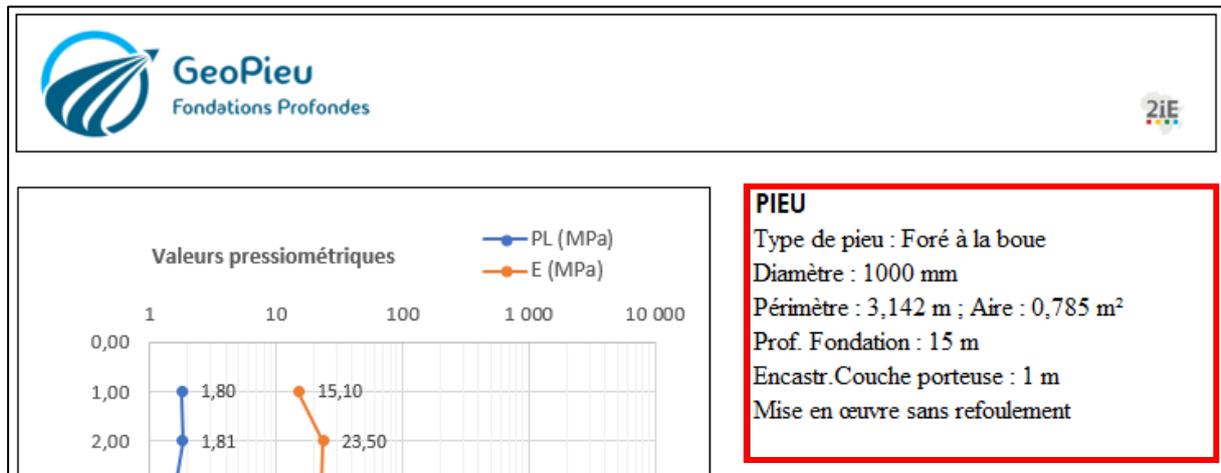


Figure 20 : Cadre référence des caractéristiques du pieu

Le cadre Charge rappelle les valeurs issues de la descente de charge qui correspondent aux valeurs de vérification pour le dimensionnement ainsi que le nombre de pieux nécessaires pour les reprendre correctement.

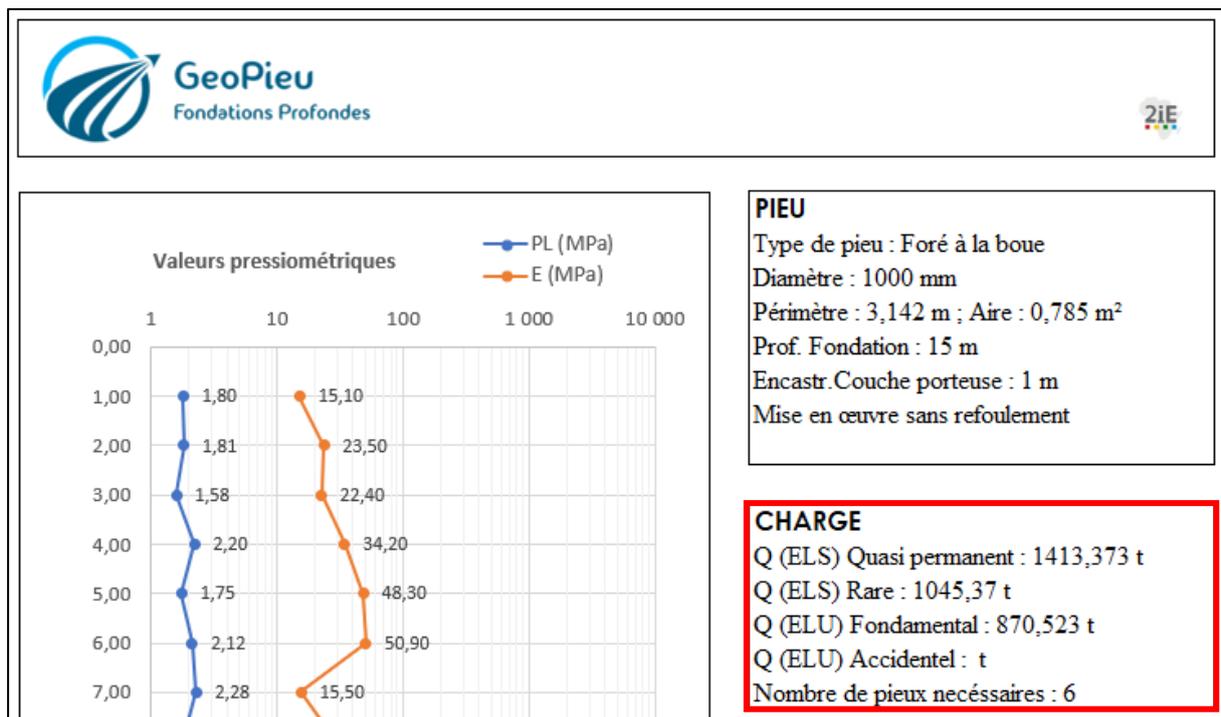


Figure 21 : Cadre référence aux efforts en tête de pieu

Le dernier cadre « Résultat de calcul » fournit les différentes valeurs des paramètres de dimensionnement ainsi que les valeurs de combinaisons aux états limites.

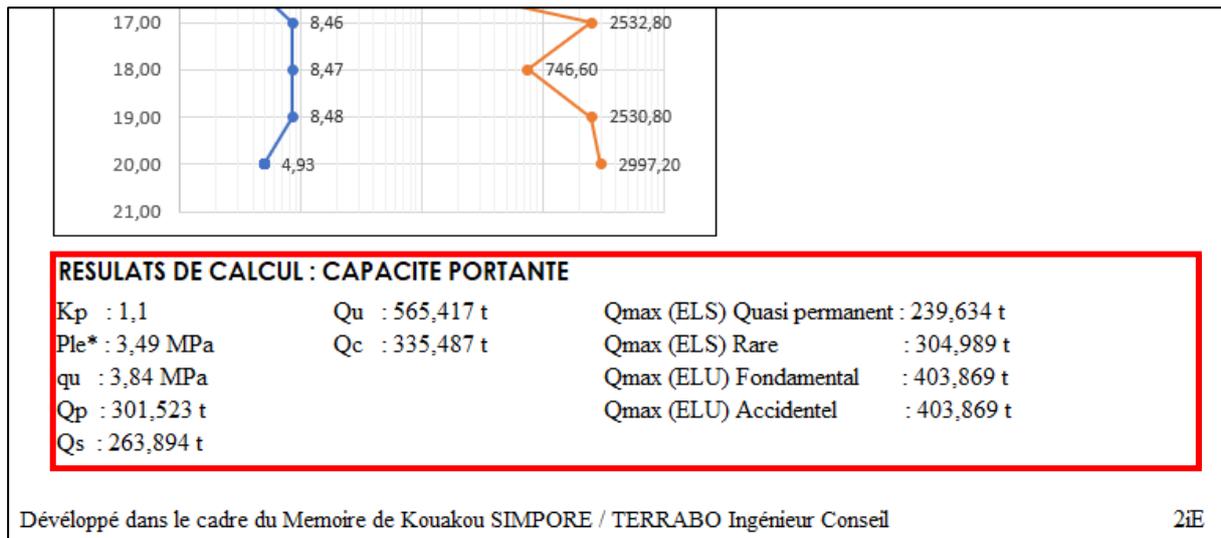


Figure 22 : Cadre référence aux résultats de calcul de la capacité portante

❖ Onglet Fichier

L'onglet fichier permet de sauvegarder le fichier ou d'ouvrir un ancien.

CONCLUSION PARTIELLE

Pour clore ce chapitre, nous pouvons retenir que VBA a été choisi pour la conception de notre programme à cause de sa simplicité d'utilisation. Ce langage nous a permis, de proposer un logiciel combinant à la fois le dimensionnement par le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262. Pour tester la fiabilité du logiciel, nous allons procéder à un test via une étude de cas, c'est l'un des objectifs du chapitre suivant.

CHAPITRE V : ETUDE D'UN CAS D'APPLICATION

INTRODUCTION

L'intérêt de cette partie est dans un premier temps la validation des résultats proposés par notre logiciel et dans un second temps de poursuivre l'étude comparative sur la base d'un cas pratique.

Pour ce faire nous allons procéder à une simulation sur un projet : Celui d'un ouvrage d'art sur un des itinéraires de la mission EB8 sur l'axe Dabakala Gansé.

Les résultats obtenus avec notre logiciel seront confrontés avec ceux obtenus d'un autre logiciel. Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement de fondations (Foxta, GEOFOND, GEO 5...), c'est GEOFOND qui a été utilisé pour les vérifications car il a été mis à notre disposition une version d'évaluation de quinze (15) jours.

I. PRESENTATION DU PROJET

1. Contexte et justification du projet

Dans le cadre de sa politique générale de développement du réseau routier national, l'Etat de Côte d'Ivoire a identifié un ensemble de routes prioritaires dont l'aménagement devrait permettre de :

- assurer une bonne structuration du réseau national et lui permettre de soutenir pleinement la croissance économique du pays ;
- maintenir le réseau dans un bon état de service afin de diminuer les coûts d'exploitation des véhicules, d'accroître la sécurité des usagers et de faciliter la circulation des personnes et des biens ;
- désenclaver les régions à fortes agropastorales, touristiques ou minières et contribuer ainsi à la lutte contre la pauvreté.

Mettant en œuvre le processus, l'Agence de Gestion des routes (AGEROUTE), en sa qualité de Maître d'Ouvrage Délégué agissant pour le compte de MEER, a recruté plusieurs Consultants qui ont pour charges de mener les investigations techniques, économiques, financières, sociales et environnementales permettant d'atteindre les objectifs de leurs missions et préparer les dossiers d'appel d'offres en vue de la sélection des entreprises pour l'exécution des travaux.

Les missions sont financées par les ressources de l'Etat de Côte d'Ivoire sur la ligne « fonds d'études ».

Le groupement TERRABO – Ingénieur Conseil / Groupe Art & Génie, recruté en qualité de Consultant, a été chargé de la réalisation de la mission EB 8.

La mission EB8 comprend quatre (4) itinéraires pour un linéaire global de 283 km. Toutefois, conformément aux dispositions prévues par les TDRs, notre cas d'application est relatif à l'itinéraire 4, à savoir, **Dabakala-Gansé-Yaga**, long de 130,235 kilomètres. Sur cet itinéraire se situe deux (02) ponts dont l'un fait l'objet de notre présente étude de cas.

2. Localisation du projet

L'itinéraire Dabakala-Gansé-Yaga, relie le département de Dabakala à celui de Nassian. La première section longue de 67,624 km débute au niveau de la route bitumée à Dabakala (X= 343999, Y= 925337) pour prendre fin au niveau du fleuve Comoé (X= 398662, Y= 952389). La seconde section longue de 62,611 km débute juste après le fleuve Comoé (X=398741, Y=952440) passe à Gansé, longe la réserve de la Comoé pour prendre fin à la sortie du village de Yaga. La construction et l'aménagement du pont est prévu pour relier les deux sections.

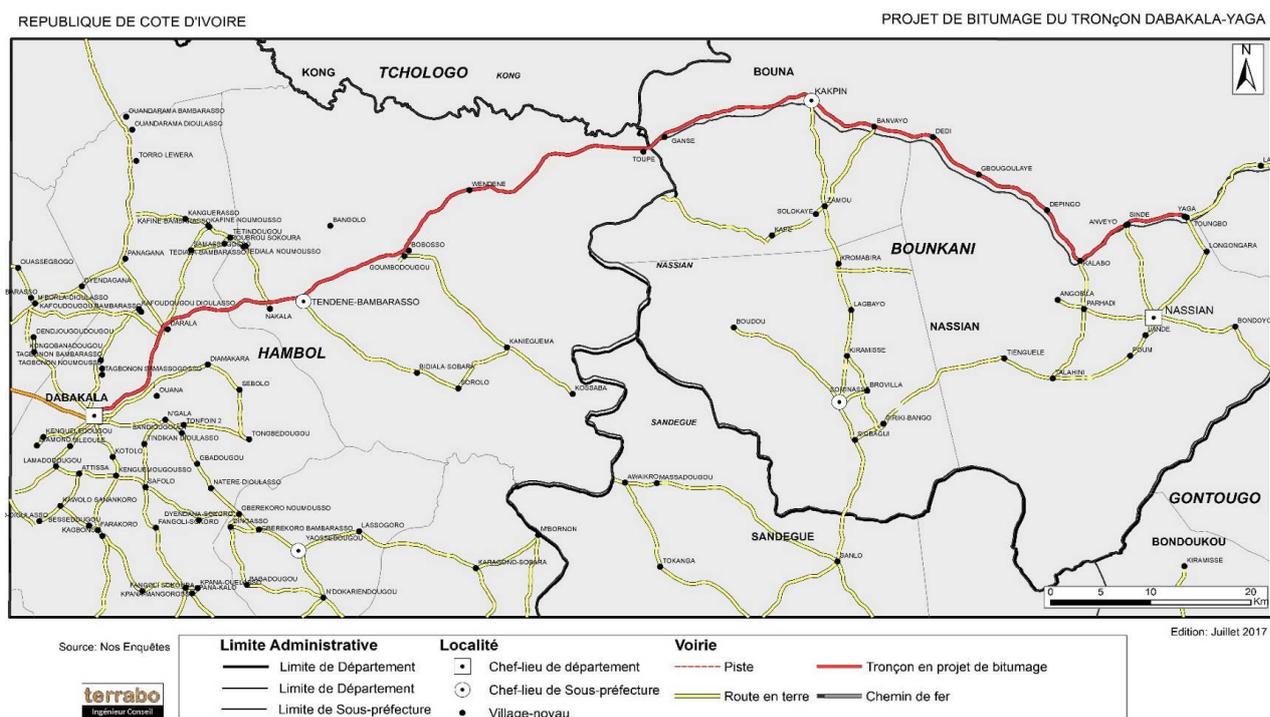


Figure 23 : Localisation du site

3. Description de l'ouvrage

L'ouvrage est un pont de quatre travées indépendantes de $37.55 + 2 \times 38.10 + 37.55$. L'ouvrage est constitué de quatre (04) poutres maîtresses préfabriquées en béton précontraint par travée reliées par entretoises d'about. Les poutres sont en forme de té en tenant compte du hourdis. Le hourdis sera coulé en place avec des prédalles participatives préfabriquées

Les superstructures du pont sont :

- Couche de roulement en béton bitumineux d'épaisseur 5 cm avec une densité de 2.35t/m³ ;
- Une chape d'étanchéité de 0.3 cm en asphalte de densité 2.1 t/m³ ;
- Les éléments du trottoir sont composés de corniche préfabriquée, de contre-corniches, d'un garde-corps de type S7, un béton de remplissage.

II. ETUDES TECHNIQUES REALISEES

1. Descente de charge

1.1. Hypothèses de calcul

a. Caractéristiques du béton

- Béton de structure B30
- Densité = 2.5
- Résistance caractéristique à la compression : Pour $j \geq 28$ jours $f_{c28} = 30$ MPa

b. Acier

Les caractéristiques des armatures sont les suivants :

Tableau 11 : Caractéristiques des armatures

ϕ (mm)	6	8	10	12	14	16	20	25	32
Section(cm²)	0.28	0.50	0.79	1.13	1.54	2.01	3.14	4.91	8.04
Poids (Kg/m)	0.222	0.395	0.616	0.888	1.208	1.579	2.466	3.854	6.313

- Type de fissuration : Fissuration préjudiciable pour tous les éléments du tablier
- Caractéristiques mécaniques
Aciers rond lisse : FeE215 \Rightarrow $f_e=215$ MPa
Aciers Hautes adhérences (HA) : FeE500 \Rightarrow $f_e=500$ MPa
- $E_g = 200\,000$ MPa (module de déformation longitudinale)
- Caractéristiques d'adhérence
Coefficient de fissuration η : $\eta=1.6$ pour les HA
Coefficient de scellement Ψ_s :
- 1.50 pour les HA
- 1.00 pour les ronds lisses

c. Terrain

Les données de base prises pour le calcul des poussées de terres sont les suivantes :

- Densité du sol : 20 KN/m³
- Angle de frottement interne Φ : 30°
- Coefficient de Poussée active K_a : 0.33
- Angle de transmission des charges : 30°
- Cohésion : Non prise en compte
- Module de réaction : 10000 kN/m³

1.2. Résultats de la descente de charges

Tableau 12 : Récapitulatif des combinaisons d'actions à l'ELU et l'ELS

	ELU		ELS	
	Combinaison fondamentale	Combinaison accidentelle	Combinaison rare	Combinaison quasi permanente
Appuis	Q_{max} (tonnes)	Q_{max} (tonnes)	Q_{max} (tonnes)	Q_{max} (tonnes)
Culée C0	2055,15	1350,48	1494,09	1147,35
Pile P1	2631,40	1673,24	1890,96	1347,12
Pile P2	2551,40	1617,2	1832,88	1294,80
Pile P3	2633,24	1677,64	1893,44	1355,08
Culée C4	2063,28	1452,75	1524,81	1196,97

2. Etude Géotechnique

C'est une mission d'ingénierie géotechnique conforme à la norme française NFP 94-500 révisée en 2013.

Elle doit permettre de déterminer la nature, la catégorie et les caractéristiques mécaniques des sols en place puis éventuellement la profondeur de la nappe phréatique afin de déterminer les possibilités de fondation de l'ouvrage.

Le programme de la reconnaissance géotechnique a consisté en l'exécution de cinq (05) sondages descendus à 30 m de profondeur avec essais pressiométriques tous les mètres (appuis C0, P1, P2, P3 et C4).

L'implantation des sondages et essais in-situ a été réalisé par le LBTP sur la base des coordonnées fournies (voir graphiques en annexe 4)

Tableau 13 : Coordonnées des points des sondages géotechniques

N°	Points de sondage	Coordonnées	
		X	Y
1	SP1 (C0)	398618,289	952389,022
2	SP2 (P1)	398649,958	952409,198
3	SP3 (P2)	398682,091	952429,670
4	SP4 (P3)	398714,224	952450,142
5	SP5 (C4)	398745,892	9523470,32

Les sondages réalisés indiquent sur le site du projet, de façon générale, la présence de la roche à partir de 7,00 m de profondeur par rapport au terrain en place.

Vu la nature des sols de couvertures (Argile, Sable argileux) et le type d'ouvrage envisagé (pont), le Laboratoire d'études a recommandé l'adoption d'un système de fondation profonde de type pieux.

Les différents profils pressiométriques des sondages sont disponibles en annexe 5.

III. DIMENSIONNEMENT SUIVANT LE FASCICULE 62 TITRE V

1. Hypothèses de calcul

On considère que les pieux ne reprennent que les efforts de compression et on néglige le frottement négatif.

Le choix du type de pieu dépend :

- De la nature des couches de terrain rencontrées
- Des surcharges et des efforts à reprendre
- De la technicité de l'entreprise
- De l'environnement du chantier
- Des habitudes locales
- Le cout

On retiendra des pieux forés à la boue pour notre ouvrage car c'est le seul type qui prend en compte toutes nos couches de sol rencontrées (Sables Graves, Argiles Limons et Roches).

2. Résultats

Les résultats du dimensionnement des pieux du pont sont consignés dans le tableau 11.

Ces résultats ont été comparés à ceux d'un autre logiciel, GEOFOND en version d'évaluation, dont les résultats ont été consignés dans le tableau 12.

Les différentes notes de calcul correspondantes sont disponibles en annexes 6 et 8.

Tableau 14 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon le Fascicule 62 par GeoPieu

Appui	Diamètre du pieu [mm]	Nombre de pieu	Profondeur d'ancrage [m]	Ple* [Mpa]	qu [Mpa]	Qp [MN]	Qs [MN]	Qu [MN]	Qc [MN]
Culée C0	1200	4	15	3,85	4,24	4,79	3,46	8,26	4,82
Pile P1	1200	5	11	5,01	5,52	6,24	2,62	8,85	4,95
Pile P2	1200	5	9	4,92	5,41	6,12	2,45	8,57	4,77
Pile P3	1200	5	8	4,86	5,34	6,04	2,14	8,18	4,52
Culée C4	1200	4	17	3,26	3,58	4,05	5,19	9,24	5,66

Tableau 15 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon le Fascicule 62 par GEOFOND

Appui	Diamètre du pieu [mm]	Nombre de pieu	Profondeur d'ancrage [m]	Ple* [Mpa]	qu [Mpa]	Qp [MN]	Qs [MN]	Qu [MN]	Qc [MN]
Culée C0	1200	4	15	3,85	4,24	4,79	3,51	8,31	4,86
Pile P1	1200	5	11	5,01	5,52	6,23	3,02	9,26	5,23
Pile P2	1200	5	9	4,92	5,41	6,12	2,65	8,78	4,92
Pile P3	1200	5	8	4,86	5,34	6,04	2,46	8,50	4,74
Culée C4	1200	4	17	3,26	3,58	4,05	5,33	9,38	5,76

3. Analyse

Pour les deux (02) logiciels il a été obtenu des pieux de diamètres 1200 mm dont quatre (04) pour chaque culée et cinq (05) pour chaque pile.

Les profondeurs d'ancrage varient pour chaque appui. En effet le dimensionnement des pieux se fait par méthode itérative, le calcul s'arrête lorsqu'on atteint une profondeur jugée suffisante pour reprendre les efforts.

Les différentes profondeurs d'ancrage obtenus correspondent donc aux profondeurs où les pieux possèdent une capacité portante suffisante pour reprendre les efforts sous chaque appui.

Le calcul des valeurs des pressions limites nettes équivalente P_{le}^* pour notre logiciel a donné respectivement :

- 3,85 MPa pour la culée C0 ;
- 5,01 MPa pour la pile P1 ;
- 4,92 MPa pour la pile P2 ;
- 4,86 MPa pour la pile P3 ;
- 3,26 MPa pour la culée C4 ;

Sur GEOFOND on a obtenu les résultats suivants pour les pressions limites nettes :

- 3,85 MPa pour la culée C0 ;
- 5,01 MPa pour la pile P1 ;
- 4,92 MPa pour la pile P2 ;
- 4,86 MPa pour la pile P3 ;
- 3,26 MPa pour la culée C4 ;

On remarque que les valeurs obtenues sont pareilles pour les deux logiciels. La pression limite nette équivalente P_{le}^* se détermine par calcul intégral. Cela traduit donc une bonne écriture des lignes de code du programme concernant le calcul de ce paramètre.

Une similarité des résultats a été également observée pour la contrainte limite de pointe q_u et pour l'effort de pointe Q_p .

Le calcul de l'effort de frottement latéral Q_s pour notre logiciel a donné respectivement :

- 3,46 MN pour la culée C0 ;
- 2,62 MN pour la pile P1 ;
- 2,45 MN pour la pile P2 ;
- 2,14 MN pour la pile P3 ;
- 5,19 MN pour la culée C4 ;

Sur GEOFOND on a obtenu les résultats suivants pour les efforts de frottement latéral :

- 3,51 MN pour la culée C0 ;

- 3,02 MN pour la pile P1 ;
- 2,65 MN pour la pile P2 ;
- 2,46 MN pour la pile P3 ;
- 5,33 MN pour la culée C4 ;

Des écarts de valeurs sont observés entre notre logiciel et GEOFOND quant aux valeurs de l'effort de frottement latéral. Cela s'explique par le mode de détermination de la contrainte de frottement latéral qui se fait par lecture sur courbes. Ce qui est sujet à des erreurs d'approximation des valeurs exactes.

Les écarts observés sont les suivants :

- 0,05 MN pour la culée C0 ;
- 0,40 MN pour la pile P1 ;
- 0,20 MN pour la pile P2 ;
- 0,32 MN pour la pile P3 ;
- 0,14 MN pour la culée C4 ;

Pour un écart moyen de $\pm 0,22$ MN.

L'irrégularité de ces écarts est due à la différence de nature entre les couches et des profondeurs d'ancrage des pieux.

Le calcul des valeurs de calcul de capacité portante **Qu** et **Qc** pour notre logiciel a donné respectivement :

- 8,26 et 4,82 MN pour la culée C0 ;
- 8,85 et 4,95 MN pour la pile P1 ;
- 8,57 et 4,77 MN pour la pile P2 ;
- 8,18 et 4,52 MN pour la pile P3 ;
- 9,24 et 5,66 MN pour la culée C4 ;

Sur GEOFOND on a obtenu les résultats suivants pour les efforts de frottement latéral :

- 8,31 et 4,86 MN pour la culée C0 ;
- 9,26 et 5,23 MN pour la pile P1 ;
- 8,78 et 4,92 MN pour la pile P2 ;
- 8,50 et 4,74 MN pour la pile P3 ;
- 9,38 et 5,76 MN pour la culée C4 ;

On observe également des différences pour les valeurs de calcul de portance **Qu** et **Qc** avec un écart moyen de $\pm 0,19$ MN.

En effet ces valeurs sont obtenues par combinaisons des valeurs des effort de pointe et effort de frottement latéral.

Les écarts précédemment observés pour l'effort de frottement latéral se répercutent sur les valeurs de calcul de portance. Ce qui explique ces différences.

IV. DIMENSIONNEMENT SUIVANT L'EUROCODE 7 NF P 94-262

1. Hypothèses de calcul

On considère que les pieux ne reprennent que les efforts de compression et on néglige le frottement négatif.

On retiendra des pieux forés à la boue pour notre ouvrage.

2. Résultats

Les résultats du dimensionnement des pieux du pont sont consignés dans le tableau 13.

Ces résultats ont été comparés à ceux d'un autre logiciel, GEOFOND en version d'évaluation, dont les résultats ont été consignés dans le tableau 14.

Les différentes notes de calcul correspondantes sont disponibles en annexes 7 et 9.

Tableau 16 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon la NF P 94-262 par GeoPieu

Appui	Diamètre du pieu [mm]	Nombre de pieu	Profondeur d'ancrage [m]	kp	kpmax	Def	Ple* [Mpa]	qb,k [Mpa]	Rb [MN]	Rs [MN]	Rc,k [MN]	Rc,cr,k [MN]
Culée C0	1200	3	15	1,45	1,45	7,05	3,85	4,42	5,00	3,21	8,21	4,74
Pile P1	1200	4	11	1,4	1,45	5,3	5,01	5,54	6,29	2,83	9,12	5,12
Pile P2	1200	4	9	1,37	1,45	4,9	4,92	5,32	6,12	2,14	8,26	4,56
Pile P3	1200	5	8	1,28	1,45	3,79	4,86	6,24	5,61	1,90	7,51	4,14
Culée C4	1200	4	17	1,45	1,45	9,07	3,26	3,73	4,22	4,27	8,49	5,10

Tableau 17 : Récapitulatif de dimensionnement des fondations de l'ouvrage selon la NF P 94 -262 par GEOFOND

Appui	Diamètre du pieu [mm]	Nombre de pieu	Profondeur d'ancrage [m]	kp	kpmax	Def	Ple* [Mpa]	qb,k [Mpa]	Rb,k [MN]	Rs,k [MN]	Rc,k [MN]	Rc,cr,k [MN]
Culée C0	1200	3	15	1,45	1,45	7,05	3,85	4,42	5,00	3,21	8,21	4,74
Pile P1	1200	4	11	1,4	1,45	5,3	5,01	5,54	6,29	2,83	9,12	5,12
Pile P2	1200	4	9	1,37	1,45	4,9	4,92	5,32	6,12	2,14	8,26	4,56
Pile P3	1200	5	8	1,28	1,45	3,79	4,86	6,24	5,61	1,90	7,51	4,14
Culée C4	1200	3	17	1,45	1,45	9,07	3,26	3,73	4,22	4,27	8,49	5,10

3. Analyse

Pour les deux (02) logiciels il a été obtenu des pieux de diamètres 1200 mm dont trois (03) pour chaque culée et quatre (04) pour chaque pile sauf pour la Pile P3 dont les fondations ont besoin de cinq (05) pieux pour reprendre correctement les efforts.

Le calcul des valeurs de calcul de capacité portante **Rc,k** et **Rc,cr,k** pour notre logiciel a donné respectivement :

- 8,21 et 4,74 MN pour la culée C0 ;
- 9,12 et 5,12 MN pour la pile P1 ;
- 8,26 et 4,56 MN pour la pile P2 ;
- 7,51 et 4,14 MN pour la pile P3 ;
- 8,49 et 5,10 MN pour la culée C4 ;

Sur GEOFOND on a obtenu les résultats suivants pour les efforts de frottement latéral :

- 8,21 et 4,74 MN pour la culée C0 ;
- 9,12 et 5,12 MN pour la pile P1 ;
- 8,26 et 4,56 MN pour la pile P2 ;
- 7,51 et 4,14 MN pour la pile P3 ;
- 8,49 et 5,10 MN pour la culée C4 ;

On remarque que les valeurs obtenues sont pareilles pour les deux logiciels. En effet les valeurs caractéristiques de calcul sont obtenues par combinaisons des valeurs des effort de pointe **Rb,k**

et effort de frottement latéral $R_{s,k}$.

Ces valeurs résultent des autres paramètres mentionnés dans le tableau, les similarités impliquent donc celui des paramètres intermédiaires. Ainsi nous observons les mêmes résultats pour tous les autres paramètres de calcul à savoir :

- L'encastrement effectif Def
- Le facteur de portance kp
- La pression limite nette Ple^*
- La contrainte d'effort de pointe $q_{b,k}$
- L'effort de pointe $R_{b,k}$
- L'effort de frottement latéral $R_{s,k}$

L'exactitude des résultats entre les deux logiciels atteste de la fiabilité de notre logiciel et de la bonne écriture des différentes lignes de codes du programme.

La conformité des résultats est également que le dimensionnement selon la NF P 94-262 est purement analytique ce qui annihile le risque d'approximation des valeurs lors des lectures sur abaques.

CONCLUSION PARTIELLE

Pour une comparaison plus parlante, les profondeurs d'ancrage et le diamètre des pieux trouvés dans le cas du Fascicule 62 titre V ont été conservés et il a été déterminé le nombre de pieux nécessaires pour reprendre les efforts par la NF P 94-262. Les résultats sont les suivants :

Tableau 18 : Résultats de calcul suivant les deux (02) normes

Appui	Diamètre du pieu [mm]	Profondeur d'ancrage [m]	Fascicule 62 Titre V		NF P 94-262	
			Nbre de pieu	Charge par pieu [t]	Nbre de pieu	Charge par pieu [t]
Culée C0	1200	15	4	329,56	3	431,77
Pile P1	1200	11	5	306,80	4	466,09
Pile P2	1200	9	5	341,37	4	414,20
Pile P3	1200	8	5	322,97	5	375,99
Culée C4	1200	17	4	404,51	3	463,57

On remarque que le nombre de pieux nécessaires obtenus est moindre par rapport à celui du Fascicule 62, ce qui corrobore les analyses sur la base des textes normatifs fait dans le Chapitre III.

Bien que le principe de calcul soit resté fidèle au Fascicule 62 Titre V, l'EC7 NF P 94-262 fournit de meilleurs résultats pour la capacité portante des pieux et permet d'utiliser moins de matériaux.

L'Eurocode 7 NF P 94-262 présente donc au vu de notre étude un meilleur rapport technico-économique par rapport au Fascicule 62 Titre V.

Le Fascicule 62 titre V reste tout de même utilisable et fiable pour des ouvrages comme celui qui a fait l'objet de l'étude de cas mais pour des ouvrages de plus grandes envergures où les efforts et profondeurs d'ancrage sont assez importants nous recommandons la NF P 94 262 de l'Eurocode 7 pour un dimensionnement plus optimal.

CONCLUSION GENERALE

La présente étude avait pour objectif principal de réaliser une étude comparative entre le Fascicule 62 titre V et la NF P 94-262 de l'Eurocode 7 et d'élaborer un logiciel de dimensionnement des pieux suivant ces normes par la méthode pressiométrique.

Pour l'étude comparative il a été question de faire une revue de littérature afin de mieux cerner les différentes notions nécessaires et appréhender les différents contours de l'étude. Cela a permis de dégager plus efficacement les critères de performances sur lesquels se sont basés l'étude comparative, à savoir :

- La limitation de l'utilisation des données empiriques
- La prise en compte l'effet du rapport pieu-sol,
- L'actualité des technologies de pieu
- L'approche des propriétés des différentes couches de sol rencontrés.

Il en est ressorti que la NF P 94 – 262 est meilleure sur le plan technique et présente plus d'avantages car elle possède plus de paramètres fonction du rapport sol-pieu, un champ d'application plus vaste qui prend en compte plus de types de pieux et le calcul de tous les paramètres se fait de manière analytique réduisant ainsi le risque d'approximation de lecture sur courbe présent dans le Fascicule 62 Titre V.

Cette étude comparative a ensuite été appuyé par un cas pratique sur un pont dont les résultats sont les suivants :

❖ Fascicule 62 Titre V

- Fondations profondes sur pieux forés à la boue ;
- 04 pieux de 15 m de longueur et de diamètre 1200 mm pouvant supporter chacun jusqu'à 329,56 tonnes pour la culée C0 ;
- 05 pieux de 11m de longueur et de diamètre 1200mm pouvant supporter chacun jusqu'à 306,80 tonnes pour la pile P1 ;
- 05 pieux de 9 m de longueur et de diamètre 1200 mm pouvant supporter chacun jusqu'à 341,38 tonnes pour la pile P2 ;
- 05 pieux de 8 m de longueur et de diamètre 1200mm pouvant supporter chacun jusqu'à 322,97 tonnes pour la pile P3 ;
- 04 pieux de 17m de longueur et de diamètre 1200 mm pouvant supporter chacun jusqu'à 404,51 tonnes pour la culée C4.

❖ **NF P 94 -262**

- Fondations profondes sur pieux forés à la boue ;
- 03 pieux de 15 m de longueur et de diamètre 1200 mm pouvant supporter chacun jusqu'à 431,77 tonnes pour la culée C0 ;
- 04 pieux de 11m de longueur et de diamètre 1200mm pouvant supporter chacun jusqu'à 466,09 tonnes pour la pile P1 ;
- 04 pieux de 9 m de longueur et de diamètre 1200 mm pouvant supporter chacun jusqu'à 414,203 tonnes pour la pile P2 ;
- 05 pieux de 8 m de longueur et de diamètre 1200mm pouvant supporter chacun jusqu'à 375,99 tonnes pour la pile P3 ;
- 04 pieux de 17m de longueur et de diamètre 1200 mm pouvant supporter chacun jusqu'à 463,57 tonnes pour la culée C4.

Le dimensionnement par la NF P 94 -262 a donné des valeurs de capacité portante plus élevées que celle du Fascicule 62 Titre V et a par conséquent fournit moins de pieux pour reprendre les efforts. Ce qui implique ainsi plus d'économie de matériaux.

On en conclut que la NF P 94 -262 présente un meilleur rapport technico-économique par rapport au Fascicule 62 Titre V.

Pour l'élaboration du logiciel de dimensionnement, il a été choisi le langage VBA comme langage de programmation en raison de sa facilité d'utilisation pour les débutants. Il a fallu par la suite écrire les différentes lignes du code de programmation et créer une interface pour le logiciel.

Le logiciel a été ensuite mis à l'épreuve via une étude de cas et les résultats ont été comparé avec ceux de GEOFOND.

Les deux (02) logiciels ont fourni des résultats conformes sauf pour le Fascicule 62 Titre V où les valeurs de l'effort de frottement latéral présentaient des écarts de 0,22 MN de moyenne. Différences dues à l'approximation des lectures sur les courbes de détermination de la contrainte de frottement latéral.

Au terme de ce travail, nous pouvons affirmer que les objectifs ont été atteint. L'étude comparative a abouti à un meilleur rapport technico économique pour la NF P 94-262 et il a été mis à la disposition de l'entreprise un logiciel de dimensionnement des pieux fiable mais aussi très malléable. Il pourra être mis à jour afin d'intégrer l'aspect structurel, le tassement ou encore le DTU 13.2 pour les bâtiments à usage privés.

LIMITES DE L'ETUDE

Cette étude qui consiste à faire la comparaison des méthodes de dimensionnement de fondations profondes en Côte d'Ivoire et à élaborer un logiciel de dimensionnement se limite à identifier les différences, similitudes et éventuelles limites des approches de calcul selon les normes.

Ensuite à proposer la meilleure ou préciser le cadre dans lequel il serait adéquat d'en utiliser une par rapport à l'autre.

L'étude s'est limitée à la méthode pressiométrique aux ouvrages génie civil et ne concerne que le Fascicule 62 Titre V et la NF P 94-262 de l'EC7.

Elle se limite aux pieux en béton armé sous charge axial.

Les résultats de l'étude de cas ne concernent que les pieux forés à la boue. Il faudrait davantage de cas pratique prenant en compte les autres types de pieux et chaque type de sol pour pouvoir faire une conclusion globale.

Cependant, il est espéré que cette étude constituera une bonne base pour les recherches à venir sur le dimensionnement des fondations profondes en Côte d'Ivoire.

PERSPECTIVE DE RECHERCHE

L'analyse des différentes approches de dimensionnement des fondations profondes nous permet de nous prononcer quant à la proposition d'une méthode de dimensionnement de fondations profondes que l'on pourrait utiliser en Côte d'Ivoire. En effet, en tenant donc compte des différents critères de performances d'une norme de dimensionnement de pieux à savoir : la prise en compte des paramètres influençant le plus le comportement des fondations, la limitation des données empiriques, la compatibilité avec les nouveaux types de pieu et une meilleure appréciation du comportement des sols sur les fondations.

Il en ressort un avantage sur le plan technique pour la NF P 94-262 de l'EC7 et l'étude de cas à montrer un avantage économique par l'utilisation de moins de matériau.

Le Programme de calcul ne prend en compte que l'aspect géotechnique et se limite à la détermination de la capacité portante et des différentes valeurs de combinaisons aux états limites.

Il pourrait être amélioré en y intégrant le dimensionnement structural afin de déterminer les sections d'aciers et les vérifications correspondantes. Un module pour le DTU 13.2 pourrait être également ajouté pour les bâtiments à usages privés.

Chaque pays de l'UE applique l'EC7 au travers d'une norme d'application nationale. La NF P 94-262 est la norme d'application nationale en France pour les fondations profondes. Pour une meilleure utilisation de l'EC7, il serait plus judicieux de créer une norme d'application nationale pour la Côte d'Ivoire à l'instar des pays de l'UE pour des résultats encore meilleurs.

Une mise à jour du Fascicule 62 Titre V est aussi envisageable afin d'intégrer les nouveaux types de pieux et une amélioration de la méthode de détermination du frottement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Eurocode 7 – *Application aux fondations profondes NF P94-262*, Cerema
- [2] 1993 Fascicule 62, Titre V, « *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages de génie civil* »
- [3] NF P94-262 (juillet 2012) : *Justification des ouvrages géotechniques - Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes*
- [4] Roger FRANK, Fahd CUIRA, Sébastien BURLON (10 déc. 2019), *Doc. 248 V3, Fondations Profondes*
- [5] Sébastien Burlon, Clément Desodt, Julien Habert, Phillippe Reiffsteck, (2017) *Calcul des ouvrages géotechniques selon l'Eurocode 7*– Dunod, Paris.
- [6] C. Plumelle *C.N.A.M-Géotechnique B1/B6 – 2004-2005 Chapitre XV/Pieux*
- [7] *Conception et Calcul des Structures de Bâtiment_ Tome 2*. ENPC Thonier
- [8] A. LEONARDS – *Les fondations* – Dunod, Paris, 1968. G. PHILIPONNAT et B. HUBERT
- [9] *Fondations et ouvrages en terre* – Eyrolles, Paris, 1998.
- [10] Dominique Maniez, *Formation À Vba*, Dunod, Paris, 2007
- [11] Greg Perry (2009) *Visual Basic® 6* Pearson 47 bis, rue des Vinaigriers 75010 PARIS
- [12] Premium Consultants, SARL Unipersonnelle Juin, 2010 *Excel 2010 Fonctions Et Formules Micro Application* 20-22, rue des Petits-Hôtels 75010 PARIS
- [13] Hervé Hocquard Master 1 IREF -Université de Bordeaux Programmation VBA

WEBOGRAPHIE

- (1) http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/cours_fondations-profondes1_procedes-generaux-de-construction.pdf
- (2) http://geo.univ-batna2.dz/sites/default/files/geo/files/reglesparasismique_eurocodes7.pdf
- (3) <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/eurocode-7-application-aux-fondations-profondes-nf-p94-262>
- (4) <https://www.excel-pratique.com/fr/vba>
- (5) <https://www.cours-gratuit.com/cours-vba>

ANNEXES

Sommaire des annexes

Annexe 1 : Classes et catégories de pieu NF P 94 - 262

Annexe 2 : Tableau de détermination de alpha pieu sol

Annexe 3 : les valeurs maximales prescrites pour $q_{s \max}$

Annexe 4 : Implantation des sondages

Annexe 5 : Profils pressiométriques

Annexe 6 : Note de calcul GeoPieu (Fascicule 62)

Annexe 7 : Note de calcul GeoPieu (NF P 94-262)

Annexe 8 : Note de calcul GEOFOND (Fascicule 62)

Annexe 9 : Note de calcul GEOFOND (NF P 94-262)

Annexe 1 : Catégorie de pieu de la NF P 94-262

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	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 récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	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	
5	13	Battu acier ouvert	BAO	NF EN 12699
6	14	Profilé H battu	HB	NF EN 12699
	15	Profilé H battu injecté	HBi	
7	16	Palplanches battues	PP	NF EN 12699
1 bis	17	Micropieu type I	M1	NF EN 1536/14199/12699
	18	Micropieu type II	M2	
8	19	Pieu ou micropieu injecté mode IGU (type III)	PIGU, MIGU	
	20	Pieu ou micropieu injecté mode IRS (type IV)	PIRS, MIRS	

Annexe 2 : Tableau de détermination de $\alpha_{\text{pieu-sol}}$

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Angle % CaCO ₃ < 30% Limon Sols Intermédiaires	Sols Intermédiaires Sable Gravier	Grès	Marne et Calcaire-Mameux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS ##	Foré simple (pieux et barrettes)	1,1	1	1,8	1,5	1,6
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	1,25	1,4	1,8	1,5	1,6
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	0,7	0,6	0,5	0,9	—
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	1,25	1,4	1,7	1,4	—
5	FSR, FBR, PU ##	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	1,3	—	—	—	—
6	FTC, FTCD (c)	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	1,5	1,8	2,1	1,6	1,6
7	VM	Vissé moulé	1,9	2,1	1,7	1,7	—
8	VT	Vissé tubé	0,6	0,6	1	0,7	—
9	BPF**, BPR**	Battu béton préfabriqué ou précontraint	1,1	1,4	1	0,9	—
10	BE**	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	2	2,1	1,9	1,6	—
11	BM**	Battu moulé	1,2	1,4	2,1	1	—
12	BAF**	Battu acier fermé	0,8	1,2	0,4	0,9	—
13	BAQ** #	Battu acier ouvert	1,2	0,7	0,5	1	1
14	HB** #	H battu	1,1	1	0,4	1	0,9
15	HBi**	H battu injecté IGU ou IRS	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
16	PP** #	Palplanches battues	0,9	0,8	0,4	1,2	1,2
17	M1	Micropieu type I	—	—	—	—	—
18	M2	Micropieu type II	—	—	—	—	—
19	PIGU, MIGU	Pieu ou micropieu injecté (type III)	2,7	2,9	2,4	2,4	2,4
20	PIRS, MIRS	Pieu ou micropieu injecté (type IV)	3,4	3,8	3,1	3,1	3,1

Annexe 3 : Implantation des profils pressiométriques

Y: 952300 PK67+850.0
A=173.6
Y: 952450

C4

X : 398745.892
Y : 952470.318

X : 398714.224
Y : 952450.142

P3 37.55

Fleuve comoé

Fleuve comoé

P2 38.10

Fleuve comoé

Fleuve comoé

P7 37.55

X : 398649.958
Y : 952409.198

X : 398618.289
Y : 952389.022

37.55

C0

1.36% Z=185.052
PK67+700.0

1.5% Z=184.894

1.5% Z=184.82

151.30

X: 398700

X: 398650

X: 398600

X: 398750

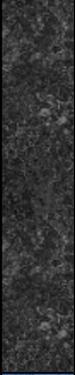
X: 398700

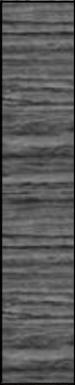
X: 398650

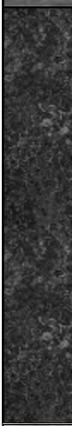
FLEUVE COMOÉ

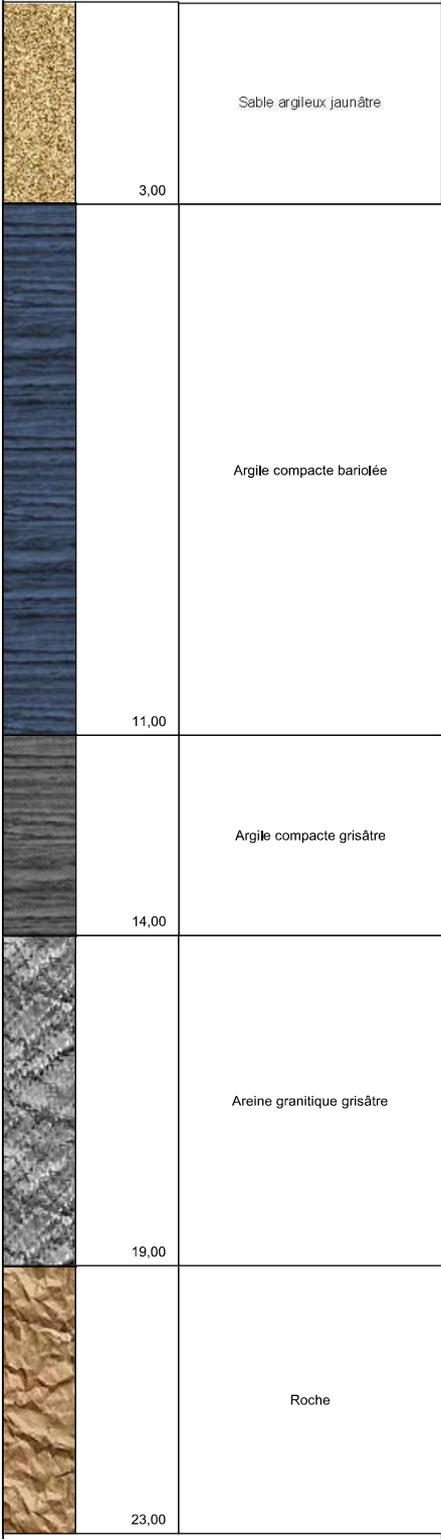
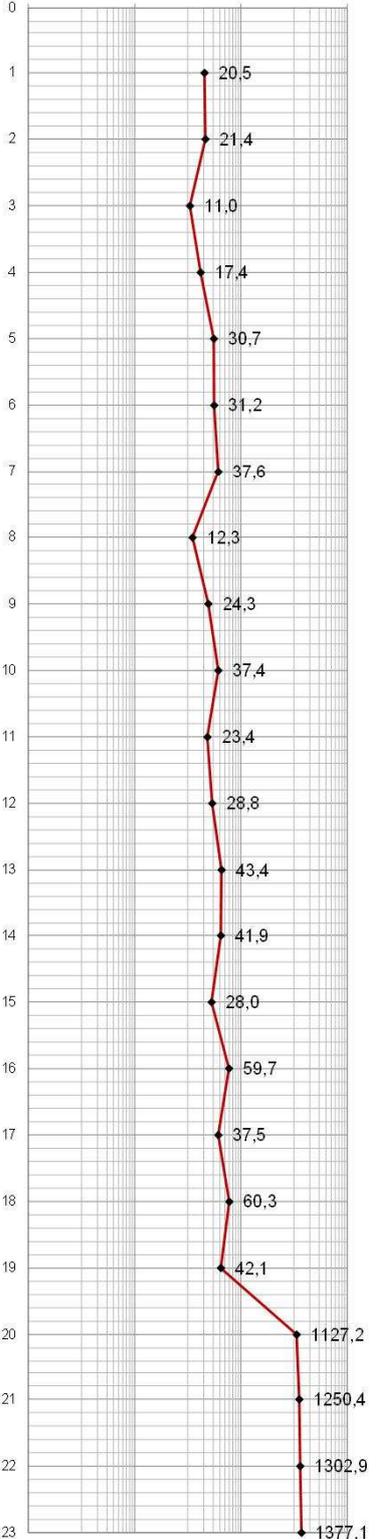
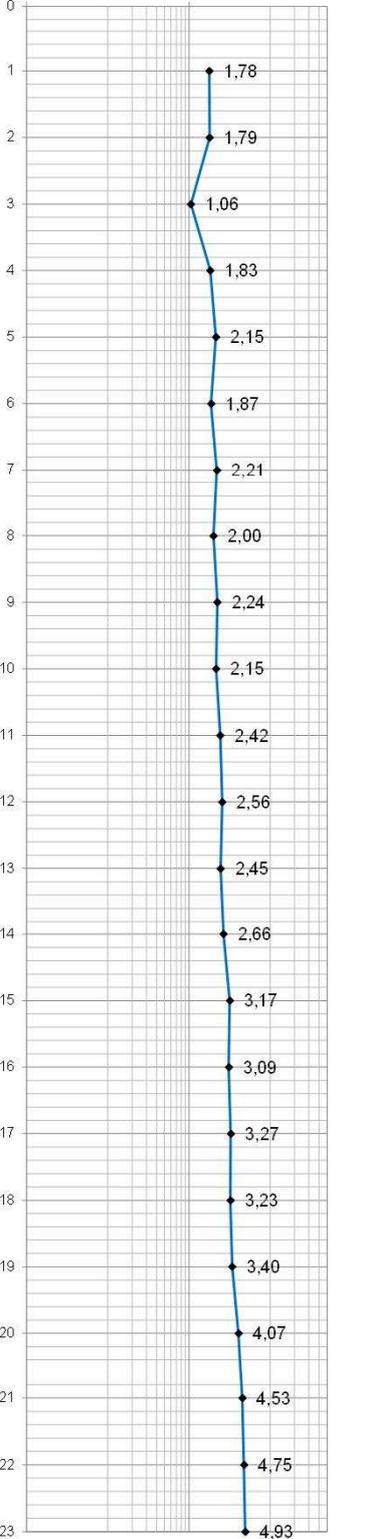
FLEUVE COMOÉ

Annexe 4 : Profils pressiométriques

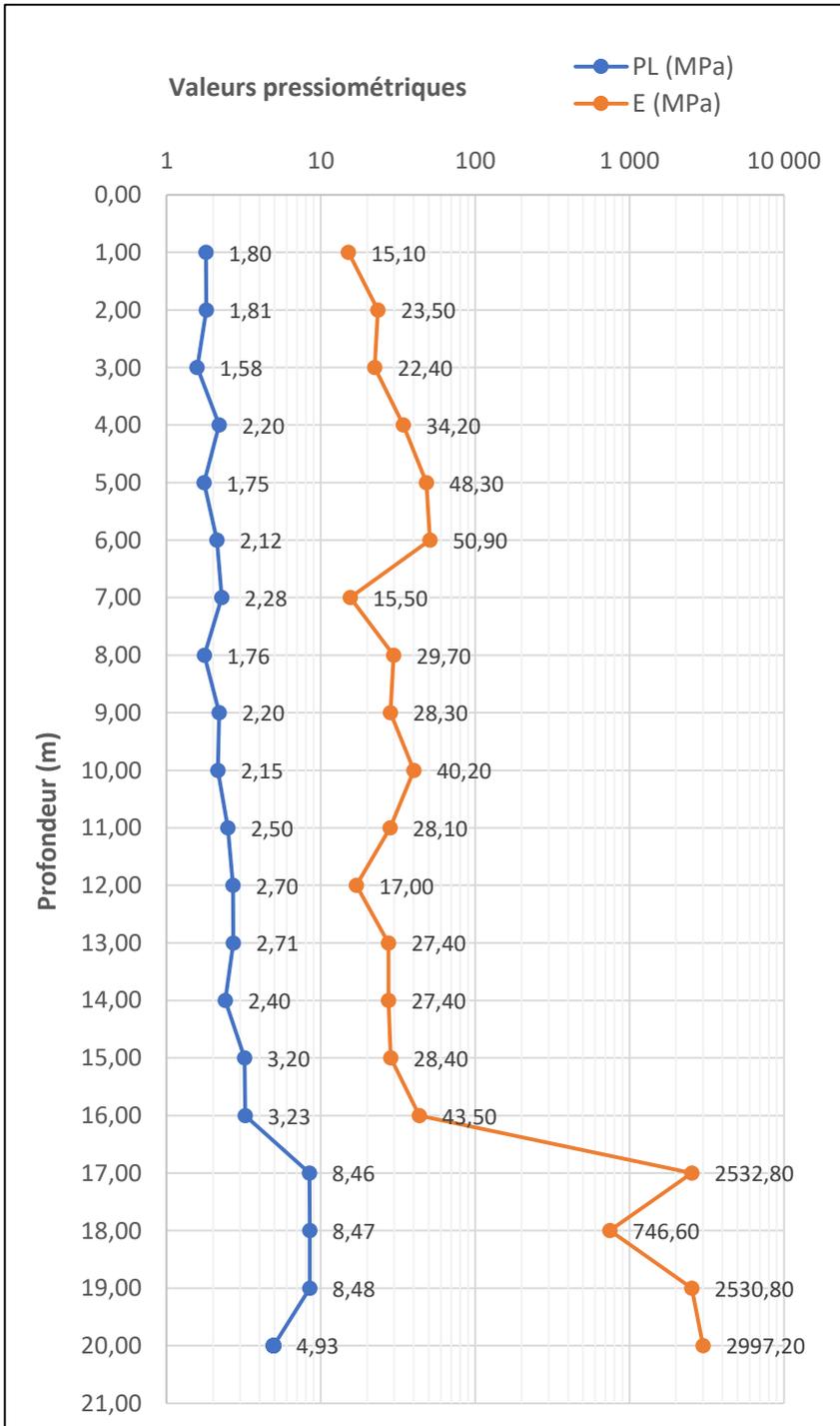
Lieu	DABAKALA-GANSE		ESSAI PRESSIOMETRIQUE MENARD		Graphique n°	2
Hauteur d'eau (m)	2,00		Conformément à la norme NF EN ISO 22476-4		Fluide	BENTONITE
Coordonnées (m)	X= 398649,958	Chantier	PROJET DE BITUMAGE DE ROUTES INTERURBAINES EN CÔTE D'IVOIRE MISSION EB8 ITINERAIRE DABAKALA-GANSE		Opérateur	ZOZO LAGO
	Y= 952409,198				Z=	Date de début
Sondage n°	SP2(P1)	Dossier n°	2018/DGC/ROA/0547		Date de fin	14/05/2022
Coupe de terrain			Module Pressiométrique (MPa)		Pression Limite Nette (Mpa)	
	0,30	Gravier de quartz	0	1	0	1
	3,50	Argile schisteuse compacte grisâtre	1	2	1	2
	7,50	Argile schisteuse compacte bariolée	3	4	3	4
	9,50	Argile schisteuse compacte	5	6	5	6
	13,00	Roche saine	8	9	8	9
			10	11	10	11
			12	12	12	12
			13	13	13	13
Observation			Matériel de forage:		SONDEUSE PRESSIOMETRIQUE	
			Procès-Verbal réalisé par:		LOUKOU VICTORIEN	

Lieu	DABAKALA-GANSE	ESSAI PRESSIOMETRIQUE MENARD		Graphique n°	3
Hauteur d'eau (m)	3,50	Conformément à la norme NF EN ISO 22476-4		Fluide	BENTONITE
Coordonnées (m)	X= 398682,091 Y= 952429,670 Z=	Chantier	PROJET DE BITUMAGE DE ROUTES INTERURBAINES EN CÔTE D'IVOIRE MISSION EB8 ITINERAIRE DABAKALA-GANSE	Opérateur	ZOZO LAGO
	Date de début			19/05/2022	
Sondage n°	SP3(P2)	Dossier n°	2018/DGC/ROA/0547	Date de fin	21/05/2022
Coupe de terrain			Module Pressiométrique (MPa)	Pression Limite Nette (Mpa)	
	1,00	Gravier de quartz	0	0	0
	4,00	Argile compacte grisâtre	1 48,7	1 3,07	
			2 22,7	2 1,82	
			3 31,2	3 1,71	
	8,00	Argile schisteuse compacte	4 19,0	4 2,21	
			5 32,0	5 3,19	
			6 22,4	6 3,04	
			7 50,5	7 3,92	
	12,00	Roche saine	8 30,3	8 4,22	
			9 1248,5	9 4,97	
			10 1139,7	10 4,98	
			11 1149,8	11 5,00	
			12 1509,2	12 5,01	
Observation			Matériel de forage:	SONDEUSE PRESSIOMETRIQUE	
			Procès-Verbal réalisé par:	LOUKOU VICTORIEN	

Lieu	DABAKALA-GANSE		ESSAI PRESSIOMETRIQUE MENARD		Graphique n°	4
Hauteur d'eau (m)	3,50		Conformement à la norme NF EN ISO 22476-4		Fluide	BENTONITE
Coordonnées (m)	X= 398714,224 Y= 952450,142 Z=	Chantier	PROJET DE BITUMAGE DE ROUTES INTERURBAINES EN CÔTE D'IVOIRE MISSION EB8 ITINERAIRE DABAKALA-GANSE		Opérateur	ZOZO LAGO
					Date de début	16/05/2022
Sondage n°	SP4(P3)	Dossier n°	2018/DGC/ROA/0547		Date de fin	18/05/2022
Coupe de terrain			Module Pressiométrique (MPa)		Pression Limite Nette (Mpa)	
	0,40	Gravier de quartz	 0 1 100 10000		 0 1	
	4,00	Argile compacte grisâtre	1 6,6 2 18,9 3 18,0 4 13,8 5 36,3 6 27,1 7 42,5		1 0,82 2 1,42 3 1,36 4 1,63 5 3,41 6 3,55 7 4,18	
	7,00	Argile schisteuse compacte grisâtre	8 1154,8 9 1524,4 10 1491,4		8 4,91 9 4,91 10 4,93	
	11,00	Roche saine	11 1355,0		11 4,93	
Observation			Matériel de forage:		SONDEUSE PRESSIOMETRIQUE	
			Procès-Verbal réalisé par:		LOUKOU VICTORIEN	

Lieu	DABAKALA (TOUPE - GANSE)		ESSAI PRESSIOMETRIQUE MENARD		Graphique n°	5
Niveau nappe (m)			Conformement à la norme NF EN ISO 22476-4		Fluide	BENTONITE
Coordonnées (m)	X=	Chantier	PROJET DE BITUMAGE DE ROUTES INTERURBAINES EN CÔTE D'IVOIRE MISSION EB8 ITINERAIRE DABAKALA-GANSE		Opérateur	ZOZO LAGO
	Y=				Date de début	11/04/2021
Sondage n°	SP5 C4	Dossier n°	2018/DGC/ROA/0547		Date de fin	13/04/2021
			Module Pressiométrique (MPa)		Pression Limite Nette (Mpa)	
						
			1	20,5	1,78	
			2	21,4	1,79	
			3	11,0	1,06	
			4	17,4	1,83	
			5	30,7	2,15	
			6	31,2	1,87	
			7	37,6	2,21	
			8	12,3	2,00	
			9	24,3	2,24	
			10	37,4	2,15	
			11	23,4	2,42	
			12	28,8	2,56	
			13	43,4	2,45	
			14	41,9	2,66	
			15	28,0	3,17	
			16	59,7	3,09	
			17	37,5	3,27	
			18	60,3	3,23	
			19	42,1	3,40	
			20	1127,2	4,07	
			21	1250,4	4,53	
22	1302,9	4,75				
23	1377,1	4,93				
Observation			Matériel de forage:	SONDEUSE PRESSIOMETRIQUE		
			Procès-Verbal réalisé par:	N'GORAN RACHEL EPOUSE KOUASSI		

Annexe 5 : Note de calcul Geopieu (Fascicule 62)

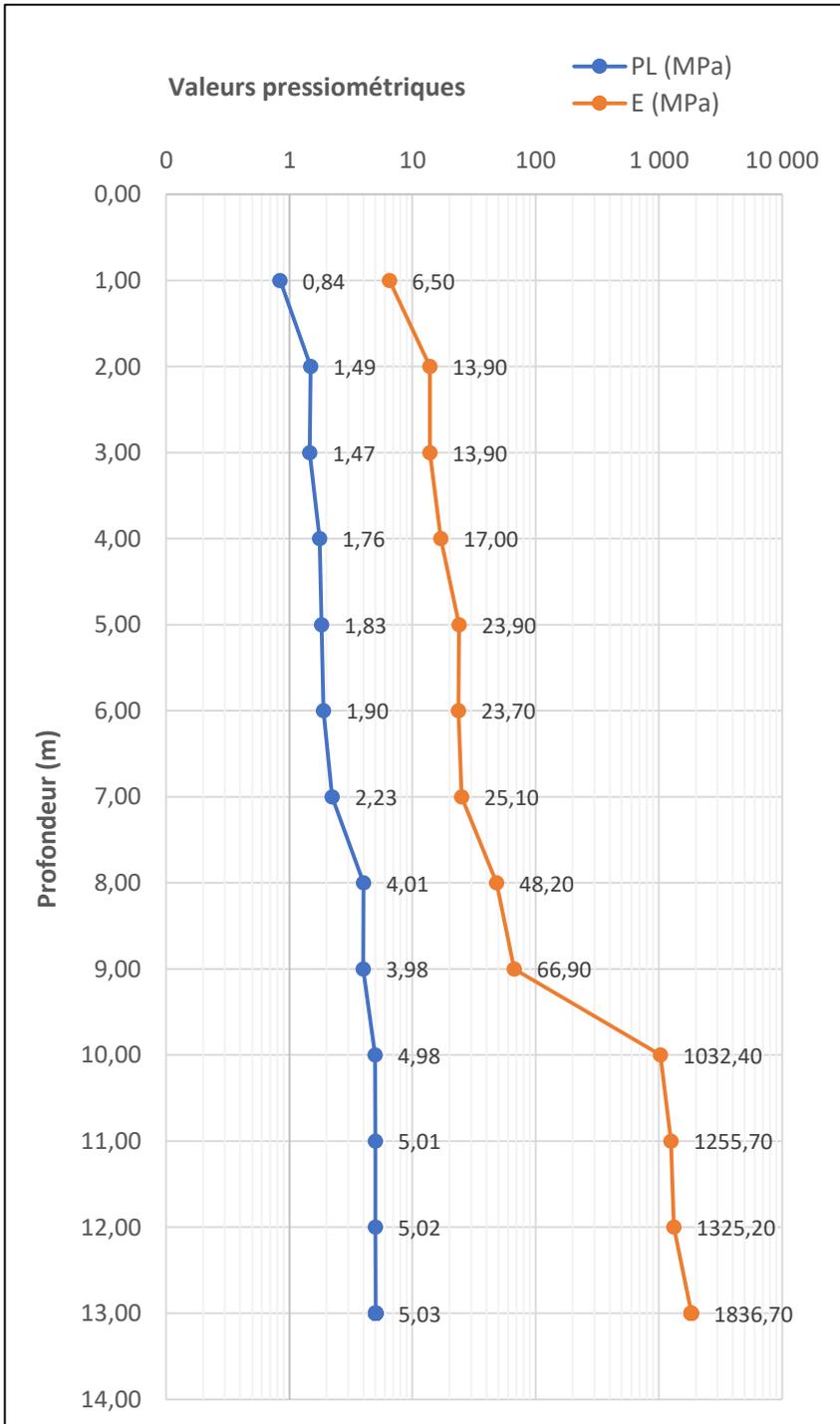


PIEU
 Type de pieu : Foré à la boue
 Diamètre : 1200 mm
 Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
 Prof. Fondation : 15 m
 Encastr. Couche porteuse : 1 m
 Mise en œuvre sans refoulement

CHARGE
 Q (ELS) Quasi permanent : 1147,35 t
 Q (ELS) Rare : 1494,09 t
 Q (ELU) Fondamental : 2055,15 t
 Q (ELU) Accidental : 1350,48 t
 Nombre de pieux nécessaires : 4

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _p : 1,1	Q _u : 826,256 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 344,639 t
P _{le} * : 3,85 MPa	Q _c : 482,494 t	Q _{max} (ELS) Rare : 438,631 t
q _u : 4,24 MPa		Q _{max} (ELU) Fondamental : 590,183 t
Q _p : 479,424 t		Q _{max} (ELU) Accidental : 688,547 t
Q _s : 346,832 t		



PIEU

Type de pieu : Foré à la boue
 Diamètre : 1200 mm
 Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
 Prof. Fondation : 11 m
 Encastr. Couche porteuse : 1,5 m
 Mise en œuvre sans refoulement

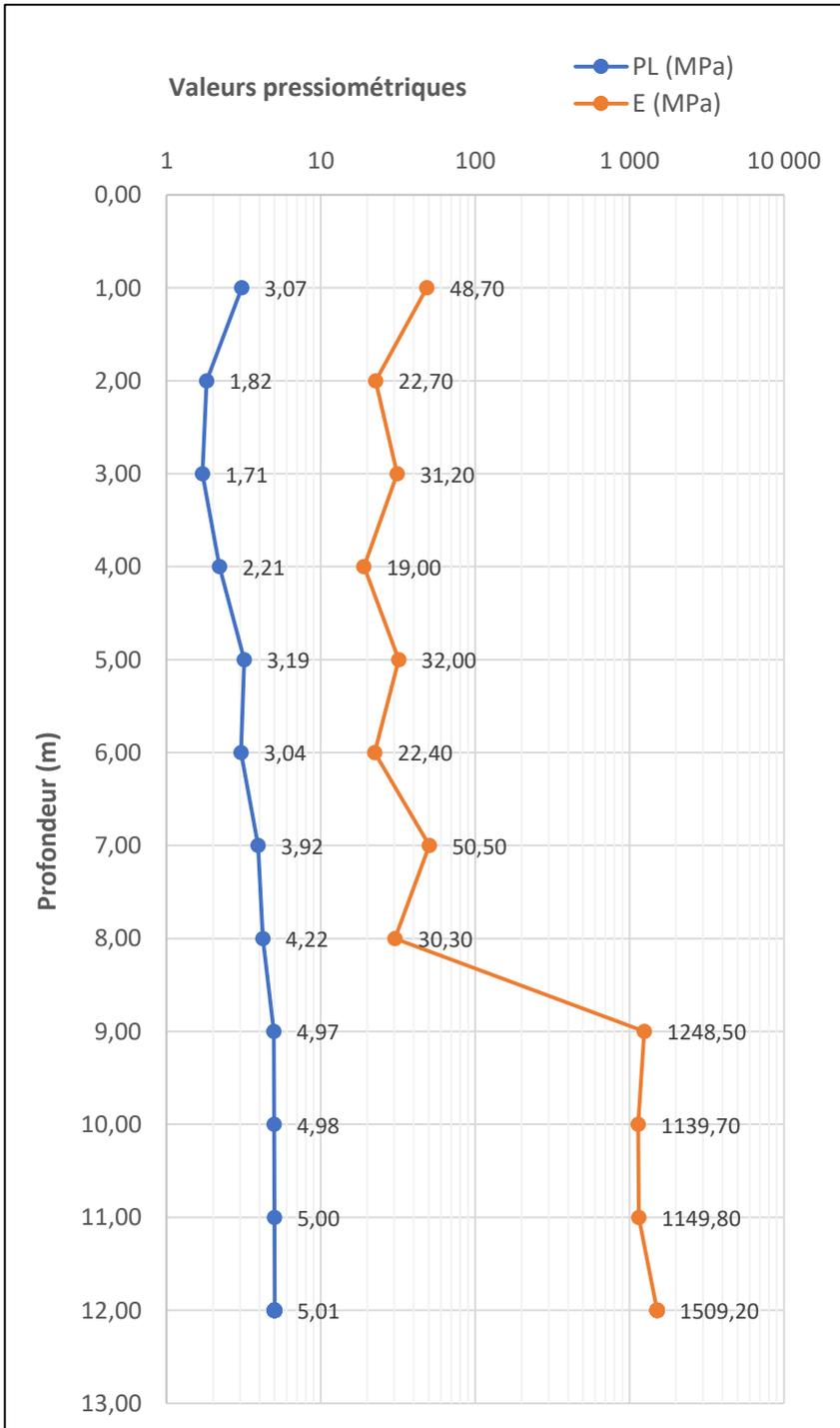
CHARGE

Q (ELS) Quasi permanent : 1147,35 t
 Q (ELS) Rare : 1890,96 t
 Q (ELU) Fondamental : 2055,15 t
 Q (ELU) Accidentel : 1673,24 t
 Nombre de pieux nécessaires : 5

Par le Fascicule 62 Titre V

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _p : 1,1	Q _u : 884,947 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 353,352 t
P _{le} * : 5,01 MPa	Q _c : 494,692 t	Q _{max} (ELS) Rare : 449,72 t
q _u : 5,52 MPa		Q _{max} (ELU) Fondamental : 632,105 t
Q _p : 623,854 t		Q _{max} (ELU) Accidentel : 737,456 t
Q _s : 261,093 t		



PIEU

Type de pieu : Foré à la boue
 Diamètre : 1200 mm
 Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
 Prof. Fondation : 9 m
 Encastr. Couche porteuse : 1 m
 Mise en œuvre sans refoulement

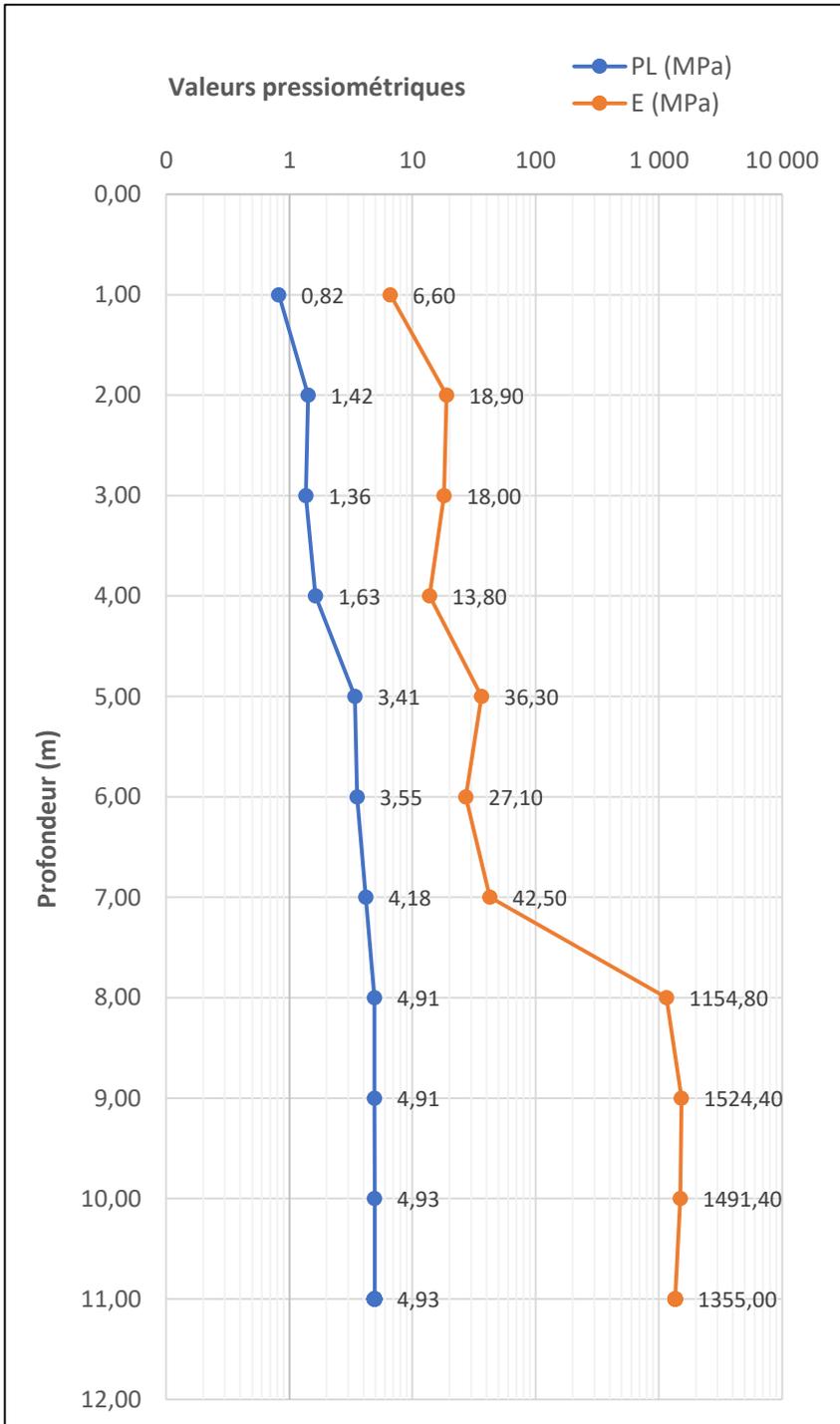
CHARGE

Q (ELS) Quasi permanent : 1147,35 t
 Q (ELS) Rare : 1890,96 t
 Q (ELU) Fondamental : 2055,15 t
 Q (ELU) Accidentel : 1673,24 t
 Nombre de pieux nécessaires : 5

Par le Fascicule 62 Titre V

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _p : 1,1	Q _u : 845,683 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 335,366 t
P _{le} * : 4,92 MPa	Q _c : 469,513 t	Q _{max} (ELS) Rare : 426,83 t
q _u : 5,41 MPa		Q _{max} (ELU) Fondamental : 604,059 t
Q _p : 612,325 t		Q _{max} (ELU) Accidentel : 704,736 t
Q _s : 245,358 t		



PIEU

Type de pieu : Foré à la boue
 Diamètre : 1200 mm
 Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
 Prof. Fondation : 8 m
 Encastr. Couche porteuse : 1 m
 Mise en œuvre sans refoulement

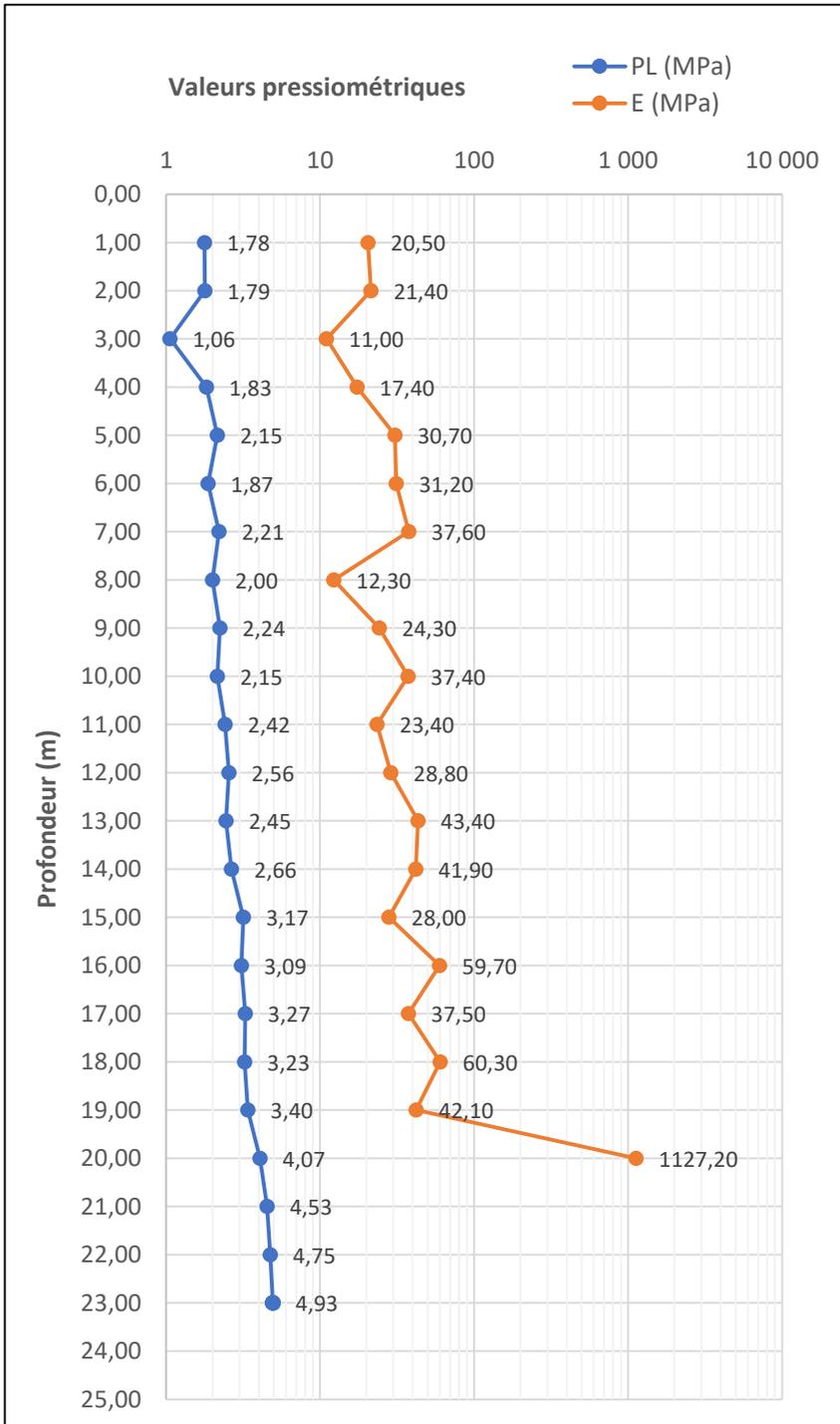
CHARGE

Q (ELS) Quasi permanent : 1147,35 t
 Q (ELS) Rare : 1890,96 t
 Q (ELU) Fondamental : 2055,15 t
 Q (ELU) Accidentel : 1673,24 t
 Nombre de pieux nécessaires : 5

Par le Fascicule 62 Titre V

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _p : 1,1	Q _u : 818,624 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 322,973 t
P _{le} * : 4,86 MPa	Q _c : 452,162 t	Q _{max} (ELS) Rare : 411,056 t
q _u : 5,34 MPa		Q _{max} (ELU) Fondamental : 584,731 t
Q _p : 604,373 t		Q _{max} (ELU) Accidentel : 682,187 t
Q _s : 214,251 t		



PIEU

Type de pieu : Foré à la boue
 Diamètre : 1200 mm
 Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
 Prof. Fondation : 17 m
 Encastr. Couche porteuse : 3 m
 Mise en œuvre sans refoulement

CHARGE

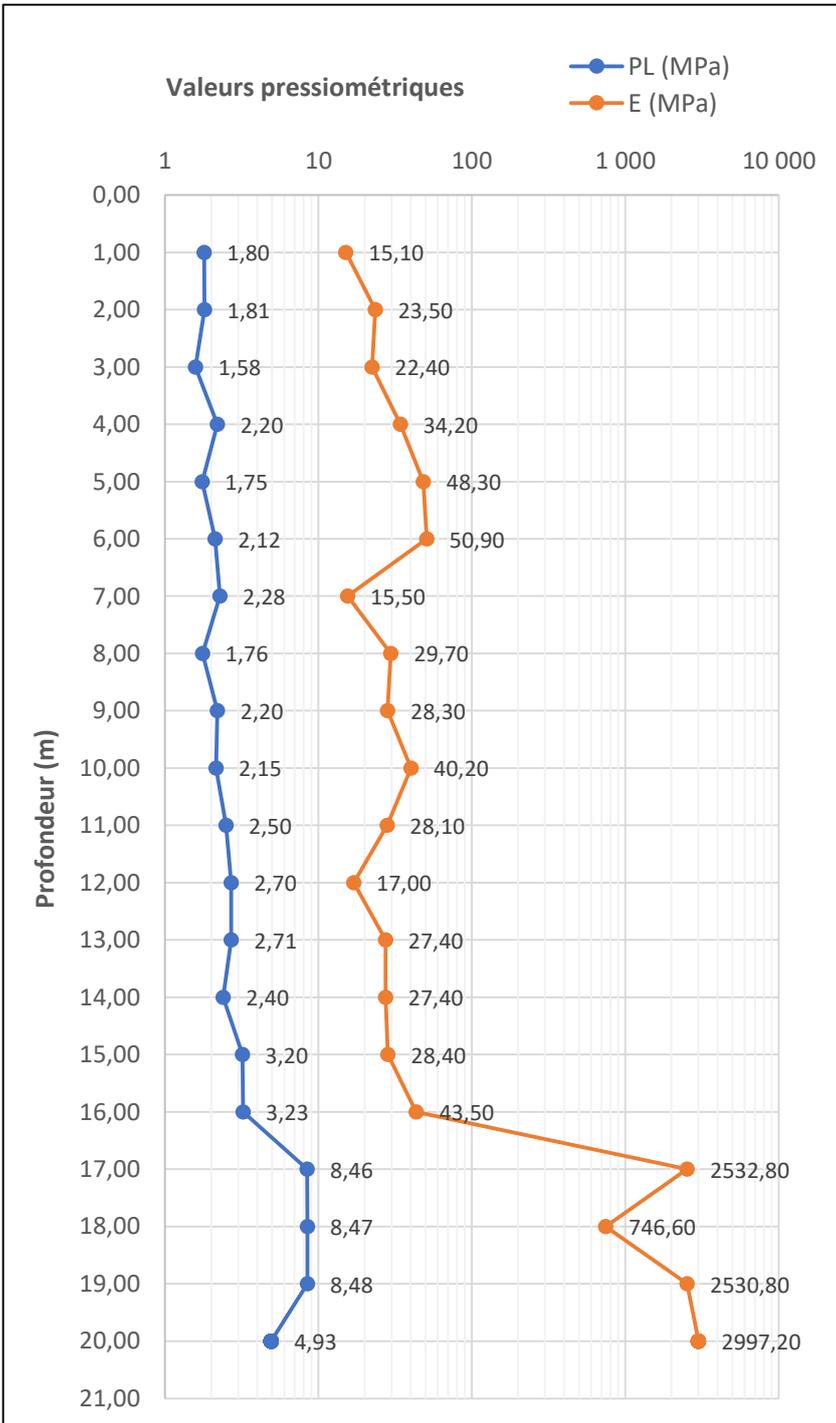
Q (ELS) Quasi permanent : 1147,35 t
 Q (ELS) Rare : 1890,96 t
 Q (ELU) Fondamental : 2055,15 t
 Q (ELU) Accidentel : 1673,24 t
 Nombre de pieux nécessaires : 4

Par le Fascicule 62 Titre V

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _p : 1,1	Q _u : 924,814 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 404,512 t
P _{le} * : 3,26 MPa	Q _c : 566,317 t	Q _{max} (ELS) Rare : 514,833 t
q _u : 3,58 MPa		Q _{max} (ELU) Fondamental : 660,581 t
Q _p : 405,266 t		Q _{max} (ELU) Accidentel : 770,678 t
Q _s : 519,548 t		

Annexe 6 : Note de calcul GeoPieu (NF P 94-262)



CARACTERISTIQUES DU PIEU

Type de pieu : 2 - [FB] – Foré boue (pieux et barrettes)
Diamètre : 1200 mm
Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
Prof. Fondation : 15 m
Encastr.Couche porteuse : 1 m
Mise en œuvre sans refoulement :

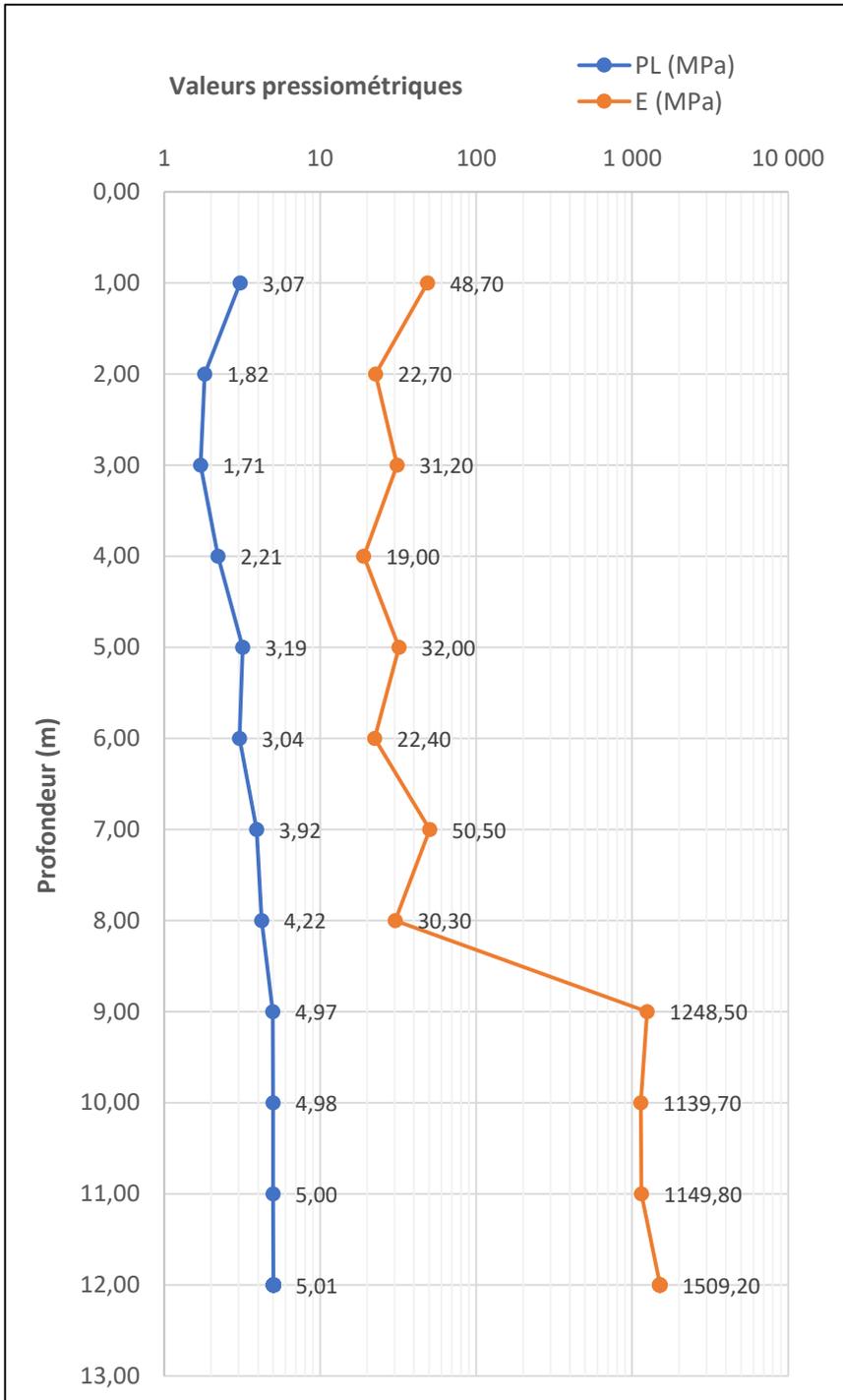
EFFORT EN TETE DE PIEU

Q (ELS) Caractéristiques : 1494,09 t
Q (ELS) Quasi permanent : 1147,35 t
Q (ELU) Durables et transitoires : 2055,15 t
Q (ELU) Accidentel : 1350,48 t
Nombre de pieux nécessaires : 3

Par la norme NF P 94-262

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _{pmax} : 1,45	R _{b,k} : 499,58 t	Q _{max} (ELS) Caractéristiques : 527,377 t
Def : 7,96 m	R _{s,k} : 321,36 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 431,763 t
k _p : 1,45		
P _{le*} : 3,85 MPa	R _{c,k} : 820,94 t	Q _{max} (ELU) Durables et transitoires : 745,851 t
q _b : 5,59 MPa	R _{c,cr,k} : 474,24 t	Q _{max} (ELU) Accidentel : 820,936 t
q _{b,k} : 4,42 MPa		



CARACTERISTIQUES DU PIEU

Type de pieu : 2 - [FB] – Foré boue (pieux et barrettes)
Diamètre : 1200 mm
Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
Prof. Fondation : 9 m
Encastr.Couche porteuse : 1 m
Mise en œuvre sans refoulement :

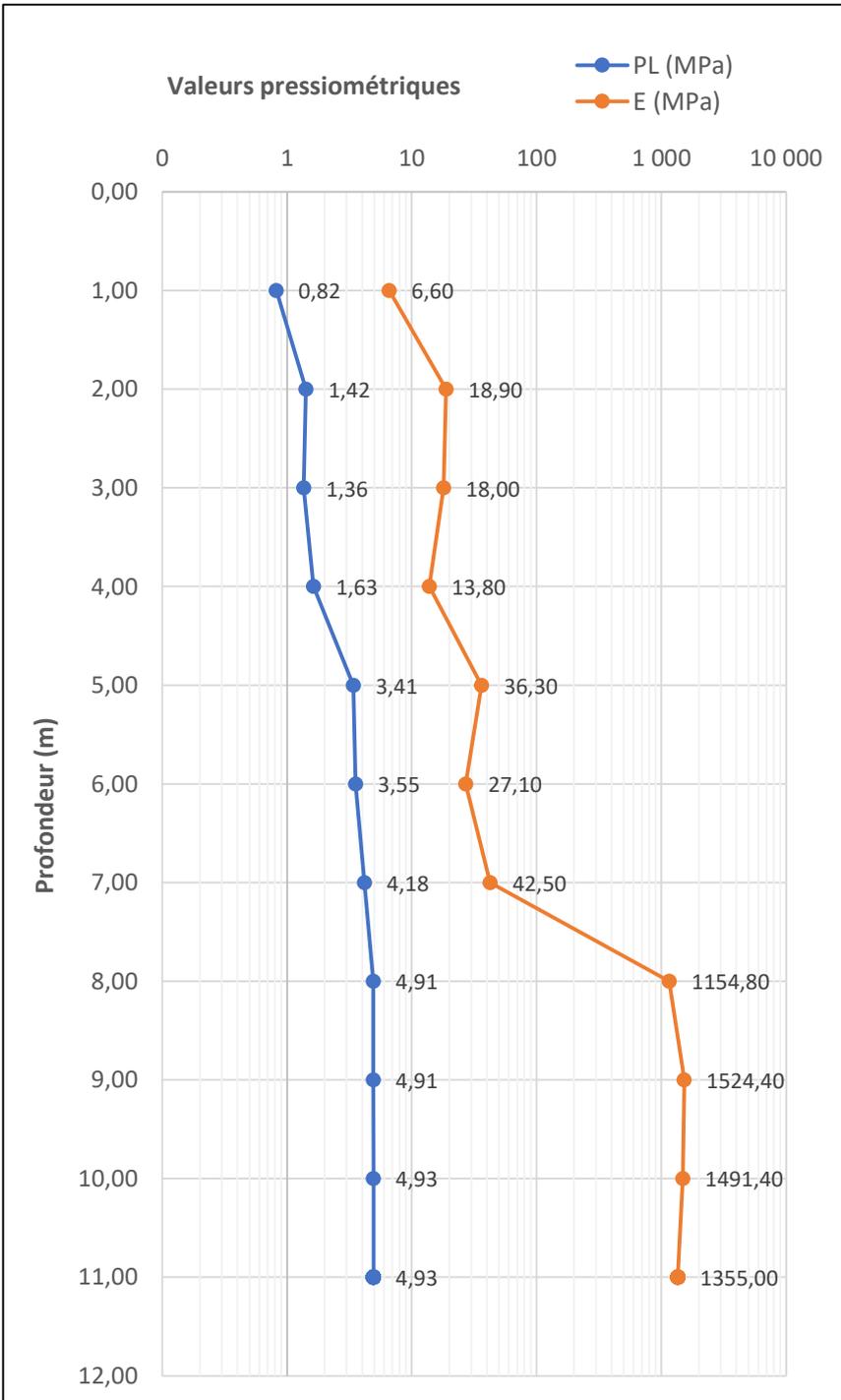
EFFORT EN TETE DE PIEU

Q (ELS) Caractéristiques : 1832,88 t
Q (ELS) Quasi permanent: 1294,8 t
Q (ELU) Durables et transitoires : 2551,4 t
Q (ELU) Accidentel : 1617,2 t
Nombre de pieux nécessaires : 4

Par la norme NF P 94-262

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

Kpmax : 1,45	Rb,k : 611,85 t	Qmax (ELS) Caractéristiques : 505,579 t
Def : 4,9 m	Rs,k : 214,14 t	Qmax (ELS) Quasi permanent : 414,201 t
kp : 1,37		
Ple* : 4,92 MPa	Rc,k : 825,99 t	Qmax (ELU) Durables et transitoires : 750,898 t
qb : 6,73 MPa	Rc,cr,k : 456,42 t	Qmax (ELU) Accidentel : 825,988 t
qb,k : 5,32 MPa		



CARACTERISTIQUES DU PIEU

Type de pieu : 2 - [FB] – Foré boue (pieux et barrettes)
Diamètre : 1200 mm
Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
Prof. Fondation : 8 m
Encastr.Couche porteuse : 1 m
Mise en œuvre sans refoulement :

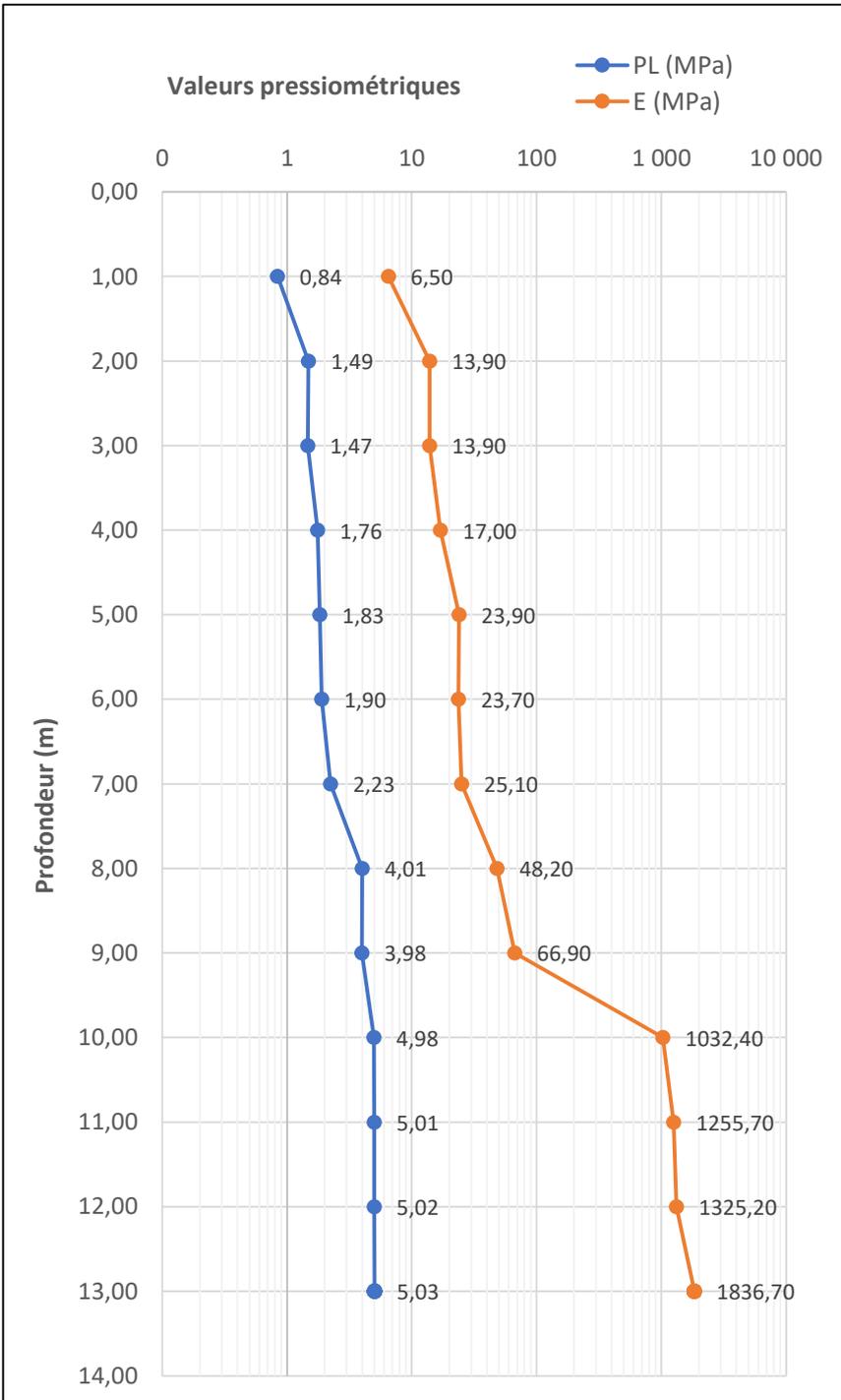
EFFORT EN TETE DE PIEU

Q (ELS) Caractéristiques : 1893,44 t
Q (ELS) Quasi permanent : 1355,08 t
Q (ELU) Durables et transitoires : 2633,24 t
Q (ELU) Accidentel : 1677,64 t
Nombre de pieux nécessaires : 5

Par la norme NF P 94-262

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

K _{pmax} : 1,45	R _{b,k} : 560,81 t	Q _{max} (ELS) Caractéristiques : 458,55 t
Def : 3,79 m	R _{s,k} : 190,27 t	Q _{max} (ELS) Quasi permanent : 375,996 t
k _p : 1,28		
P _{le*} : 4,86 MPa	R _{c,k} : 751,08 t	Q _{max} (ELU) Durables et transitoires : 682,166 t
q _b : 6,24 MPa	R _{c,cr,k} : 413,7 t	Q _{max} (ELU) Accidentel : 751,083 t
q _{b,k} : 4,93 MPa		



CARACTERISTIQUES DU PIEU

Type de pieu : 2 - [FB] – Foré boue (pieux et barrettes)
Diamètre : 1200 mm
Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
Prof. Fondation : 11 m
Encastr.Couche porteuse : 1,5 m
Mise en œuvre sans refoulement :

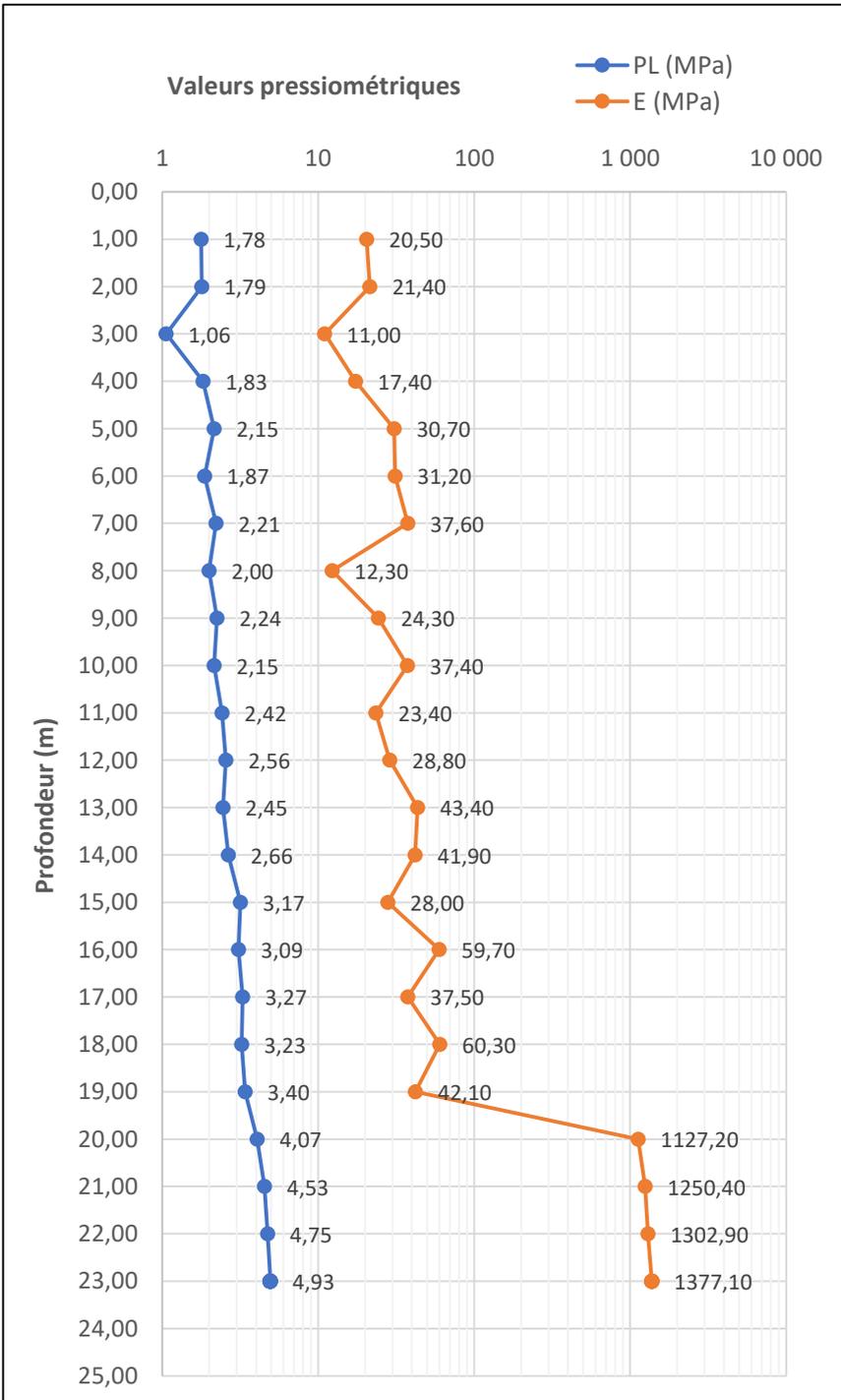
EFFORT EN TETE DE PIEU

Q (ELS) Caractéristiques : 1890,96 t
Q (ELS) Quasi permanent : 1347,12 t
Q (ELU) Durables et transitoires : 2631,4 t
Q (ELU) Accidentel : 1673,24 t
Nombre de pieux nécessaires : 4

Par la norme NF P 94-262

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

Kpmax : 1,45	Rb,k : 628,53 t	Qmax (ELS) Caractéristiques : 569,447 t
Def : 5,3 m	Rs,k : 283,19 t	Qmax (ELS) Quasi permanent : 466,093 t
kp : 1,4		
Ple* : 5,01 MPa	Rc,k : 911,73 t	Qmax (ELU) Durables et transitoires : 829,297 t
qb : 7,01 MPa	Rc,cr,k : 511,7 t	Qmax (ELU) Accidentel : 811,726 t
qb,k : 5,54 MPa		



CARACTERISTIQUES DU PIEU

Type de pieu : 2 - [FB] – Foré boue (pieux et barrettes)
Diamètre : 1200 mm
Périmètre : 3,77 m ; Aire : 1,131 m²
Prof. Fondation : 17 m
Encastr.Couche porteuse : 3 m
Mise en œuvre sans refoulement :

EFFORT EN TETE DE PIEU

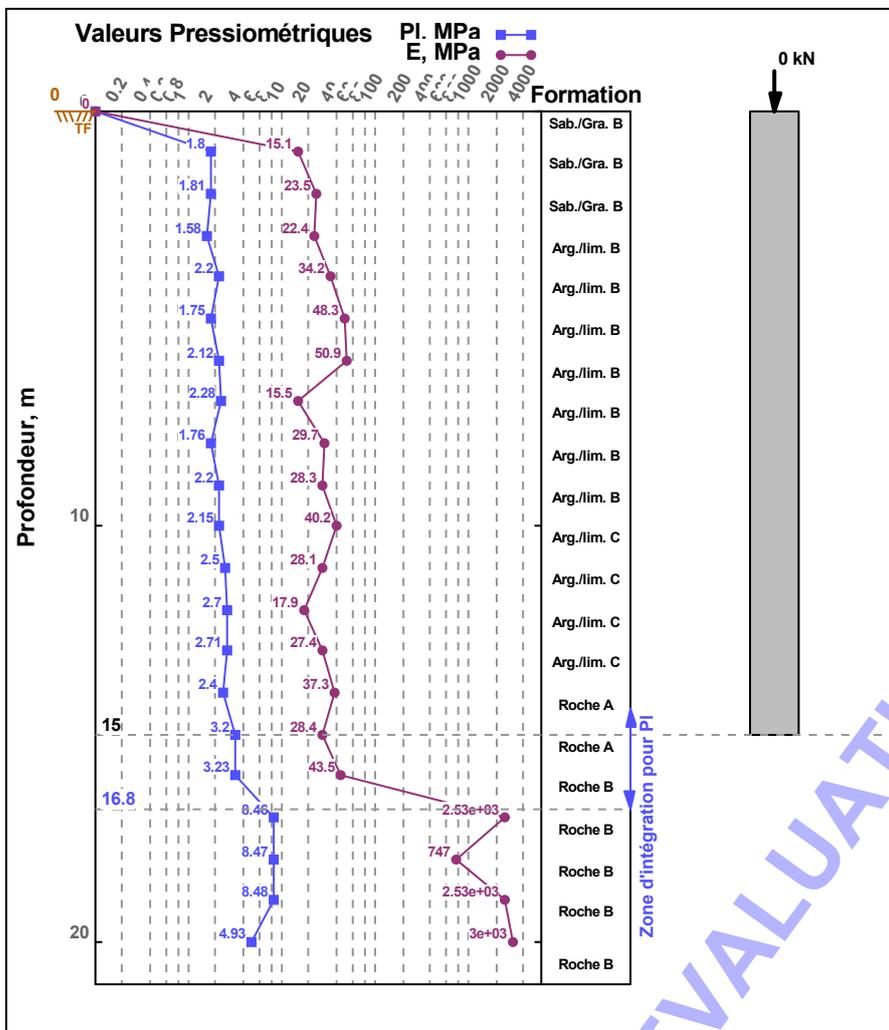
Q (ELS) Caractéristiques : 1524,81 t
Q (ELS) Quasi permanent : 1196,97 t
Q (ELU) Durables et transitoires : 2063,28 t
Q (ELU) Accidentel : 1452,75 t
Nombre de pieux nécessaires : 3

Par la norme NF P 94-262

RESULTATS DE CALCUL : CAPACITE PORTANTE

Kpmax : 1,45	Rb,k : 422,3 t	Qmax (ELS) Caractéristiques : 566,697 t
Def : 11,11 m	Rs,k : 426,54 t	Qmax (ELS) Quasi permanent : 463,57 t
kp : 1,45		
Ple* : 3,26 MPa	Rc,k : 848,84 t	Qmax (ELU) Durables et transitoires : 772,218 t
qb : 4,72 MPa	Rc,cr,k : 509,53 t	Qmax (ELU) Accidentel : 849,84 t
qb,k : 3,73 MPa		

Annexe 7 : Note de calcul GEOFOND (Fascicule 62)



Pieu

Type de pieu : Foré boue
 Prof. Base : 15 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

	Min (MN)	Max (MN)
Q(ELS) Quasi-Permanent :		
Q(ELS) Rare :		
Q(ELU) Fondamental :		
Q(ELU) Accidentel :		

Fichier : F62 SP1

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode du Fascicule 62

$\rho_p = 1, \rho_s = 1$

Qsu = 3.51 MN

Ann. C.2.5

Ple = 3.85 MPa

Art. E.2.2

qu = 4.24 MPa

Ann. C.3.2

Qc = 4.86 MN

Ann. C.2.3

Qtc = 2.46 MN

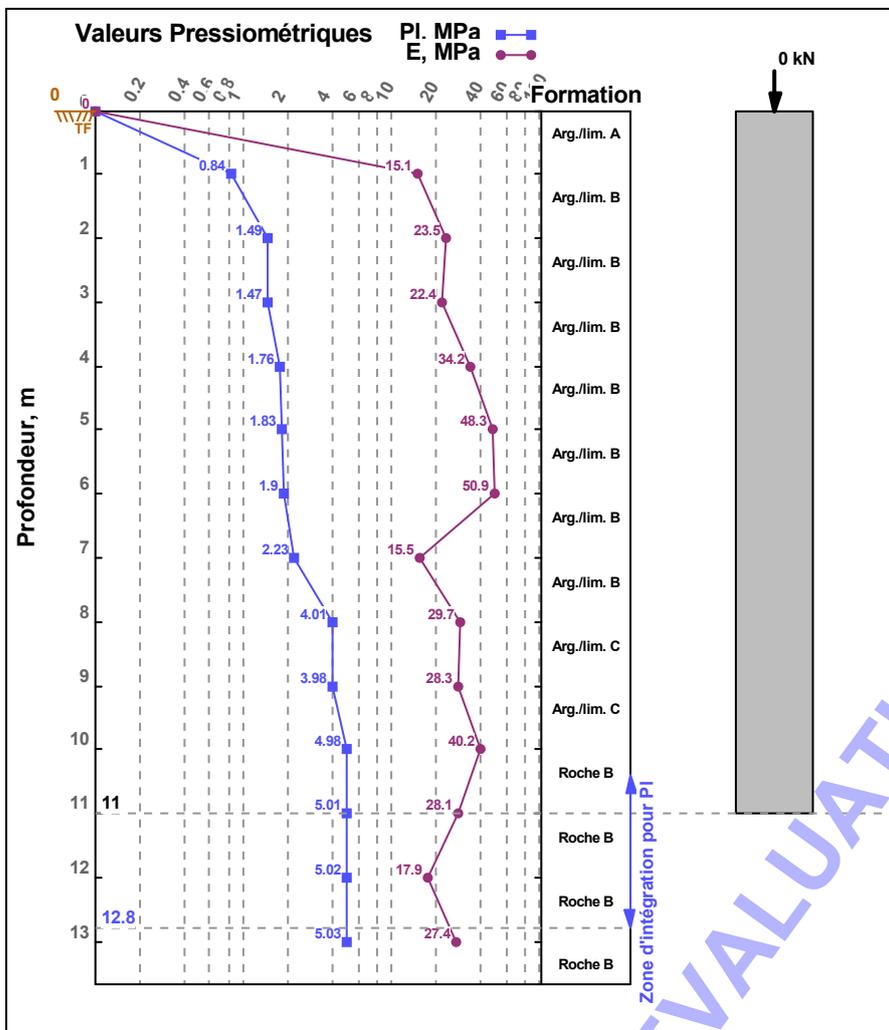
Ann. C.2.3

Qmax(ELU Fondamental) = 5.93 MN

Qmax(ELU Accidentel) = 6.92 MN

Qmax(ELS Rare) = 4.41 MN

Qmax(ELS Quasi Permanent) = 3.47 MN



Pieu

Type de pieu : Foré boue
 Prof. Base : 11 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

	Min (MN)	Max (MN)
Q(ELS) Quasi-Permanent :		
Q(ELS) Rare :		
Q(ELU) Fondamental :		
Q(ELU) Accidentel :		

Fichier : F62 SP2

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode du Fascicule 62

$\rho_p = 1, \rho_s = 1$
 $Q_{su} = 3.02 \text{ MN}$ Ann. C.2.5
 $P_{le} = 5.01 \text{ MPa}$ Art. E.2.2 $k_p = 1.1$ Ann. C.3.2
 $q_u = 5.52 \text{ MPa}$ Ann. C.3.2 $Q_{pu} = 6.24 \text{ MN}$ Ann. C.2.6
 $Q_c = 5.23 \text{ MN}$ Ann. C.2.3 $Q_u = 9.26 \text{ MN}$ Ann. C.2.2
 $Q_{tc} = 2.12 \text{ MN}$ Ann. C.2.3 $Q_{tc} = 3.92 \text{ MN}$ Ann. C.2.2

$Q_{max}(ELU \text{ Fondamental}) = 6.61 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELU \text{ Accidentel}) = 7.72 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELS \text{ Rare}) = 4.76 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELS \text{ Quasi Permanent}) = 3.74 \text{ MN}$

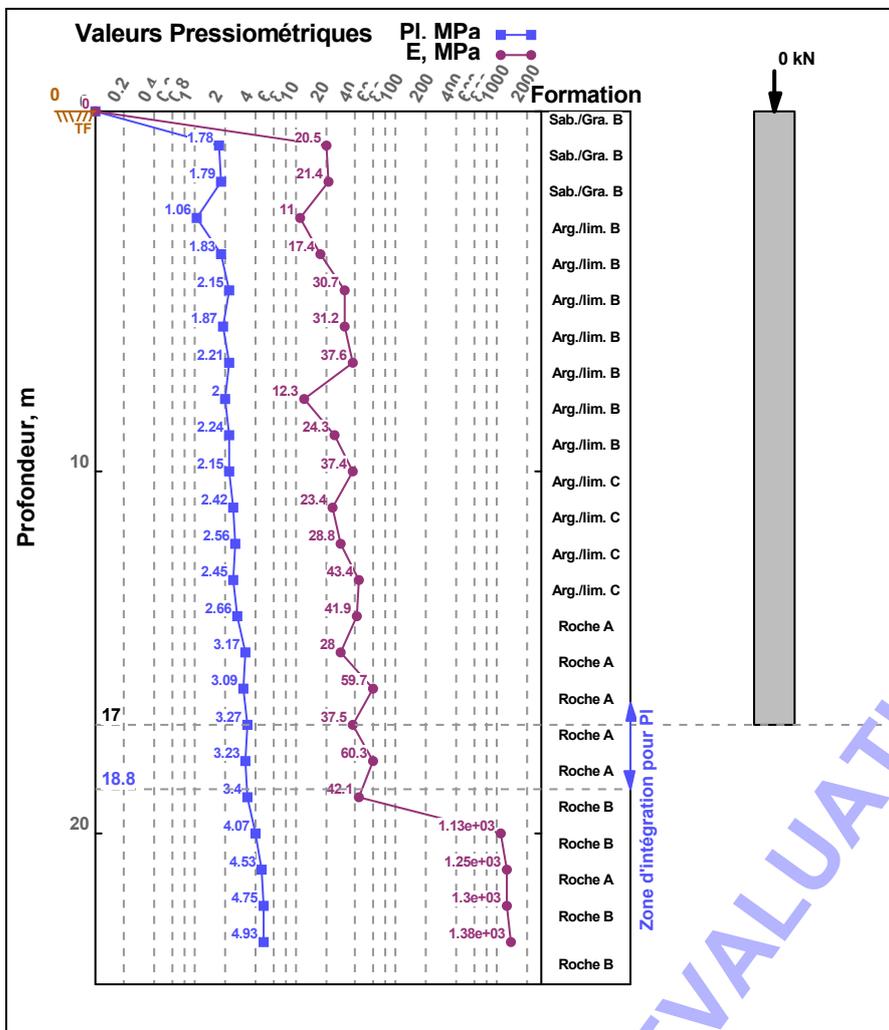
Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte $q_{ref} = 0 \text{ MPa}$

Par la méthode de Frank & Zhao

$q(11) = 5.52e+03 \text{ kPa}$
 $q_p(11) = 0 \text{ kPa}$
 $q'_u(11) = 0 \text{ kN}$

Tassement D = 0 mm



Pieu

Type de pieu : Foré boue
 Prof. Base : 17 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 3 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

	Min (MN)	Max (MN)
Q(ELS) Quasi-Permanent :		
Q(ELS) Rare :		
Q(ELU) Fondamental :		
Q(ELU) Accidentel :		

Fichier : F62 SP5

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode du Fascicule 62

$\rho_p = 1, \rho_s = 1$
 $Q_{su} = 5.33 \text{ MN}$ Ann. C.2.5
 $P_{le} = 3.26 \text{ MPa}$ Art. E.2.2 $k_p = 1.1$ Ann. C.3.2
 $q_u = 3.58 \text{ MPa}$ Ann. C.3.2 $Q_{pu} = 4.35 \text{ MN}$ Ann. C.2.6
 $Q_c = 5.76 \text{ MN}$ Ann. C.2.3 $Q_u = 9.38 \text{ MN}$ Ann. C.2.2
 $Q_{tc} = 3.73 \text{ MN}$ Ann. C.2.3 $Q_{ts} = 5.33 \text{ MN}$ Ann. C.2.2

$Q_{max}(ELU \text{ Fondamental}) = 6.7 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELU \text{ Accidentel}) = 7.82 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELS \text{ Rare}) = 5.23 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELS \text{ Quasi Permanent}) = 4.11 \text{ MN}$

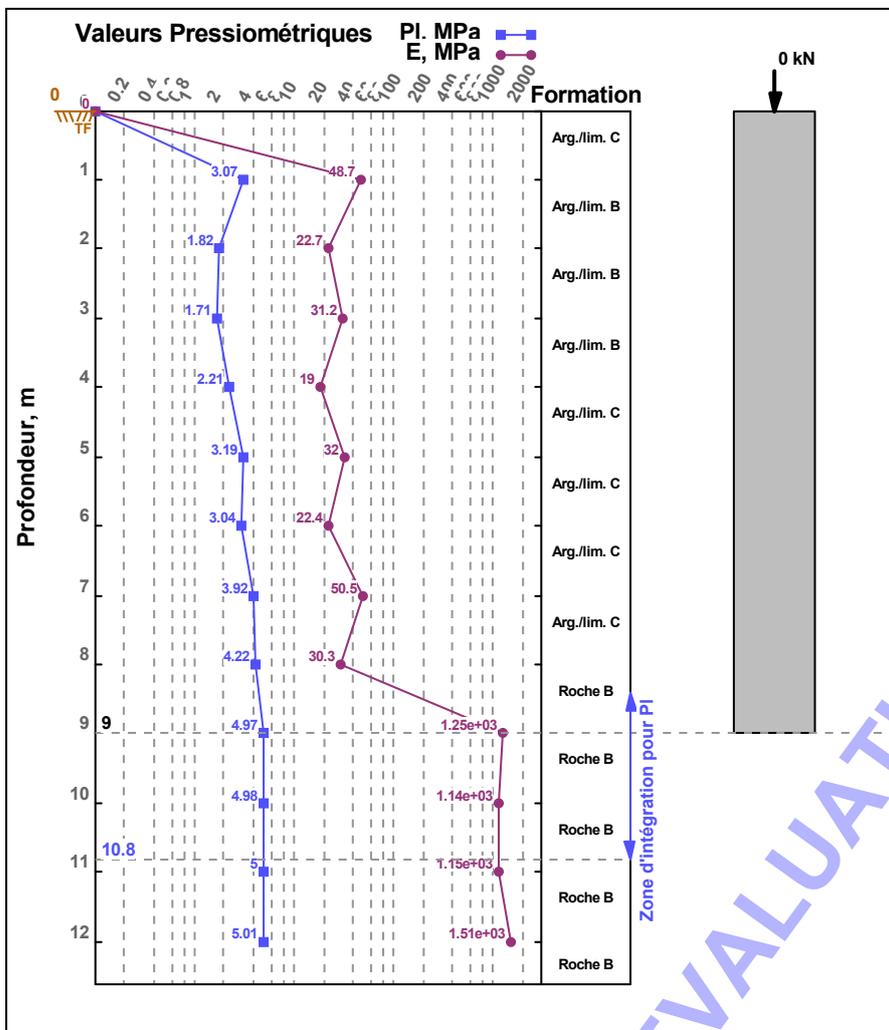
Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte $q_{ref} = 0 \text{ MPa}$

Par la méthode de Frank & Zhao

$q(17) = 3.58e+03 \text{ kPa}$
 $q_p(17) = 0 \text{ kPa}$
 $q'_u(17) = 0 \text{ kN}$

Tassement D = 0 mm



Pieu

Type de pieu : Foré boue
 Prof. Base : 9 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

	Min (MN)	Max (MN)
Q(ELS) Quasi-Permanent :		
Q(ELS) Rare :		
Q(ELU) Fondamental :		
Q(ELU) Accidentel :		

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode du Fascicule 62

$\rho_p = 1, \rho_s = 1$
 $Q_{su} = 2.65 \text{ MN}$ Ann. C.2.5
 $P_{le} = 4.92 \text{ MPa}$ Art. E.2.2 $k_p = 1.1$ Ann. C.3.2
 $q_u = 5.41 \text{ MPa}$ Ann. C.3.2 $Q_{pu} = 6.12 \text{ MN}$ Ann. C.2.6
 $Q_c = 4.92 \text{ MN}$ Ann. C.2.3 $Q_u = 8.78 \text{ MN}$ Ann. C.2.2
 $Q_{tc} = 1.86 \text{ MN}$ Ann. C.2.3 $Q_{tc} = 2.05 \text{ MN}$ Ann. C.2.2

$Q_{max}(ELU \text{ Fondamental}) = 6.27 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELU \text{ Accidentel}) = 7.31 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELS \text{ Rare}) = 4.47 \text{ MN}$
 $Q_{max}(ELS \text{ Quasi Permanent}) = 3.51 \text{ MN}$

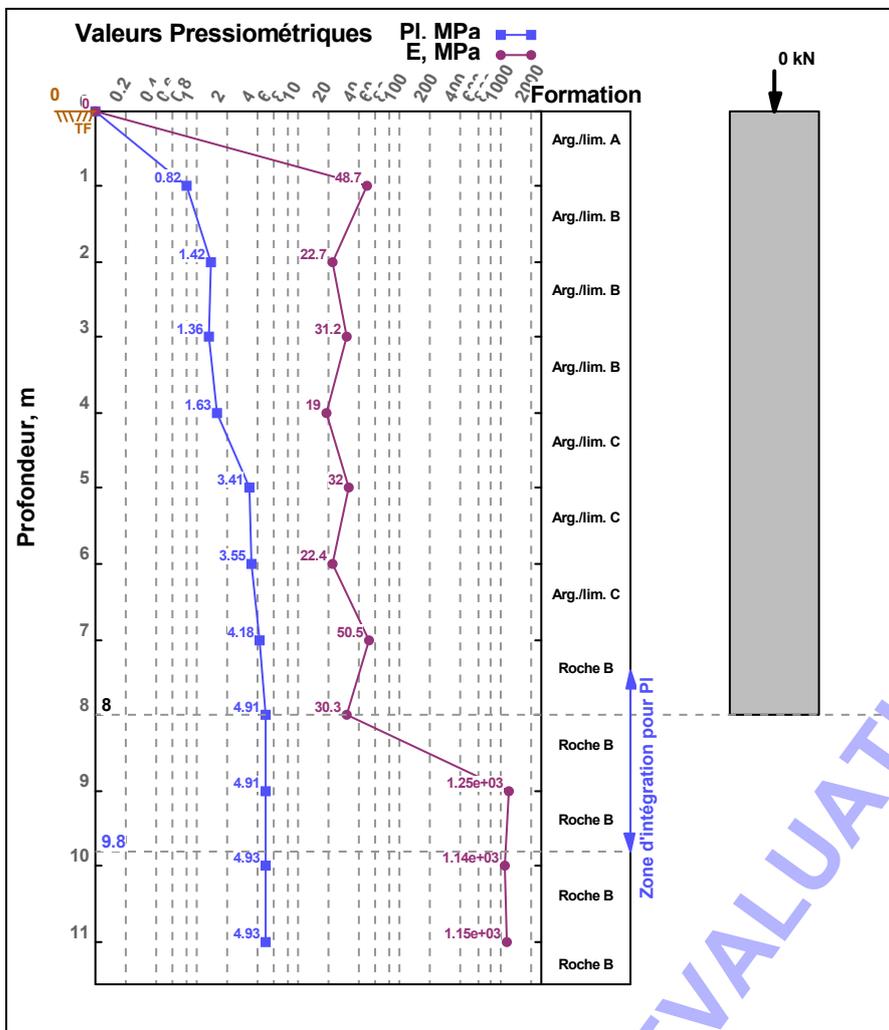
Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte $q_{ref} = 0 \text{ MPa}$

Par la méthode de Frank & Zhao

$q_l(9) = 5.41e+03 \text{ kPa}$
 $q_p(9) = 0 \text{ kPa}$
 $q'_u(9) = 0 \text{ kN}$

Tassement D = 0 mm



Pieu

Type de pieu : Foré boue
 Prof. Base : 8 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

	Min (MN)	Max (MN)
Q(ELS) Quasi-Permanent :		
Q(ELS) Rare :		
Q(ELU) Fondamental :		
Q(ELU) Accidentel :		

Fichier : F62 SP4

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode du Fascicule 62

$\rho_p = 1$, $\rho_s = 1$
 $Q_{su} = 2.46$ MN Ann. C.2.5
 $P_{le} = 4.86$ MPa Art. E.2.2 $k_p = 1.1$ Ann. C.3.2
 $q_u = 5.34$ MPa Ann. C.3.2 $Q_{pu} = 6.07$ MN Ann. C.2.6
 $Q_c = 4.74$ MN Ann. C.2.3 $Q_u = 8.5$ MN Ann. C.2.2
 $Q_{tc} = 1.72$ MN Ann. C.2.3 $Q_{tc} = 2.46$ MN Ann. C.2.2

$Q_{max}(ELU \text{ Fondamental}) = 6.07$ MN
 $Q_{max}(ELU \text{ Accidentel}) = 7.09$ MN
 $Q_{max}(ELS \text{ Rare}) = 4.31$ MN
 $Q_{max}(ELS \text{ Quasi Permanent}) = 3.39$ MN

Résultats de calcul : Tassement

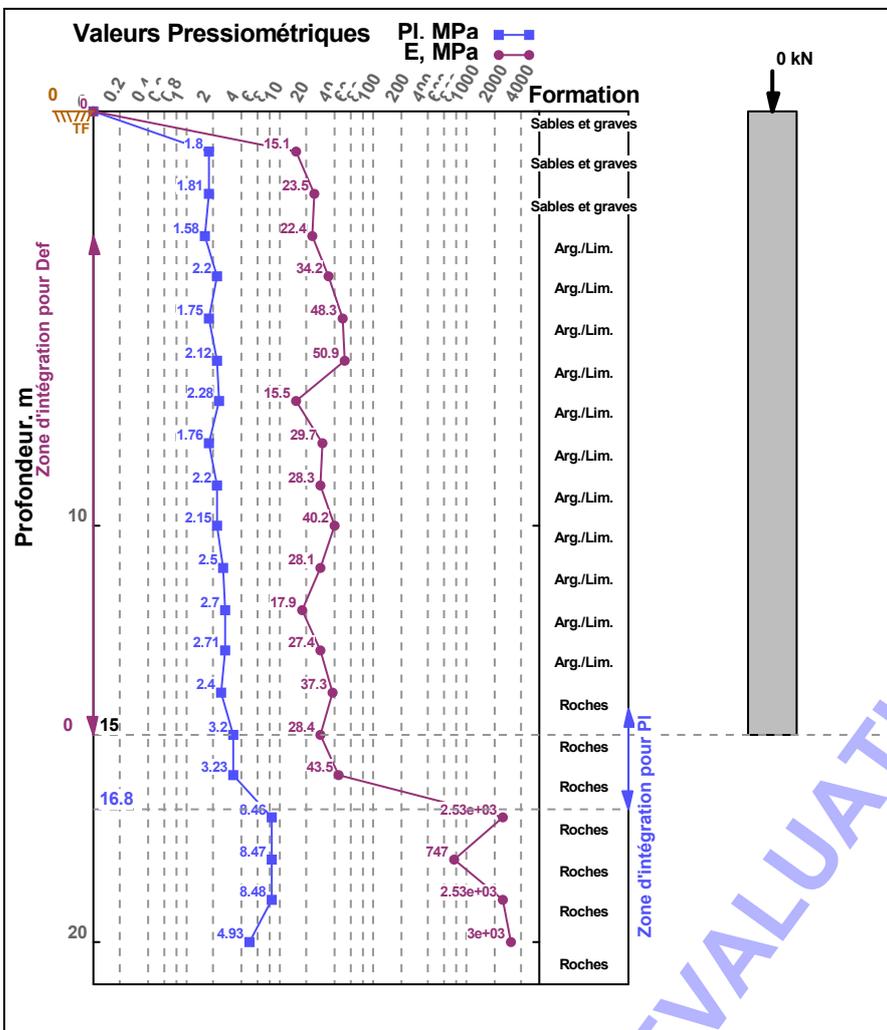
Sous une contrainte $q_{ref} = 0$ MPa

Par la méthode de Frank & Zhao

$q(8) = 5.34e+03$ kPa
 $q_p(8) = 0$ kPa
 $q'_u(8) = 0$ kN

Tassement D = 0 mm

Annexe 8 : Note de calcul GEOFOND (NF P 94-262)



Pieu

Type de pieu : Foré boue (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 15 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

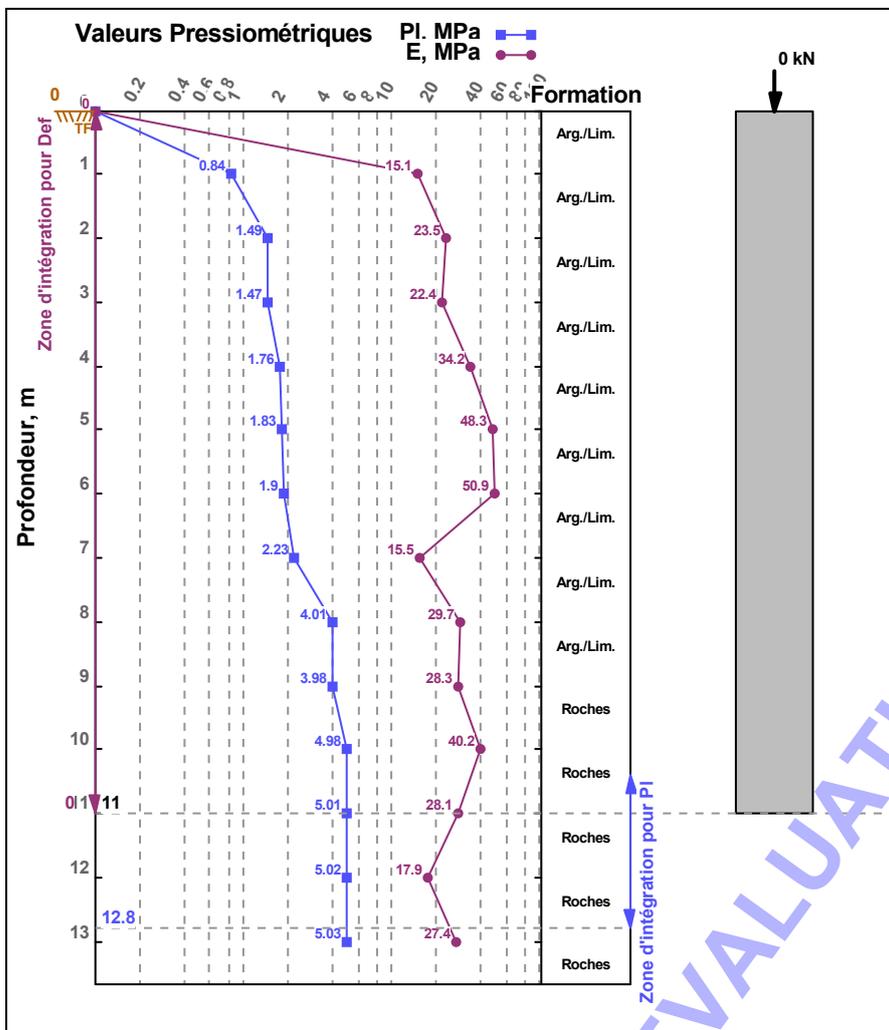
Fd (ELS) quasi-permanent :
 Fd (ELS) caractéristique :
 Fd (ELU) durable et trans. :
 Fd (ELU) accidentel :
 Fd (ELU) sismique :

Fichier : SP1

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode de la NF P 94-262 : Modèle de terrain

Rs = 4.06 MN Ann. F.5
 Rs;k = 3.21 MN Chap 9.2.4
 Ple = 3.85 MPa Ann. F4.2.3 k_{pmax} = 1.15 Tab. F4.2.1
 Def = 7.05 m k_p = 1.43 Ann. F4.2
 qb = 5.59 MPa Ann. F4.2.1 Rb = 6.32 MN Ann. F4.1
 Rb;k = 5 MN Ann. C.2.6
 Rc;cr;k = 4.75 MN Chap 14.2.2
 Rc;d (ELU durables et transitoires) = 7.46 MN
 Rc;d (ELU accidentel) = 8.21 MN
 Rc;d (ELU sismique) = 7.46 MN
 Rc;cr;d (ELS caractéristiques) = 5.27 MN
 Rc;cr;d (ELS quasi-permanent) = 4.32 MN



Pieu

Type de pieu : Foré boue (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 11 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

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

Fichier : SP2

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode de la NF P 94-262 : Modèle de terrain

Rs = 3.57 MN Ann. F.5
 Rs;k = 2.83 MN Chap 9.2.4
 Ple = 5.01 MPa Ann. F4.2.3 $k_{pmax} = 11.5$ Tab. F4.2.1
 Def = 5.38 m $k_p = 1.4$ Ann. F4.2
 qb = 7.04 MPa Ann. F4.2.1 Rb = 7.96 MN Ann. F4.1
 Rb;k = 6.29 MN Ann. C.2.6
 Rc;cr;k = 5.12 MN Chap 14.2.2
 Rc;d (ELU durables et transitoires) = 8.29 MN
 Rc;d (ELU accidentel) = 9.12 MN
 Rc;d (ELU sismique) = 8.29 MN
 Rc;cr;d (ELS caractéristiques) = 5.69 MN
 Rc;cr;d (ELS quasi-permanent) = 4.66 MN

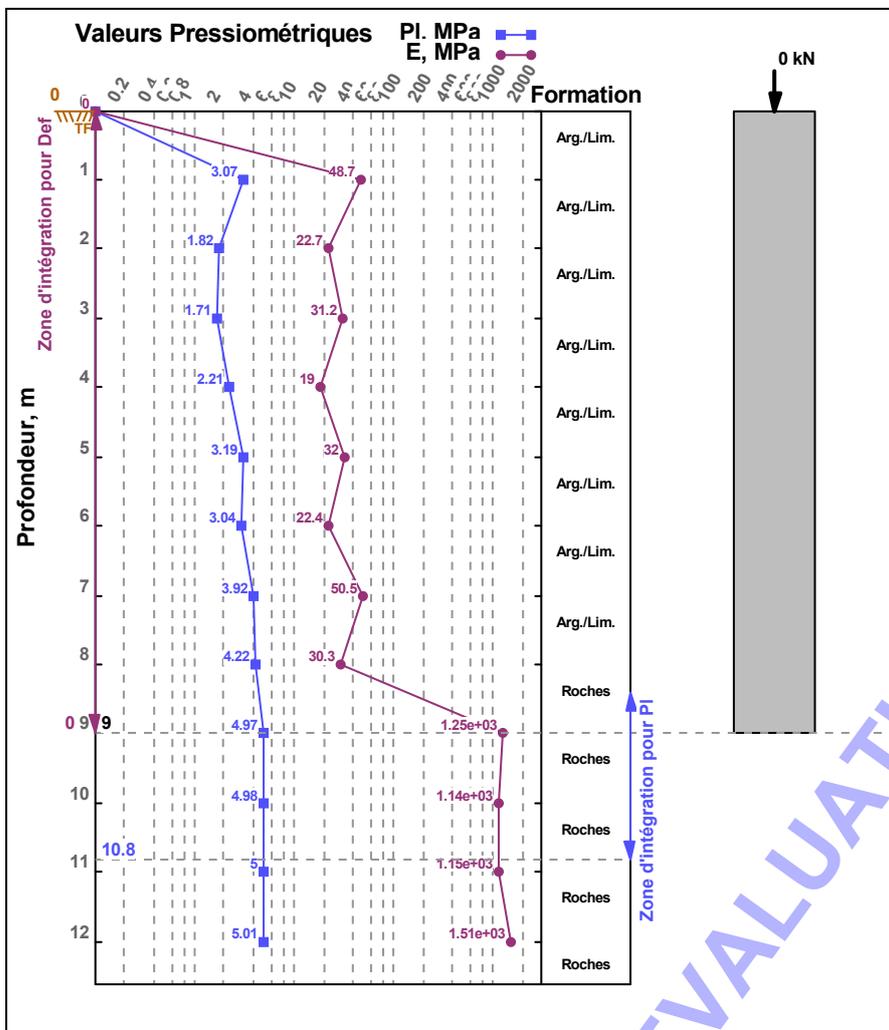
Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte qref = 0 MPa

Par la méthode de Frank & Zhao

q(11) = 7.04e+03 kPa
 qp(11) = 0 kPa
 q'u(11) = 0 kN

Tassement D = 0 mm



Pieu

Type de pieu : Foré boue (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 9 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

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

Fichier : SP3

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode de la NF P 94-262 : Modèle de terrain

Rs = 2.71 MN Ann. F.5
 Rs;k = 2.14 MN Chap 9.2.4
 Ple = 4.92 MPa Ann. F4.2.3 $k_{pmax} = 1.15$ Tab. F4.2.1
 Def = 5.21 m $k_p = 1.35$ Ann. F4.2
 qb = 6.85 MPa Ann. F4.2.1 Rb = 7.74 MN Ann. F4.1
 Rb;k = 6.12 MN Ann. C.2.6
 Rc;cr;k = 4.56 MN Chap 14.2.2
 Rc;d (ELU durables et transitoires) = 7.51 MN
 Rc;d (ELU accidentel) = 8.26 MN
 Rc;d (ELU sismique) = 7.51 MN
 Rc;cr;d (ELS caractéristiques) = 5.06 MN
 Rc;cr;d (ELS quasi-permanent) = 4.14 MN

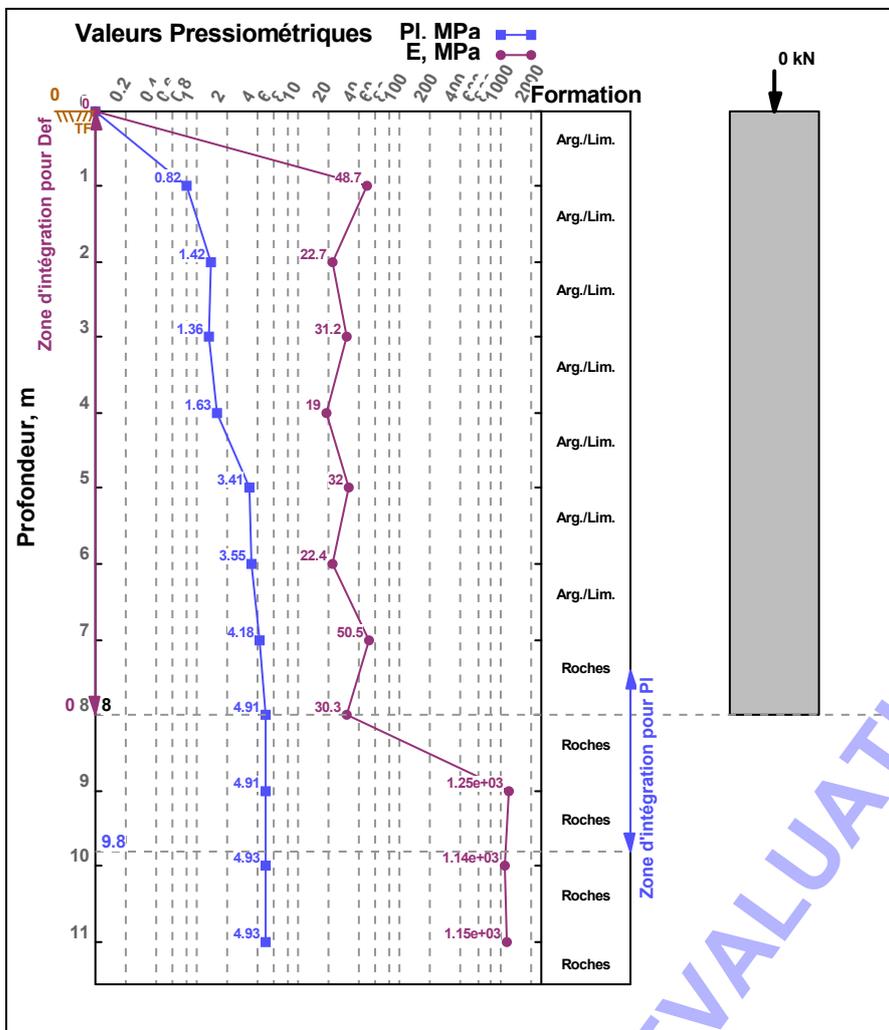
Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte $q_{ref} = 0$ MPa

Par la méthode de Frank & Zhao

$q_l(9) = 6.85e+03$ kPa
 $q_p(9) = 0$ kPa
 $q'_u(9) = 0$ kN

Tassement D = 0 mm



Pieu

Type de pieu : Foré boue (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 8 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 1 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

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

Fichier : SP4

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode de la NF P 94-262 : Modèle de terrain

Rs = 2.41 MN Ann. F.5
 Rs;k = 1.9 MN Chap 9.2.4
 Ple = 4.86 MPa Ann. F4.2.3 k_{pmax} = 1.15 Tab. F4.2.1
 Def = 3.88 m k_p = 1.25 Ann. F4.2
 qb = 6.27 MPa Ann. F4.2.1 Rb = 7.09 MN Ann. F4.1
 Rb;k = 5.61 MN Ann. C.2.6
 Rc;cr;k = 4.13 MN Chap 14.2.2
 Rc;d (ELU durables et transitoires) = 6.82 MN
 Rc;d (ELU accidentel) = 7.51 MN
 Rc;d (ELU sismique) = 6.82 MN
 Rc;cr;d (ELS caractéristiques) = 4.59 MN
 Rc;cr;d (ELS quasi-permanent) = 3.76 MN

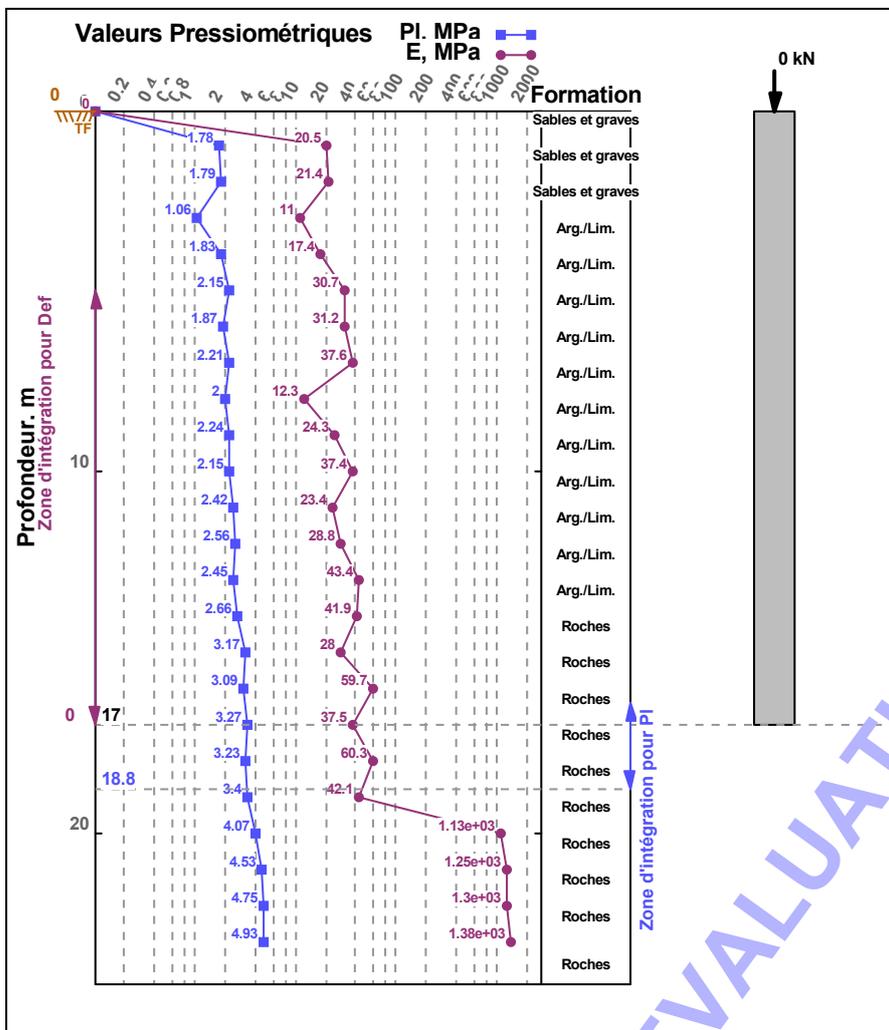
Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte q_{ref} = 0 MPa

Par la méthode de Frank & Zhao

q_l(8) = 6.27e+03 kPa
 q_p(8) = 0 kPa
 q_u(8) = 0 kN

Tassement D = 0 mm



Pieu

Type de pieu : Foré boue (pieux et barrettes)
 Prof. Base : 17 m
 Largeur B : 1.2 m
 Périmètre : 3.77 m ; aire : 1.13 m²
 Encastr. formation porteuse : 3 m
 mise en oeuvre sans refoulement du sol

Charge :

Trac (MN) Comp (MN)

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

Résultats de calcul : Capacité portante

Par la méthode de la NF P 94-262 : Modèle de terrain

Rs = 5.41 MN Ann. F.5
 Rs;k = 4.27 MN Chap 9.2.4
 Ple = 3.26 MPa Ann. F4.2.3 $k_{pmax} = 1.15$ Tab. F4.2.1
 Def = 9.07 m $k_p = 1.43$ Ann. F4.2
 qb = 4.72 MPa Ann. F4.2.1 Rb = 5.34 MN Ann. F4.1
 Rb;k = 4.22 MN Ann. C.2.6
 Rc;cr;k = 5.1 MN Chap 14.2.2
 Rc;d (ELU durables et transitoires) = 7.72 MN
 Rc;d (ELU accidentel) = 8.5 MN
 Rc;d (ELU sismique) = 7.72 MN
 Rc;cr;d (ELS caractéristiques) = 5.67 MN
 Rc;cr;d (ELS quasi-permanent) = 4.64 MN

Résultats de calcul : Tassement

Sous une contrainte $q_{ref} = 0$ MPa

Par la méthode de Frank & Zhao

$q(17) = 4.72e+03$ kPa
 $qp(17) = 0$ kPa
 $q'u(17) = 0$ kN

Tassement D = 0 mm

Annexe 9 : Lignes de codes

```
Function Infracol(ByVal KnownYs As Range, ByVal KnownXs As Range, NewX As Variant) As Variant
```

```
*****
'***DESCRIPTION : Fonction d'interpolation linéaire 2D qui sélectionne automatiquement *
'*** quelle plage interpoler en fonction de la plus proche *
'*** Valeur KnownX à la valeur NewX pour laquelle vous souhaitez interpoler. *
'***INPUT: KnownYs - Plage 1D contenant vos valeurs Y connues. *
'*** KnownXs - Plage 1D contenant vos valeurs X connues. *
'*** NewX - Cellule ou nombre avec la valeur X que vous souhaitez *
'*** interpoler pour. *
'***SORTIE : la sortie sera la valeur Y interpolée linéairement *
'*** correspondant à la valeur NewX sélectionnée par l'utilisateur. *
'***REMARQUES : je. Les éléments connus n'ont pas besoin d'être triés. Si les valeurs sont *
'*** non trié, la fonction effectuera une interpolation linéaire entre les *
'*** deux valeurs les plus proches de votre NewX (une au-dessus, une en-dessous). *
'*** ii. KnownXs et KnownYs doivent avoir les mêmes dimensions. C'est un *
'*** bonne pratique d'avoir les X et les Y correspondants à côté *
'*** les uns les autres dans Excel avant d'utiliser Infracol. *
'***FORMULE : Infracol=Y0 + (Y1-Y0)*(NouveauX-X0)/(X1-X0) *
'***EXEMPLE : =Infracol(A2:A4,B2:B4,C2) *
*****
```

```
-----
'0. Declare Variables and Initialize Variables
-----
```

```
Dim bYRows As Boolean      'Y values are selected in a row (Nx1)
Dim bXRows As Boolean      'X values are selected in a row (Nx1)
Dim DeltaHi As Double     'delta between NewX and KnownXs if Known > NewX
Dim DeltaLo As Double     'delta between NewX and KnownXs if Known < NewX
Dim iHi As Long           'Index position of the closest value above NewX
Dim iLo As Long           'Index position of the closest value below NewX
Dim i As Long             'dummy counter
Dim Y0 As Double, Y1 As Double 'Linear Interpolation Y variables
Dim X0 As Double, X1 As Double 'Linear Interpolation Y variables
iHi = 2147483647
iLo = -2147483648#
DeltaHi = 1.79769313486231E+308
DeltaLo = -1.79769313486231E+308
```

```
-----
'I. Preliminary Error Checking
-----
```

```
'Error 0 - catch all error
On Error GoTo InterpError:
'Error 1 - NewX more than 1 cell selected
If IsArray(NewX) = True Then
    If NewX.Count <> 1 Then
        Infracol = "Too many cells in variable NewX."
        Exit Function
    End If
End If

'Error 2 - NewX is not a number
If IsNumeric(NewX) = False Then
    Infracol = "NewX isnon-numeric."
```

```
Exit Function
End If

'Error 3 - dimensions aren't even
If KnownYs.Count <> KnownXs.Count Or
KnownYs.Rows.Count <> KnownXs.Rows.Count Or
KnownYs.Columns.Count <> KnownXs.Columns.Count Then
    Infracol = "Known ranges are different dimensions."
    Exit Function
End If

'Error 4 - known Ys are not Nx1 or 1xN dimensions
If KnownYs.Rows.Count <> 1 And KnownYs.Columns.Count <> 1 Then
    Infracol = "Known Y's should be in a single column or a single row."
    Exit Function
End If

'Error 5 - known Xs are not Nx1 or 1xN dimensions
If KnownXs.Rows.Count <> 1 And KnownXs.Columns.Count <> 1 Then
    Infracol = "Known X's should be in a single column or a single row."
    Exit Function
End If

'Error 6 - Too few known Y cells
If KnownYs.Rows.Count <= 1 And KnownYs.Columns.Count <= 1 Then
    Infracol = "Known Y's range must be larger than 1 cell"
    Exit Function
End If

'Error 7 - Too few known X cells
If KnownXs.Rows.Count <= 1 And KnownXs.Columns.Count <= 1 Then
    Infracol = "Known X's range must be larger than 1 cell"
    Exit Function
End If

'Error 8 - Check for non-numeric KnownYs
If KnownYs.Rows.Count > 1 Then
    bYRows = True
    For i = 1 To KnownYs.Rows.Count
        If IsNumeric(KnownYs.Cells(i, 1)) = False Then
            Infracol = "One or all Known Y's are non-numeric."
            Exit Function
        End If
    Next i
ElseIf KnownYs.Columns.Count > 1 Then
    bYRows = False
    For i = 1 To KnownYs.Columns.Count
        If IsNumeric(KnownYs.Cells(1, i)) = False Then
            Infracol = "One or all KnownYs are non-numeric."
            Exit Function
        End If
    Next i
End If
```

```
'Error 9 - Check for non-numeric KnownXs
```

```
If KnownXs.Rows.Count > 1 Then
```

```
  bXRows = True
```

```
  For i = 1 To KnownXs.Rows.Count
```

```
    If IsNumeric(KnownXs.Cells(i, 1)) = False Then
```

```
      Infracol = "One or all Known X's are non-numeric."
```

```
      Exit Function
```

```
    End If
```

```
  Next i
```

```
ElseIf KnownXs.Columns.Count > 1 Then
```

```
  bXRows = False
```

```
  For i = 1 To KnownXs.Columns.Count
```

```
    If IsNumeric(KnownXs.Cells(1, i)) = False Then
```

```
      Infracol = "One or all Known X's are non-numeric."
```

```
      Exit Function
```

```
    End If
```

```
  Next i
```

```
End If
```

```
'-----  
'II. Check for nearest values from list of Known X's  
'-----
```

```
If bXRows = True Then 'check by rows
```

```
  For i = 1 To KnownXs.Rows.Count 'loop through known Xs
```

```
    If KnownXs.Cells(i, 1) <> "" Then
```

```
      If KnownXs.Cells(i, 1) > NewX And KnownXs.Cells(i, 1) - NewX < DeltaHi Then 'determine DeltaHi
```

```
        DeltaHi = KnownXs.Cells(i, 1) - NewX
```

```
        iHi = i
```

```
      ElseIf KnownXs.Cells(i, 1) < NewX And KnownXs.Cells(i, 1) - NewX > DeltaLo Then 'determine DeltaLo
```

```
        DeltaLo = KnownXs.Cells(i, 1) - NewX
```

```
        iLo = i
```

```
      ElseIf KnownXs.Cells(i, 1) = NewX Then 'match. just report corresponding Y
```

```
        Infracol = KnownXs.Cells(i, 1)
```

```
        Exit Function
```

```
      End If
```

```
    End If
```

```
  Next i
```

```
Else ' check by columns
```

```
  For i = 1 To KnownXs.Columns.Count 'loop through known Xs
```

```
    If KnownXs.Cells(1, i) <> "" Then
```

```
      If KnownXs.Cells(1, i) > NewX And KnownXs.Cells(1, i) - NewX < DeltaHi Then 'determine DeltaHi
```

```
        DeltaHi = KnownXs.Cells(1, i) - NewX
```

```
        iHi = i
```

```
      ElseIf KnownXs.Cells(1, i) < NewX And KnownXs.Cells(1, i) - NewX > DeltaLo Then 'determine DeltaLo
```

```
        DeltaLo = KnownXs.Cells(1, i) - NewX
```

```
        iLo = i
```

```
      ElseIf KnownXs.Cells(1, i) = NewX Then 'match. just report corresponding Y
```

```
        Infracol = KnownXs.Cells(1, i)
```

```
        Exit Function
```

```
      End If
```

```
    End If
```

```
  Next i
```

```
End If
```

```
'-----  
'III. Linear interpolate based on the closest cells in the range. Includes minor error handling  
'-----
```

```
If iHi = 2147483647 Or iLo = -2147483648# Then  
    Infrapol = "NewX is out of range. Cannot linearly interpolate with the given Knowns."  
    Exit Function  
End If  
If bXRows = True Then  
    Y0 = KnownYs.Cells(iLo, 1)  
    Y1 = KnownYs.Cells(iHi, 1)  
    X0 = KnownXs.Cells(iLo, 1)  
    X1 = KnownXs.Cells(iHi, 1)  
Else  
    Y0 = KnownYs.Cells(1, iLo)  
    Y1 = KnownYs.Cells(1, iHi)  
    X0 = KnownXs.Cells(1, iLo)  
    X1 = KnownXs.Cells(1, iHi)  
End If  
Infrapol = Y0 + (Y1 - Y0) * (NewX - X0) / (X1 - X0)  
Exit Function
```

```
'-----  
'IV. Final Error Handling  
'-----
```

```
InterpError:  
    Infrapol = "Error Encountered: " & Err.Number & ", " & Err.Description  
End Function
```

```
Public Function Kp_sol(Classe_sol As String, Exe As String) As Double
```

```
'Catégorie Argiles Limons
```

```
'Classe A
```

```
  If Classe_sol = "Argiles, limons A" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1.1
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Argiles, limons A" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 1.4
```

```
  End If
```

```
'Classe B
```

```
  If Classe_sol = "Argiles, limons B" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1.2
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Argiles, limons B" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 1.5
```

```
  End If
```

```
'Classe C
```

```
  If Classe_sol = "Argiles, limons C" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1.3
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Argiles, limons C" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 1.6
```

```
  End If
```

```
'Catégorie Sables Graves
```

```
'Classe A
```

```
  If Classe_sol = "Sables, Graves A" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Sables, Graves A" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 4.2
```

```
  End If
```

```
'Classe B
```

```
  If Classe_sol = "Sables, Graves B" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1.1
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Sables, Graves B" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 3.7
```

```
  End If
```

```
'Classe C
```

```
  If Classe_sol = "Sables, Graves C" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1.2
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Sables, Graves C" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 3.2
```

```
  End If
```

```
'Catégorie Craies
```

```
'Classe A
```

```
  If Classe_sol = "Craies A" And Exe = "non" Then
```

```
    Kp_sol = 1.1
```

```
  End If
```

```
  If Classe_sol = "Craies A" And Exe = "oui" Then
```

```
    Kp_sol = 1.6
```

```
End If
'Classe B
If Classe_sol = "Craies B" And Exe = "non" Then
    Kp_sol = 1.4
End If
If Classe_sol = "Craies B" And Exe = "oui" Then
    Kp_sol = 2.2
End If
```

```
'Classe C
If Classe_sol = "Craies C" And Exe = "non" Then
    Kp_sol = 1.8
End If
If Classe_sol = "Craies C" And Exe = "oui" Then
    Kp_sol = 2.6
End If
```

```
'Catégorie Marnes, Marno Calcaires
```

```
If Classe_sol = "Marnes, Marno calcaire A" Or Classe_sol = "Marnes, Marno calcaire B" And Exe = "non" Then
    Kp_sol = 1.8
End If
If Classe_sol = "Marnes, Marno calcaire A" Or Classe_sol = "Marnes, Marno calcaire B" And Exe = "oui" Then
    Kp_sol = 2.6
End If
```

```
'Catégorie Roches
```

```
If Classe_sol = "Roches A" Or Classe_sol = "Roches B" And Exe = "non" Then
    Kp_sol = 1.1
End If
If Classe_sol = "Roches A" Or Classe_sol = "Roches B" And Exe = "oui" Then
    Kp_sol = 1.8
End If
```

```
End Function
```

```
Function qsi(n As Double, P1 As Double) As Double
    Dim qsn As Double
    Dim Pn As Double

    qsn = 0.04 * n
    Pn = 1 + 0.5 * n

    If n < 5 And P1 / Pn <= 1 Then
        qsi = qsn * (P1 / Pn) * (2 - (P1 / Pn))
    End If

    If n < 5 And P1 / Pn >= 1 Then
        qsi = qsn
    End If

    If n = 5 And P1 >= 0.2 Then
        qsi = WorksheetFunction.Min(((P1 - 0.2) / 9), ((P1 + 0.33) / 32))
    End If

    If n = 6 And P1 >= 1 Then
        qsi = WorksheetFunction.Min(((P1 + 0.4) / 10), ((P1 + 4) / 30))
    End If

    If n = 7 And P1 >= 1 Then
        qsi = (P1 + 0.4) / 10
    End If

End Function
```

```
Function n_courbe(QN As String) As Double
    If QN = "Q1" Then
        n_courbe = 1
    End If
    If QN = "Q2" Then
        n_courbe = 2
    End If
    If QN = "Q3" Then
        n_courbe = 3
    End If
    If QN = "Q4" Then
        n_courbe = 4
    End If
    If QN = "Q5" Then
        n_courbe = 5
    End If
    If QN = "Q6" Then
        n_courbe = 6
    End If
    If QN = "Q7" Then
        n_courbe = 7
    End If
End Function
```

Module10 - 2

End Function