

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة 1

UNIVERSITE DE BLIDA 1



Faculté de Technologie

Département De Génie Civil

**MEMOIRE DE MASTER**

Option : Géotechnique

**Thème**

**Comparaison Technico-Economique entre deux Types  
de Fondations Profondes (Pieux Forés et Pieux Battus)**

**D'un Pont Routier - Approche Analytique.**

Etudié par :  
**GUERAINI Sihem**  
**NEDJAR Hadjer**

Proposé et Encadré par :  
**Dr M.ABDESSEMED**

---

Promotion 2022

---

## ملخص :

يتمثل العمل المنجز في هذه الأطروحة هو إجراء مقارنة بين نمطين من الأساس العميق (وتد حفر و وتد مدفوعة) من الناحيتين التقنية والاقتصادية لجسر العبور. اعتمدنا في بحثنا على تقرير جيوتقني ونتائج مدروسة استخدمت هذه المعطيات في حساب قدرة تحمل الركائز للأسس العميقة بهدف التحقق من ثبات الوتد. ومن أجل تجسيد الصيغ الرياضية قمنا باستخدام النموذج العددي ماتلاب من خلال إجراء عمليات المحاكاة و الخوارزميات المدروسة حسابيا. سمحت لنا هذه الدراسة بمقارنة من الناحية التقنية والاقتصادية بين الحالتان المدروستان من الاوتاد بان الاختيار الأمثل يقع على وتد حفر من أجل انشاء الجسور.

**كلمات مفتاحية:** الجسر. الأساس العميق. وتد حفر. وتد مدفوعة. قدرة تحمل. تحليلات. ماتلاب. مقارنة

---

## Résumé :

Le travail réalisé dans ce mémoire, consiste à faire une comparaison technico-économique entre deux types de fondations profondes telles que : les pieux forés et les pieux battus d'un pont routier. A cet effet, sur la base d'un rapport géotechnique et des résultats établis (capacité portante des pieux), nous avons fait un calcul numérique basé sur des formules et des expressions appliquées afin de vérifier les deux critères, qui sont la stabilité et le cout. Les données de cette étude sont introduites dans le logiciel MATLAB, qu'est un environnement de programmation orienté pour les simulations numériques. Les résultats montrent clairement que la stabilité ainsi que l'économie sont mieux vérifiées dans le cas des pieux forés par rapport aux pieux battus.

**Mots clés :** pont, fondation profonde, pieu foré, pieu battu, capacité portante, analytique, Matlab, comparaison.

---

## Abstract:

The work carried out in this thesis, consists in making a technical and economic comparison between two types of deep foundations such as: bored piles and driven piles of a road bridge. For this purpose, on the basis of a geotechnical report and the established results (bearing capacity of the piles), we made a numerical calculation based on formulas and expressions applied in order to verify the two criteria which are the stability and the cost. The data of this study are introduced into the MATLAB software, which is a programming environment oriented for numerical simulations. The results show clearly that the stability as well as the economy are better verified in the case of bored piles compared to driven piles.

**Key words:** bridge, deep foundation, bored pile, driven pile, bearing capacity, analytical, Matlab, comparison.

## *Remerciements*

En tout premier lieu, on remercie Le Bon Dieu, Tout Puissant, de nous a donné la santé et la force pour survivre, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés. Au nom du Dieu le Clément et le Miséricordieux, louange à ALLAH le Tout Puissant.

Ce mémoire, ne serait point aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de notre encadreur Dr. Mouloud ABEDSSEMED, Enseignant Chercheur, à l'Université de Blida1/ Département de Génie Civil, que nous présentons toutes nos gratifications par la qualité, l'assiduité, la rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Nous remercions tous les membres du jury, d'avoir accepté d'évaluer et d'examiner notre travail. Ca sera un grand honneur, pour nous, de juger le contenu de ce mémoire.

Nos sincères remerciements à nos enseignements de notre cursus universitaire du département génie civil, pour leurs dévouements, persévérance dont ils ont su faire preuve, malgré les conditions sanitaires difficiles vécues.

Un grand merci aux cadres de l'organisme CTTTP/ Kouba, en l'occurrence (Tabani, Mounira, Islame, Saifeddine, Omar et Hamid), de nous avoir aidé et soutenus dans la partie pratique.

GUERAINI SIHEM

NEDJAR HADJER

# Dédicace



Je dédie ce modeste travail à :

En ce moment qui constitue un tournant particulièrement important de ma jeunesse, mes sentiments, et mes premières pensées vont vers mes très chers parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler, que Dieu Le Tout Puissant, leur procure bonne santé et longue vie.

Je leur témoigne par cette consécration toute ma gratitude et ma profonde affection.

J'estime énormément qui m'a soutenue tout au long de ce projet être même.

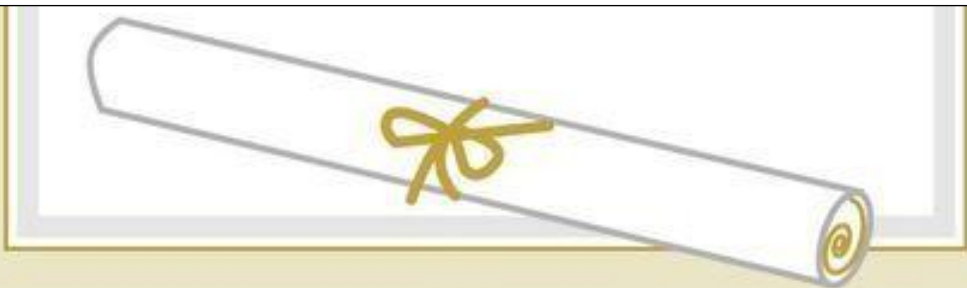
A mes chers frères : « Abderrahmane » et « Islam ».

A mes chères sœurs : « Imèn » et « Maria ».

A vous tous, qui m'ont encouragé sans trêve et qui ont contribué pour que ce projet de mémoire soit possible et réussi. Je vous dis merci.

Merci profondément à toute ma famille.

**GUERAINI Sihem**



# Dédicace



Tout d'abord, je tiens à remercier Le Bon Dieu, Le Tout Puissant, qui m'a donné la santé, le courage et la foi pour arriver à ce jour.

Je dédie ce mémoire a la plus belle créature au monde : «**ma mère** » et « mon père », qui ont toujours cru en moi et ont mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études. Mes modèles de labeur et de persévérance.

A mes frères que j'aime : « Rafik, Rahil et Salim ».

A une personne unique au monde, mon âme sœur qui m'a soutenu dans les moments difficiles : « Sarah ».

A ma grande famille qui m'a soutenu : « mes grand parents, mes tantes, mes oncles, mes cousins et mes cousines ».

Mes chères amis : Hind, Amira ,yousra , Aycha et khawla.

A ma binôme « Sihem » qui était ma sœur durant tout le cycle d'étude.

A tous mes collègues de la promotion 2022 et mes copains.

NEDJAR Hadjer



## Table des matières

**Résumer**

**Remerciement**

**Dédicace**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

### **INTRODUCTION GENERALE**

I Introduction.....	I
---------------------	---

### **CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

I.1 Généralités.....	1
I.1.1 Préambule.....	1
I.1.2 Historique des ponts.....	1
I.1.3 Définitions et littérature des ponts.....	2
I.1.3.1 Définition d'un pont.....	2
I.1.3.2 Composition d'une structure des ponts.....	2
I.1.3.3 Critère de classification des ponts.....	4
I.1.4 Les ponts les plus spectaculaires au monde.....	12
I.2 Fondations des ponts.....	15
I.2.1 Définition de la fondation.....	15
I.2.2 Critères de choix de la fondations des ponts.....	15
I.2.3 Différents types de fondation des ponts.....	15
I.2.4 Classification des fondations sur pieux.....	19
I.2.5 Contrôle d'une fondation profonde.....	20
I.3 Les types de pieux de fondation des.....	20
I.3.1 Classification des pieux.....	20
I.3.2 Selon la nature du matériau constitutif.....	21
I.3.3 Principe de fonctionnement d'une fondation profonde.....	21
I.3.4 Définition les pieux.....	22
I.3.4.1 Rôle des pieux.....	22
I.3.5 Les différentes catégories de pieux.....	22
I.3.6 Critères influencent le choix de la technique de réalisation de pieu.....	29
I.3.7 Les avantages de construction sur pieux.....	30
I.3.8 Les inconvénients de construction sur pieux.....	30

## **CHAPITRE II : METHODES D'ANALYSES ET DE CALCUL**

II.1 Introduction.....	31
II.2 Méthodes numériques.....	31
II.2.1 Méthodes des élément discrets.....	31
II.2.2 Méthodes des différences finies.....	31
II.2.3 Méthode des volumes finis.....	31
II.2.4 Intégration numérique.....	32
II.2.5 Méthode des éléments finis.....	32
II.2.5.1 Domaine d'application.....	32
II.2.5.2 Étapes du calcul des éléments finis.....	32
II.3 Méthodes analytiques.....	34
II.3.1 Modèle mathématique.....	34
II.3.2 Méthode de dérivés partiels.....	34
II.4 Principe de calcul des fondations profondes.....	35
II.4.1 Principe de calcul fondation profonde.....	35
II.4.2 Analyse limite.....	35
II.4.3 Application numérique sur les pieux verticaux.....	36
II.4.3.1 Capacité portant verticale.....	37
II.4.3.2 Calcul la capacité portante verticale d'un pieu isolé.....	37
II.4.3.3 Frottement négatif dans des pieux.....	37
II.5 Modélisation numérique de pieu isolé en éléments finis (EF).....	37
II.5.1 Considération générales dans le calcul de la fondation profonde.....	38
II.5.2 Considérations relative au calcul.....	38
II.5.3 Calcul des pieux sous un chargement axial.....	38
II.5.4 Tassement du pieu isolé.....	39
II.5.5 La capacité portant d'un pieu isolé sous charge axial.....	39
II.5.6 Pieu isolé sous charge latérale.....	39
II.5.7 Différents logiciels de calcul des pieux battu et forés.....	40
II.6 Choix du logiciel approprié et phases de calcul.....	41
II.6.1 Définition logiciel MATLAB.....	41
II.6.2 Les avantages et l'inconvénient du MATLAB.....	42

## **CHAPITRE III : APPLICATION ET CAS D'ETUDE**

III.1 Introduction.....	44
III.2 Etude de la culée.....	44

III.2.1 Introduction.....	44
III.2.2 Etude déferente étape de la culée.....	44
III.3 Etude de la pile.....	52
III.3.1 Introduction.....	52
III.3.2 Etude déferente étape de la pile.....	52

#### **CHAPITRE IV : ORGANIGRAMME ET CALCUL SUR MATLAB**

IV.1 Préambule.....	59
IV.2 Organigramme de calcul.....	59
IV.3 Listing du programme sur Matlab.....	62
IV.4 Comparaison des résultats et discussion.....	65

#### **CONCLUSION GENERALE**



## LISTE DES FIGURES

N°	<i>Titre de la figure</i>	<i>page</i>
Figure I.1	Illustration de Macel Prade ‘ ‘ 1er pont ‘ ‘ .....	1
Figure I.2	Composantes d’un pont.....	3
Figure I.3	Pont-route.....	4
Figure I.4	Pont-rail.....	5
Figure I.5	Pont pour canaux.....	5
Figure I.6	Pont-aqueduc.....	6
Figure I.7	Pont pour piétons et cycliste.....	6
Figure I.8	Pont aéroportuaire (avion).....	6
Figure I.9.	Pont droit.....	7
Figure I.10	Pont courbe.....	7
Figure I.11	Pont biais.....	7
Figure I.12	Pont en bois.....	8
Figure I.13	Pont en maçonnerie.....	8
Figure I.14	Pont métallique (fonte, fer, acier).....	9
Figure I.15	Pont en béton armé.....	9
Figure I.16	Pont en béton précontraint.....	9
Figure I.17	Pont mixte.....	10
Figure I.18	Les ponts en voûtes.....	10
Figure I.19	Les ponts poutres.....	11
Figure I.20	Les Pont en caisson.....	11
Figure I.21	Pont dalle.....	11
Figure I.22	Pont haubané.....	12
Figure I.23	Le pont Henderson Waves.....	12
Figure I.24	Le pont Cheikh-Zayed.....	13
Figure I.25	Pont Zubizuri.....	13
Figure I.26	Le pont des chaînes.....	13
Figure I.27	Puente de la Mujer.....	14
Figure I.28	Le pont Juscelino Kubitschek.....	14

Figure I.29 Le pont Seri Wawasan.....	14
Figure I.30 Déférant type de fondation.....	15
Figure I.31 Différents types de fondation superficielle.....	16
Figure I.32 Les semelles isolées.....	16
Figure I.33 Les semelles filantes.....	16
Figure I.34 Les radiers ou dallage.....	17
Figure I.35 Fondation semi-profonde.....	17
Figure I.36 Fondation profonde.....	18
Figure I.37 Puits avec une base élargi.....	18
Figure I.38 Pieux barrettes.....	19
Figure I.39 Organigramme de classification.....	21
Figure I.40 L'effort de pointe.....	21
Figure I.41 Frottement latéral.....	21
Figure I.42 Résistance des pieux.....	22
Figure I.43 Pieu battu préfabriqué.....	23
Figure I.44 Phases de réalisation de pieu battu préfabriqué.....	23
Figure I.45 Pieu métallique battu.....	24
Figure I.46 Phases de réalisation de Pieu battu pilonné .....	24
Figure I.47 Pieu battu moulé.....	25
Figure I.48 Phases de réalisation de Pieu battu moulé.....	25
Figure I.49 Phases de réalisation de Pieu vissé moulé.....	26
Figure I.50 Phases de réalisation de Pieux forés simple (forage sans blindage).....	26
Figure I.51 Phases de réalisation de Pieu foré tubé.....	27
Figure I.52 Phases de réalisation de Pieux forés à la boue.....	27
Figure I.53 Pieu à la tarière creuse.....	27
Figure I.54 Pieu Puits.....	28
Figure I.55 Micropieux .....	28
Figure I.56 Phases de réalisation de Micropieux.....	29
Figure II.1 Organigramme générale d'un code de calcul.....	33
Figure II.2 Schéma représentant les liens différents.....	35
Figure II.3 logo du logiciel Matlab.....	42

Figure III.1 Schéma de la culée.....	44
Figure III.2 Coupes A.A et BB des poutres du tablier du pont.....	47
Figure III.3 Répartition des pieux forés dans la semelle/culée.....	51
Figure III.4 Schéma de la pile.....	52
Figure III.5 Répartition des pieux forés dans la semelle/pile.....	56
Figure III.6 Répartition des pieux battu dans la semelle/culée.....	57
Figure III.7 Répartition des pieux battu dans la semelle/pile.....	58
Figure IV.1 Organigramme de calcul des pieux.....	61

## LISTE DES TABLEAUX

N°	<i>Titre de la figure</i>	<i>page</i>
	Tableau I.1 Classification des pieux.....	19
	Tableau III.1 Détails de calcul du poids propre (culée).....	46
	Tableau III.2 Résumé des valeurs trouvé.....	47
	Tableau III.3 Valeurs dues aux surcharges.....	50
	Tableau III.4 Détails des valeurs trouvées.....	53
	Tableau III.5 Valeurs dues aux surcharges.....	55
	Tableau III.6 Valeurs dues aux surcharges permanentes.....	55



# **Introduction générale**

## Introduction Générale

Les ponts existent sous tous les aspects et dans toutes les tailles. Ils sont indispensables pour joindre les communautés et dynamiser la vie quotidienne, ainsi par leurs caractéristiques dimensionnelles, que par leur intérêt architectural. La fonction primordiale d'un pont est de permettre le franchissement d'un obstacle pour assurer la continuité d'une voie de communication (vallée, cours d'eau, voie routière).

L'ouvrage d'une manière générale sont exposé aux risques majeurs (séismes, inondations, glissements, incendies...etc). Pour cela, il faut toujours faire des études géotechniques fiables et adéquates, afin de garantir leur stabilité et leur sécurité.

L'objet de ce mémoire, est de comparer deux types de fondation profonde d'un pont routier, sollicité par différents types de surcharges routières. On établira un calcul analytique, en prenant un cas d'étude réel, se situe à Alger, avec différentes variantes, selon le type de fondation choisi.

Après une Introduction générale, on propose quatre chapitres comme suit :

Dans le chapitre 1, on présente une synthèse bibliographique, contexte de notre étude, ainsi que des généralités sur les ponts, leurs composants et les principaux types de fondations. On exposera les paramètres de choix et les hypothèses d'application.

Pour le chapitre 2, on présentera les méthodes d'analyses (numériques et analytiques). On entamera la présentation du logiciel utilisé pour le calcul analytique.

Concernant le chapitre 3, on prendra le cas d'étude réel d'un pont routier, dans la conception été établie par le CTTP, pour le calcul des deux type de fondation profonde (pieux fores et battus).

Dans le chapitre 4, on interprétera les résultats trouvés avec la comparaison technico-économique entre les différentes variantes proposées.

On achèvera le contenu du mémoire par une conclusion générale et des recommandations pour les futures recherches.



# **Chapitre I : synthèse bibliographique**

## Synthèse Bibliographique

### I. 1. Généralités

#### I.1.1. Préambule

Depuis presque un siècle, le domaine de la construction des ponts a été marqué par une évolution rapide et importante des techniques tant au plan de la conception que des matériaux et de l'exécution. La conception et l'étude d'un pont dépend de plusieurs facteurs d'ordre naturel et fonctionnel liés au site de construction. Le développement incessant de l'outil informatique et des matériaux de construction nous offre aujourd'hui un large éventail quant au choix et l'étude d'une esquisse convenable d'un ouvrage. De plus, l'aspect technique et économique d'un projet doit être minutieusement étudié tout en préservant un cachet esthétique acceptable. Les fondations sont des ouvrages qui assurent la stabilité d'une construction, ainsi que la bonne transmission des sollicitations (charges) et leur diffusion dans le sol. Dans ce chapitre, nous allons présenter une généralité sur les ponts et la fondation des ponts [1].

#### I.1.2. Historique des ponts

Un jour un « homme » trouva un arbre tombé en travers d'un cours d'eau. Tout naturellement, il grimpa dessus et atteignit ainsi la rive opposée. Ce fut sans doute, la première réflexion du premier « pont » (Fig. I.1).

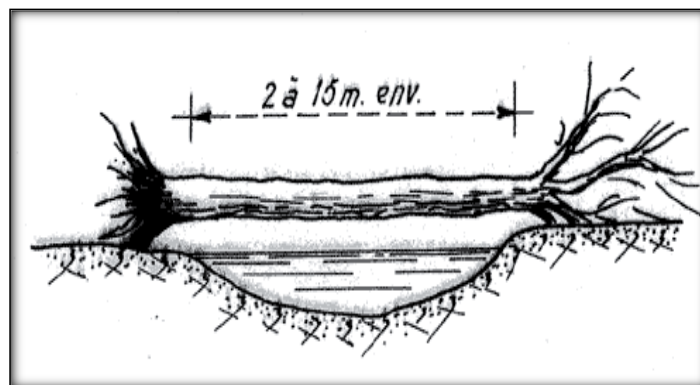


Figure I.1. Illustration de Macel Prade "1er pont" [2]

L'idée avait pour objectifs :

- Pourchassant un gibier, poursuivant ou fuyant un ennemi, nos plus lointains ancêtres ont été confrontés à la traversée d'une rivière. Pendant des millénaires, le problème resta sans solution. Petit à petit, les gués furent reconnus, des pistes y aboutirent, permettant l'agrandissement des territoires de chasse et l'extension des zones de cueillette.
- Un jour un "homme" trouva un arbre tombé en travers d'un cours d'eau. Tout naturellement, il grimpa dessus et atteignit ainsi la rive opposée. Ce fut sans doute le premier "pont".
- Aux environs du Ve millénaire avant J.-C, durant la période Néolithique, les homos sapiens d'alors quittent les cavernes pour de véritables habitations, groupées en villages sur la terre ferme ou, au contraire, édifiées sur pilotis au bord des lacs. Ces cités lacustres sont reliées à la terre ferme par de frustes passerelles faites de perches



assemblées les unes aux autres par des fibres végétales ou des boyaux frais de bœuf ou de mouton qui se contractent en séchant, assurant ainsi la solidité des assemblages.

- Vers la fin du III<sup>e</sup> millénaire, avec l'âge de bronze, l'outillage s'améliore et se diversifie. La voûte en encorbellement naît en Égypte, au temps des Pyramides. Les gués surélevés datent peut-être de cette époque.
- La véritable voûte est beaucoup plus tardive. D'après Diodore de Sicile et Strabon, elle aurait été inventée au Ve siècle (av. J.-C) par Démocrite d'Abdère, mais les Étrusques en ont probablement eu l'idée avant.

En résumé :

- Les ponts de bois sont vraisemblablement apparus au Néolithique.
- Les ponts de pierre, simples dalles posées sur des pierres debout, et les voûtes en encorbellement sont contemporains de l'âge du bronze.
- La véritable voûte est utilisée en Grèce dès le III<sup>e</sup> siècle avant notre ère [2].

### I.1.3. Définitions et littérature des ponts

#### I.1.3.1. Définition d'un pont

Un pont est un ouvrage destiné à mettre en communication deux points séparés par un obstacle ou permettant le passage sans croisement à niveau de deux courants de circulation. En technique, nous disons qu'un pont est un ouvrage lancé ou jeté pour permettre le franchissement d'un obstacle naturel ou artificiel : (vallée, rivière, canal de navigation, canal d'irrigation, une dépression, une zone d'inondation, une zone marécageuse, un lac, un bras de mer et d'autres.) Voies de communication [1].

#### I.1.3.2. composition d'une structure des ponts

Les ponts comprennent essentiellement des éléments porteurs constitués par les poutres principales, les arcs, les câbles (éléments porteurs principaux). Les entretoises ; les pièces de pont, les longerons qui servent à répartir les charges entre les éléments porteurs principaux, qui les transmettent aux appuis qui les transmettent au sol par les fondations. Les Éléments principaux d'un pont : Un pont comporte généralement quatre catégories d'éléments : les appuis, le tablier, les appareils d'appui, et la fondation.

- a) Appuis :** Ils supportent l'ouvrage jusqu'au niveau des fondations. On distingue deux types d'appuis : les culées, qui sont les appuis extrêmes, et les piles, qui sont les appuis intermédiaires. Un appui peut être composé par un ou plusieurs voiles ou par des colonnes surmontées par un chevet.
- b) Tablier :** C'est un élément sur lequel repose la voie de circulation. Il comprend la couverture (revêtement) et la partie de l'ossature sensiblement horizontale située sous la voie portée. Le tablier comporte essentiellement des dalles. En plus, il peut comporter des poutres principales et des éléments secondaires (des entretoises ou pour les plus anciens ponts des longerons). Le tablier comporte aussi tous les équipements indispensables à l'utilisation, au fonctionnement et à la durabilité du pont. Ces équipements comportent les dispositifs de retenue (tel que les gardes corps et les séparateurs), les joints de chaussée, les systèmes d'étanchéité, la couche de roulement, les trottoirs, les corniches, les systèmes d'évacuation des eaux, la dalle de transition, etc.
- c) Les appareils d'appui :** Le tablier repose sur les appuis à l'aide des appareils d'appui qui permettent le déplacement horizontal et vertical du tablier sous l'effet des charges. Un pont est souvent lié à la route par sa rampe d'accès, si cette rampe est en remblai,

elle comporte une dalle de transition, si la rampe est en déblai, la dalle de transition n'est pas nécessaire.

- d) **Fondation** : C'est un système au moyen duquel l'ouvrage repose sur le sol et lui transmet les charges qu'il reçoit [1].

#### \* Composition de l'infrastructure

La fondation est la partie inférieure d'une construction, qui permet de répartir son poids sur le sol de manière homogène, sans provoquer de tassements différents d'un point à l'autre de la surface, et d'éviter ainsi des dégâts importants. Le choix des techniques de fondation d'un bâtiment est donc primordial, notamment quand le sol n'est pas stable. On peut définir les fondations comme étant :

- ✓ Superficielle si le rapport (la fiche/largeur de la base)  $D/B < 4$ .
- ✓ Profondes si le rapport (la fiche/largeur de la base)  $D/B > 10$ .
- ✓ Semi-profondes si le rapport (la fiche/largeur de la base)  $4 \leq D/B \leq 10$ .

NB : si  $D/B$  le rapport (la fiche/largeur de la base) augmente, le prix de la réalisation (le coût) augmente aussi [1].

D : La fiche est la profondeur minimale de la base par rapport à la surface du sol après travaux de fondation (terrassement, décapage d'un remblai). Conception et calcul de l'ouvrage géotechnique

#### \* Composition de la superstructure

Elle est composée principalement du tablier, structure sur laquelle se fait le déplacement à niveau.

- a) **Le tablier** : le tablier est composé d'une dalle en béton armé ou en béton précontraint est la partie quasi horizontale située sous la voie portée : il comprend les éléments porteurs dans le cas des ponts à poutre ou est supportée par eux dans le cas des ponts en arc ou des ponts à câbles. La couverture ou platelage est la partie supérieure du tablier destinée à supporter les efforts dû à la circulation (dalle en béton, dalle orthotrope etc.).
- b) **La dalle** : La dalle ou hourdis sert d'élément de couverture ; c'est elle qui reçoit la couche de roulement de la chaussée et les surcharges des véhicules. Outre celui de couverture, le rôle de la dalle est de transmettre les charges permanentes et les surcharges poutres, les longerons et les entretoises.

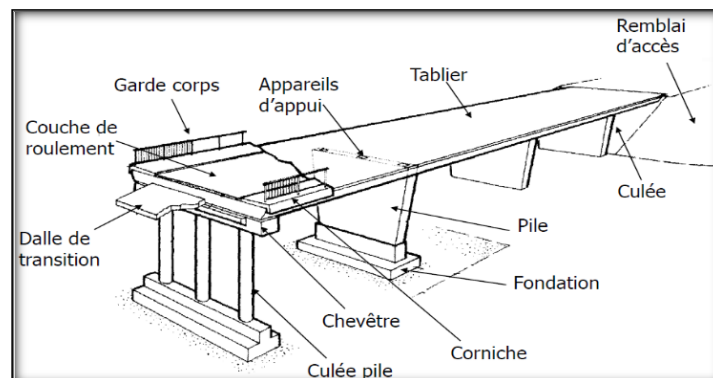


Figure I.2. Composantes d'un pont [1]

- c) **Les appareils d'appuis** : Les appareils d'appui interviennent directement dans le fonctionnement de la structure. Placés entre le tablier et les appuis, leur rôle est de transmettre les actions verticales dues à la charge permanente et aux charges d'exploitation (charges routières) et de permettre les mouvements de rotation (effets des charges d'exploitation et des déformations différées du béton). Appareils d'appui formés par une section rétrécie de béton traversée par des armatures passives (goujons) ils portaient le nom d'appui « Freyssinet » : la section rétrécie de béton se plastifiait sous l'effet des rotations du tablier.
- d) **Les équipements** :
- ✓ **Les corniches** : élément d'aspect architectural, la corniche permet d'une part de couronner le bord latéral extérieur du hourdis et le protège, et d'autre part permet l'ancrage d'autres équipements notamment les barrières, les lampadaires, etc.
  - ✓ **Les barrières** : protection des personnes et des biens contre les chutes dans l'obstacle franchit.
  - ✓ **Les gargouilles** : dispositif d'évacuation des eaux de pluies hors de l'ouvrage.
  - ✓ **Les joints de chaussées** : permettent de lutter contre les fissurations de la chaussées.
  - ✓ **Les systèmes d'étanchéité** : protège le hourdis contre l'infiltration des substances nocifs telles que : l'eau de ruissellement, l'huile de moteur, etc.
  - ✓ **La couche de roulement** : assure le confort de la circulation.
  - ✓ **Les trottoirs** : dispositifs de sécurité et de confort de la circulation piétonnière et animalière [1].

### *1.1.3.3. Critère de classification des ponts*

Il existe une multitude de critère de classification des ponts. En effet, on peut les classer en fonction de leur structure, de leur usage, des matériaux utilisés, de leur portée, de leur nature, ou encore de leur date de construction.

#### *a) Classification selon la nature de la voie portée*

On distingue les ponts suivants :

- ❖ **Pont-route** : ou pont routier désigne un ouvrage portant une route. Les ponts autoroutiers désignant un ouvrage portant une autoroute, sont rangés dans la famille des ponts routes.



Figure I.3. Pont-route [1]

- ❖ **Pont-rail** : un pont-rail ou pont ferroviaire désigne un ouvrage portant une voie ferrée ou un tramway, sur lesquels passent les chemins de fer.



Figure I.4. Pont-rail [3]

- ❖ **Pont pour canaux** : est un pont aqueduc qui supporte un canal sur lequel les bateaux peuvent naviguer, est composé d'une cuvette, remplie d'eau, supportée par une structure de pont qui peut être construite sur arcs, sur poutre métallique, en acier ou en béton. De par la masse d'eau qu'il doit supporter constamment, un pont-canal est toujours plus massif que tout autre ouvrage de même portée. Une surveillance méticuleuse est indispensable sur son étanchéité étant donné le grand risque d'érosion auquel il doit faire face.



Figure I.5. Pont pour canaux [6]

- ❖ **Pont-aqueduc** : un pont-aqueduc ou aqueduc désigne un ouvrage portant une canalisation d'eau, par contre un oléoduc ou un gazoduc désigne explicitement la canalisation et non l'ouvrage qui la supporte.



Figure I.6. Pont-aqueduc [3]

- ❖ **Pont pour piéton et cycliste** : Le pont relie le quartier résidentiel de sur le bord de la mer, l'un des plus longs ponts au monde construit uniquement pour les transports publics, les piétons et les cyclistes.



Figure I.7. Pont pour piétons et cycliste [8]

- ❖ **Pont pour avion** : un pont-avion ou pont-taxiway permettant le franchissement par les avions de routes comme, par exemple, à l'aéroport de Paris-Charles-de Gaulle.



Figure I.8. Pont aéroportuaire (avion) [3]

*b) Classification selon la géométrie*

- ❖ **Pont droit** : Ouvrage par lequel une voie de circulation, un aqueduc, une conduite franchit un cours d'eau, un bras de mer, une dépression ou une voie de circulation, dont l'axe longitudinal est perpendiculaire aux axes des appuis (angle de 100 grades).



Figure I.9. Pont droit [6]

- ❖ **Pont à courbe** : c'est un pont composé d'un certain nombre de poutres chacune être curviligne et plane.



Figure I.10. Pont courbe [3]

- ❖ **Pont biais** : Pont dont l'axe longitudinal n'est pas perpendiculaire aux axes des appuis (Angle différent de 100 grades).



Figure I.11. Pont biais [3]

*c) Classification selon la nature du matériau utilisé*

Ca concerne le matériau utilisé pour les éléments porteurs du tablier (dalle, poutres, .....). On distingue :

- ❖ **Pont en bois** : Ils conviennent comme ponts provisoires passerelles, ponts de secours pour trafic léger et tonnage très limité, excepté les petits ponts. Ces ponts conviennent également dans les zones forestières où le bois de qualité, bois durs s'y trouve facilement. Leur mise en place est généralement facile et rapide et ce sont les ponts les moins chers [5].



Figure I.12. Pont en bois

- ❖ **Pont en maçonnerie** : ce sont les premiers ponts durables réalisés ils ne travaillent qu'en compression le matériau de construction est la pierre la voûte est constituée de pierres comprimées sous la charge des véhicules empruntant le pont. Les efforts se répartissent sur les piles et sur les culées à chaque extrémité.



Figure I.13. Pont en maçonnerie [3]

- ❖ **Pont métallique (fonte, fer, acier)** : C'est aussi pour franchir une rivière de portée très importante, une rivière très profonde, lorsqu'on a la facilité d'approvisionnement en éléments métalliques ou lorsque la construction exige un délai très court (Fig. I.14).



Figure I.14. Pont métallique (fonte, fer, acier) [3]

- ❖ **Pont en béton armé** : Ce pont est souvent recommandé pour des moyennes portées ou travées les rivières se trouvant dans un marécage et là où il y a facilité d'approvisionnement en sable et gravier (Fig. I.15) [5].



Figure I.15. Pont en béton armé [3]

- ❖ **Pont en béton précontraint (BP)** : C'est pour franchir une rivière de portée importante, éviter un échafaudage et de coffrage difficile à réaliser ou si on dispose d'un équipement approprié et d'un personnel spécialisé. C'est aussi pour éviter un cubage important de béton et diminuer la quantité des armatures. Ce pont permet également de réserver des gabarits de passage suffisants [5].



Figure I.16. Pont en béton précontraint [3]



- ❖ **Pont mixte** : C'est un pont dont le tablier est constitué des matériaux différents (poutres métalliques, dalle ou hourdis en B.A, poutres métallique et tablier en bois). C'est pour éviter l'échafaudage des poutres en B.A, leur mise en place étant plus compliquée pour les rivières profondes ou en grande vitesse. Cela réduit le détail de l'exécution. Ils sont donc plus économiques et faciles à exécuter [5].



Figure I.17. Pont mixte [4]

d) *Classification suivant le fonctionnement mécanique*

Il y a trois grandes catégories, à savoir :

- ✓ **Pont à poutres** (éléments porteurs parallèle à l'axe du pont).
- ✓ **Pont en arc** (éléments porteurs en arc, encastrés ou articulés, générant des poussées horizontales aux appuis).
- ✓ **Les ponts suspendus** (tablier suspendu à deux câbles porteurs principaux ancrés dans des massifs d'ancrage au niveau des culées, passant aux sommets de pylônes et supportant le tablier par l'intermédiaire des suspentes).
- ❖ **Les ponts à voûtes** : Les ponts voûtés sont des ponts appartenant à la classe des ponts en arc. Ils ont été construits en pierre pendant plus de 1 500 ans, puis en maçonnerie, puis en béton armé et enfin mixte ou en métal [1].



Figure I.18. Les ponts en voûtes [6]

On peut aussi trouver :

- ❖ **Les ponts Poutres** : Les ponts à poutres désignent tous les ponts dont l'organe porteur est une ou plusieurs poutres droites. Ils n'exercent qu'une réaction verticale sur leurs appuis intermédiaires ou d'extrémités et les efforts engendrés dans la structure sont principalement des efforts de flexion [1].



Figure I.19. Les ponts poutres [6]

- ❖ **Le Pont en caisson** : Le pont en poutre-caisson de façon abrégée, est un type d'ouvrage dont la rigidité à la torsion est assurée par un tablier constitué d'un ou plusieurs caissons creux.



Figure I.20. Les Pont en caisson [2]

- ❖ **Pont dalle** : Pont dont le tablier est composé d'une dalle en béton armé ou précontraint. reprendre directement les charges de trafic, tout en participant à la capacité portante et à la résistance globale du pont.



Figure I.21. Pont dalle [2]

- ❖ **Pont haubané** : Un pont à haubans est un type de pont à câbles en acier. Le tablier est maintenu par un réseau de câbles directement tendus entre le sommet (ou une partie proche du sommet) des pylônes et fixés à intervalles réguliers sur le tablier. Les forces subies par ce type de pont sont la traction, la compression et la flexion. Pour qu'il résiste, ces forces doivent s'équilibrer [5].



Figure I.22. Pont haubané [6]

#### I.1.4. Les ponts les plus spectaculaires au monde

Conçus par des architectes mondialement connus comme Zaha Hadid ou Santiago Calatrava, ces ponts sont parmi les plus impressionnants du globe. On peut citer :

- Le pont Henderson Waves (Singapour) : Conçu par le cabinet américain RSP Architects, il relie le parc du Mont Faber à celui de Telok Blangah.



Figure I.23. Le pont Henderson Waves [7]

- Le pont Cheikh-Zayed (Abou Dabi, Émirats arabes unis) : Conçu par la regrettée ZahaHadid, le pont Cheikh-Zayed d'Abou Dabi a été achevé en 2010.



Figure I.24. Le pont Cheikh-Zayed [7]

- Pont Zubizuri (Bilbao, Espagne) : Le Zubizuri (ou Puente del Campo Volantin) est une passerelle piétonnière qui a été ouverte en 1997. Dessinée par le légendaire architecte Santiago Calatrava, la structure se situe à Bilbao.



Figure I.25. Pont Zubizuri [7]

- Le pont des Chaines (Budapest, Hongrie) : Imaginé par l'ingénieur britannique William Tierney Clark, le Pont Széchenyi, ou pont des Chaînes de Budapest a été ouvert en 1849 et traverse le majestueux Danube.



Figure I.26. Le pont des chaînes [7]

- Puente de la Mujer (Buenos Aires, Argentine) : Conçu par l'architecte star Santiago Calatrava, le Puente de la Mujer, achevé en 2001, est situé dans le quartier commercial de Buenos Aires.



Figure I.27. Puente de la Mujer [7]

- Le pont Juscelino Kubitschek (Brasilia, Brésil) : Situé à Brasilia, le pont Juscelino Kubitschek (également appelé pont JK) a été conçu par l'architecte Alexandre Chan et l'ingénieur structure Mário Vila Verde. Lorsqu'il a été achevé en 2002.



Figure I.28. Le pont Juscelino Kubitschek [7]

- Le pont SeriWawasan (Putrajaya, Malaisie) : Terminé en 2003, le pont Seri Wawasan a été dessiné par PJSI Consultants, un cabinet de Kuala Lumpur, et se situe dans la capitale administrative de Malaisie, Putrajaya.



Figure I.29. Le pont Seri Wawasan [7]

## I. 2. Fondations des ponts

### I.2.1. Définition de la fondation

Les fondations sont les éléments principaux de l'infrastructure d'un ouvrage. Leur fonction principale est de porter et d'ancrer la superstructure d'un ouvrage, et de transmettre ainsi en toute sécurité ses charges au sol. Selon la capacité portante du sol à supporter l'ouvrage (bâtiments, usines, barrages, ponts .... etc.), les fondations peuvent être : Superficielles, semi-profondes, ou profondes.

### I.2.2. Critères de choix de la fondation des ponts

Avant de réaliser une fondation, la première chose à faire est de connaître le sol (fait une étude géotechnique) et à cause de leurs capacité on peut définir le type de fondation mettre en place.

### I.2.3 Différents types de fondation :

Les types de fondation sont déterminés par son allure générale et ses proportions, ces types :

- 1) Fondation superficielle  $D/B < 4$ .
- 2) Fondation semi-profonde  $4 \leq D/B \leq 10$ .
- 3) Fondation profonde  $D/B > 10$ .

Sachant que :

D : représente la profondeur de la base de la fondation par rapport au terrain nature.  
B : est la largeur ou diamètre de la fondation [15].

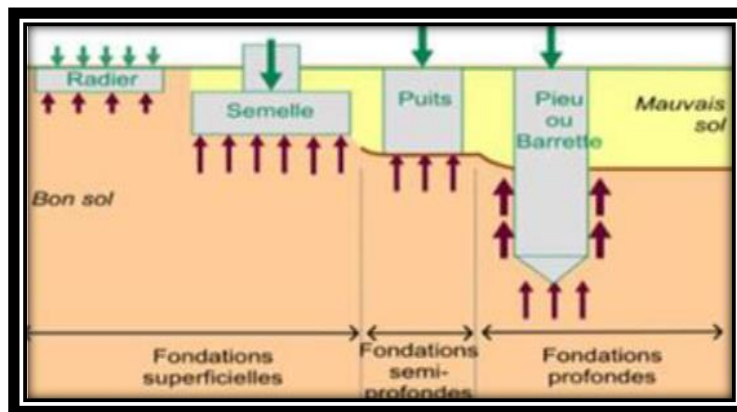


Figure I.30. Différent type de fondation [15]

- 1- **Fondation superficielle** : La fondation superficielle, aussi appelée fondation directe, transmet directement les efforts sur les couches proches de la surface. Elle est utilisée sur un terrain de bonne qualité, ce qui signifie que le sol doit posséder une bonne capacité portante. C'est le type de fondation le plus courant pour les habitations.

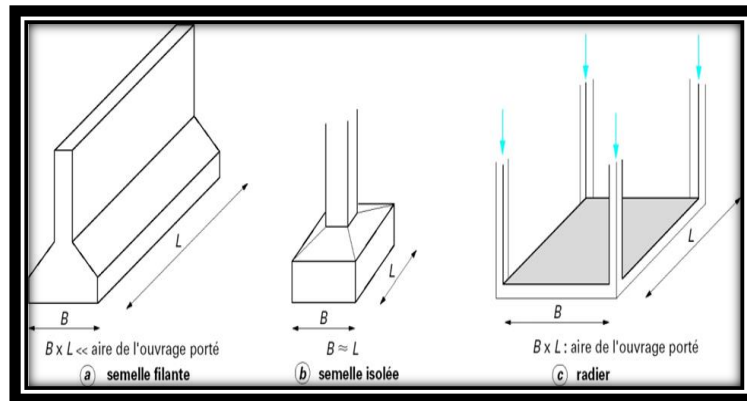


Figure I.31. Différents types de fondation superficielle [9]

On distingue trois catégories de fondations superficielles :

- a) **Les semelles isolées** : La semelle isolée, ou semelle ponctuelle selon les appellations, désigne une fondation qui va être placée sous un poteau. Cette dénomination vient du fait que, contrairement à la semelle filante ou le radier, ces fondations ne sont pas continuées sous la structure mais sont localisées à des endroits bien précis de la structure (généralement sous des poteaux).

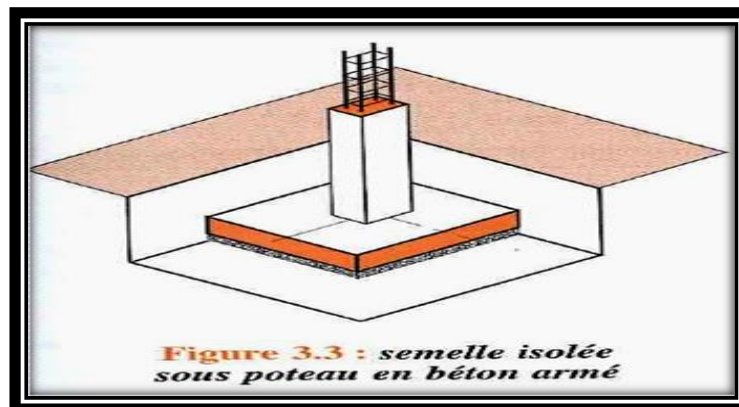


Figure I.32. Les semelles isolées [10]

- b) **Les semelles filantes** : On entend par semelle filante une semelle qui est continue. On cite deux utilisations pour ce type de semelle : supporter plusieurs colonnes ou bien un mur porteur. Un des principaux avantages de ce type de semelle est qu'elle est mieux adaptée à des sols moins homogènes, car la surface de contact est plus importante ce qui limite le risque de tassement différentiel, entraînant une instabilité.

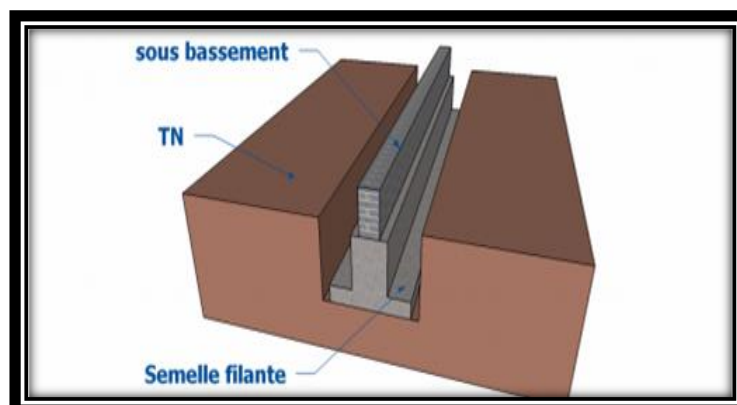


Figure I.33. Les semelles filantes [10]

- c) **Les radiers ou dallage** : de grandes dimensions et occupant la totalité de la surface de la structure. Ils ont une épaisseur est déterminée par les charges qui lui sont transmises et par la contrainte admissible du sol.

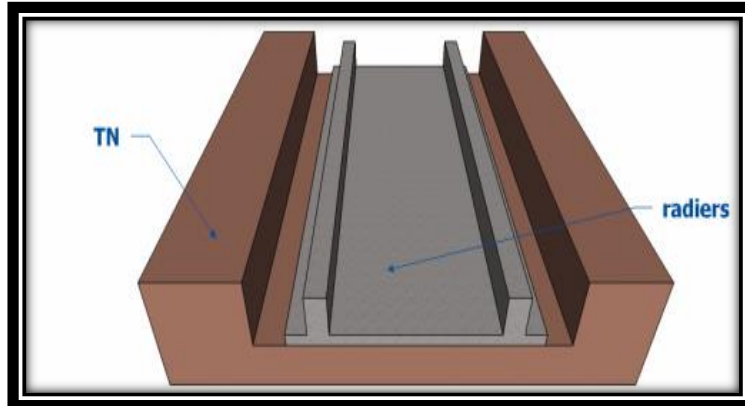


Figure I.34. Les radiers ou dallage [10]

- 2- **Fondation semi-profonde** : Une fondation semi-profonde est un ouvrage ponctuel, généralement en béton armé qui permet de transmettre les charges d'une structure vers le sol. Ce type de fondations est utilisé lorsque des fondations superficielles ne peuvent être réalisées et que des fondations profondes.

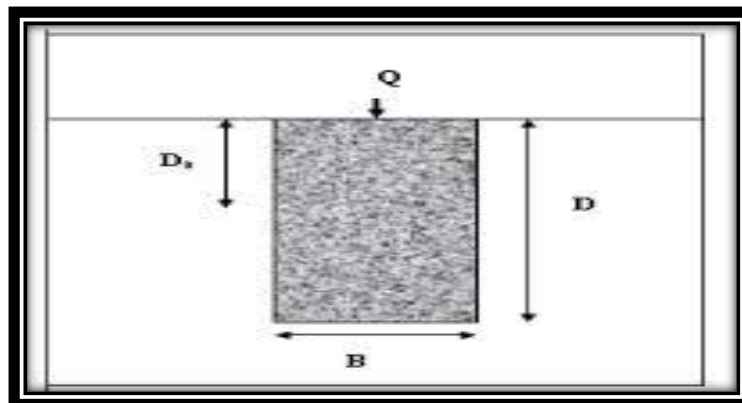


Figure I.35. Fondation semi-profonde [11]

### 3- Fondation profonde

On appelle fondation profonde, une fondation descendue à une profondeur supérieure à sa profondeur critique, Il s'agit d'élément généralement est conçue pour transmettre des charge à des couches de sol plus profondes  $D/B > 10$  (rapport de la hauteur utile à la largeur de l'élément). La fondation profonde est caractérisée par la manière dont le sol est sollicité pour résister aux charges appliquées

- résistance en pointe.
- par frottement latérale.

Tel que :



H : est la longueur de fondation enterrée dans le sol.  
 D : est la largeur de fondation ou diamètre.

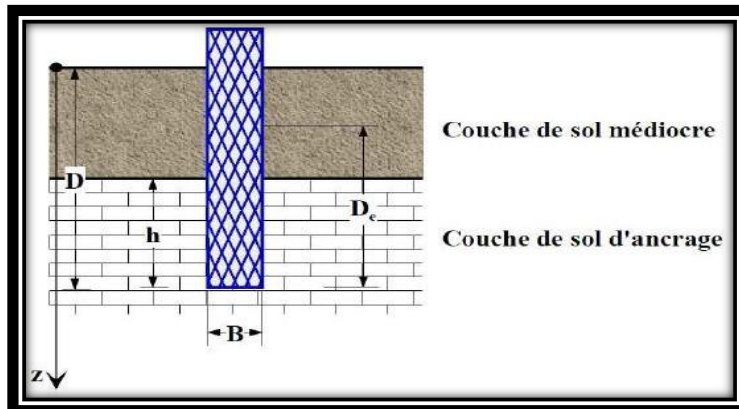


Figure I.36. Fondation profonde [12]

#### ❖ Les différents types de fondations profondes

Pour atteindre le substratum résistant ou la couche de sol d'ancrage, on réalise, soit des puits relativement peu profonds, soit des pieux ou soit des barrettes, qui sont les types de fondation profonde existante :

✓ **Puits** : Ce système est utilisé lorsque l'ouvrage est lourd et plus larges et moins profonds que les pieux. Les parties principales d'un pieu sont :

- La tête.
- La pointe.
- Le fut (compris entre la tête et la pointe).

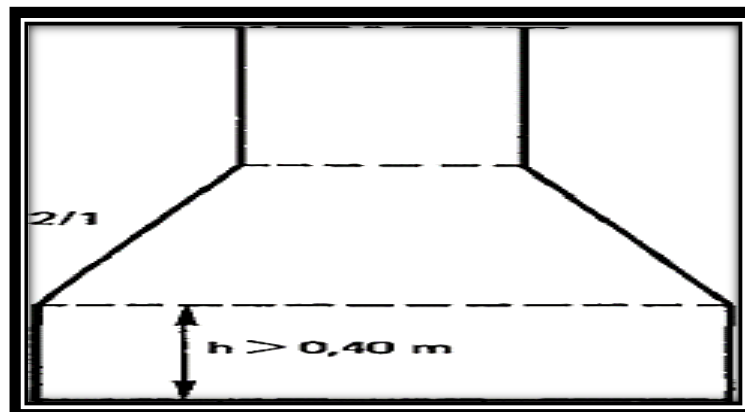


Figure I.37. Puits avec une base élargi [11]

✓ **barrettes** : sont des pieux forés moulés .elles ont une section élancée ce qui permet la reprise d'efforts verticaux et horizontaux très importants.

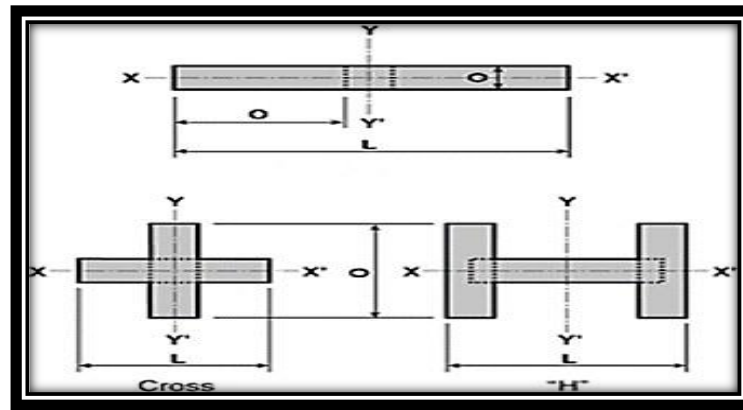


Figure I.38. Pieux barrettes [11]

- ✓ **Les pieux** : les pieux sont des éléments ponctuels pouvant s'appuyer sur un sol compris entre 2 et 20 m .il est nécessaire de faire la distinction entre les pieux préfabriqués et ceux exécutés in-situ Les pieux sont des fondations profondes réalisées mécaniquement .ils peuvent être(en bois en béton armé ou bien métalliques), Les parties principales d'un pieu sont (la tête, la pointe, et le fût compris entre la tête et la pointe).
- ✓ **semelles et longrines** : les semelles (éléments ponctuels) et longrines (élément linéaires) constituent l'intermédiaire entre les pieux et la structure.
- ✓ **micropieux** : sont des pieux forés, tubés ou non avec un diamètre inférieur à 250 mm ils travaillent en compression ou en traction par le frottement latéraux.
- ✓ **ancrage** : sont soumis à des efforts de traction ainsi il est nécessaire de les consolider en unissant une portion du terrain en place avec une injection de liant [13].

#### I.2.4 Classification des fondations sur pieux

Les pieux peuvent être classés de différentes façons selon les paramètres d'intérêt. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau 1.1, adapté du Manuel Canadien d'Ingénierie des Fondations [13].

Tableau I.1. Classification des pieux (MCIF, 2006)

Classification selon	Type de pieu
Mode d'installation	Battu, foré, tubé, vissé, moulé
Nature de matériau	Acier, béton, bois, béton précontraint
Géométrie et forme	Vertical (section variable ou uniforme, base élargie), incliné
Rigidité	Long (flexible), court (rigide)
Type de structures	Tour, machinerie, bâtiment
Déplacement du sol	Subissant un grand déplacement, un faible déplacement, pas de déplacement
Mode de fonctionnement	Frottement, point

### I.2.5 Contrôle d'une fondation profonde

La réalisation des fondations profondes est confiée à des spécialistes qui offrent, a priori, une garantie de bons résultats. Cependant la vérification de la qualité des travaux effectués fait appel souvent à des méthodes de contrôles non destructives (ex. le carottage sonique, l'impédance mécanique).

#### ○ Des essais de chargement

Un massif de réaction est placé sur une table. Un vérin permet de transférer partiellement ou totalement sa charge en tête de pieu. Des mesures de tassements ont été effectuées pour des poids transférés différents en suivant un programme d'essai avec paliers de chargements de 1 h. La capacité portante est alors déduite d'une courbe de "charge - déplacement". L'essai peut se réaliser :

- Préalablement : sur un pieu dont on atteint la rupture de portance du sol (essai destructif, il ne pourra pas servir à fonder la construction).
- Ou pour contrôler la conformité des pieux de l'ouvrage.

#### ○ Des essais d'impédance mécanique

Une force verticale sinusoïdale, provoquée par un exciteur de vibrations, est appliquée en tête du pieu. La mesure consiste alors à relever la vitesse sinusoïdale de réponse du pieu (déplacement) pour des fréquences différentes.

#### ○ Des carottages

(Prélèvement sur toute la hauteur du pieu)

Cet essai permet de vérifier précisément :

- La résistance et l'homogénéité du béton.
- Le niveau et la nature des anomalies.
- La qualité du contact sol-pieu.

Les carottes prélevées 8 jours au moins après bétonnage sont analysées en laboratoire.

Cette technique est assez compliquée lorsque le pieu est élancé (guidage du carottier). Elle est relativement onéreuse, mais peut être complétée par une inspection à la caméra [14].

## I.3 Les types de pieux de fondation des ponts

Un pieu est une fondation profonde 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.

Il existe des pieux en cercle, carré, rectangle et aussi des polygones (pieu préfabriqué).

- **Pieux forés** : et autres fondations exécutés en place par bétonnage dans un forage, à l'abri ou non d'un tube métallique pour ce qui concerne certains pieux.
- **Pieux battus** : façonnés à l'avance et mis en place, le plus souvent, par battage.

### I.3.1 Classification des pieux

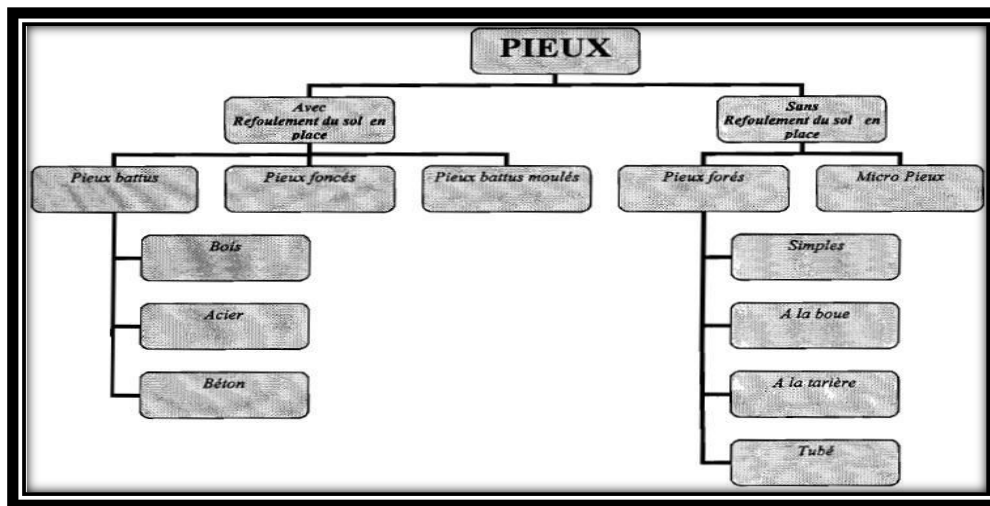


Figure I.39. Organigramme de classification [16]

### I.3.2 Selon la nature du matériau constitutif

- **Pieu en bois** : Les pieux en bois probablement est plus vieille méthode de renforcement des fondations, ils sont réservés à des ouvrages provisoires ou petits dimension et leur hauteur ne dépasse pas 12m.
- **Pieux en acier** : Ce sont surtout des profilés en H ou encore des sections évidées (carrées ou circulaires) les longueurs usinées vont de 12 à 21m. Ils sont plus couteux que les pieux en béton, mais il a une grande capacité.
- **Les pieux en béton armé** : Sont enfoncés dans le sol par battage au moyen d'un mouton diesel ou par vibre-fonçage.
- **Pieu en Composite** : Ce sont habituellement des tubes en acier remplis de béton [17].

### I.3.3 Principe de fonctionnement d'une fondation profonde

Les fondations profondes mobilisent le sol :

- ✓ **Par l'effort de pointe** : proportionnellement à leur section lorsqu'elles reposent directement sur le substratum.
- ✓ **Par frottement latéral** : seul dans le cas de pieux flottants c'est-à-dire des pieux fichés dans une couche cohérente cas des sols argileux. Par frottement latéral et par effort de pointe lorsqu'il est impossible de descendre sur une couche suffisamment résistante [18].



Figure I.40. L'effort de pointe [17]

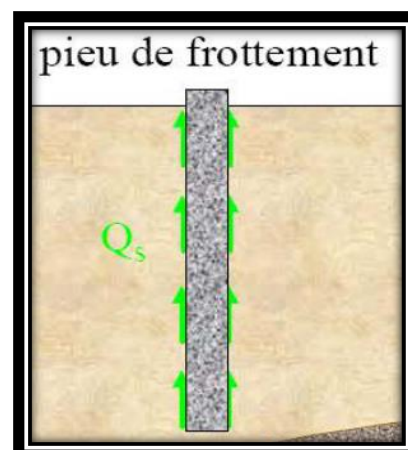


Figure I.41. Frottement latéral [17]

### I.3.4 Définition les pieux

Les pieux sont des éléments de construction longue à section circulaire ou polygonales, généralement noyés dans le sol. Un pieu est une fondation élancée qui reporte les charges de la structure sur des couches de terrain de caractéristiques mécaniques suffisantes pour éviter la rupture du sol et limiter les déplacements à des valeurs très faibles. 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. Cette valeur de "De" 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 [18].

**I.3.4.1 Rôle des pieux :** Lorsque le sol situé immédiatement sous les ouvrages ne présente pas des qualités de portance suffisantes, les pieux constituent une solution de fondations profondes. Montre les différents cas de résistance des pieux. Les pieux contribuent parfois indirectement aux fondations, leur rôle étant uniquement d'améliorer les performances du sol, soit comme pieux de compactage soit comme drains ; dans ce dernier cas, ils sont constitués de matériau drainant (sable, gravier, mèche de fibre, etc.).

Ils sont utilisés également pour résister à :

- Des efforts latéraux (horizontaux) : (par exemple : poussée des terres, efforts dus au vent ou au freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, poteaux) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).
- Des efforts de traction (vertical) : ils ont alors un rôle d'ancrage (fondations de pylônes).

Dans ces derniers cas, il est préférable de les incliner dans la direction des efforts résultants pour réduire les effets de flexion auxquels, par leur forme élancée, ils résistent mal [19].

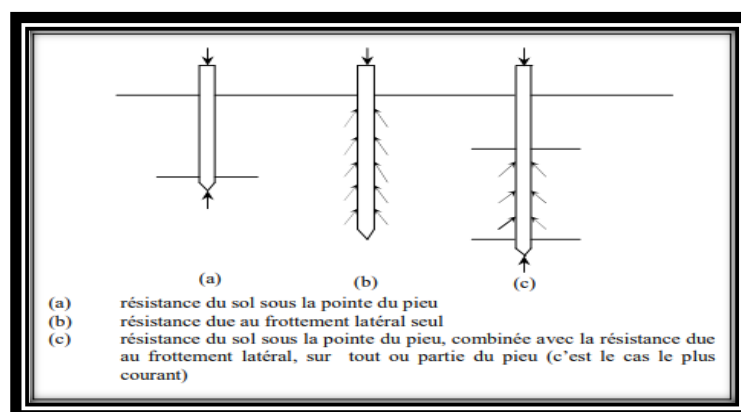


Figure I.42. Résistance des pieux [19]

### I.3.5 Les Différentes catégories de pieux

Selon le mode d'installation 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 :

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

a) *Pieu refoulant le sol à la mise en place*

1- **Pieux façonnés à l'avance**

- **battu préfabriqué** : Des pieux préfabriqués, en béton armé ou précontraint, ou des pieux métalliques à base obturée sont enfoncés dans le sol par battage en tête, par l'intermédiaire d'un cas qui Appartiennent aussi à cette catégorie les pieux battus par pilonnage, par moulage, ou par enrobage [12].



Figure I.43. Pieu battu préfabriqué [12]

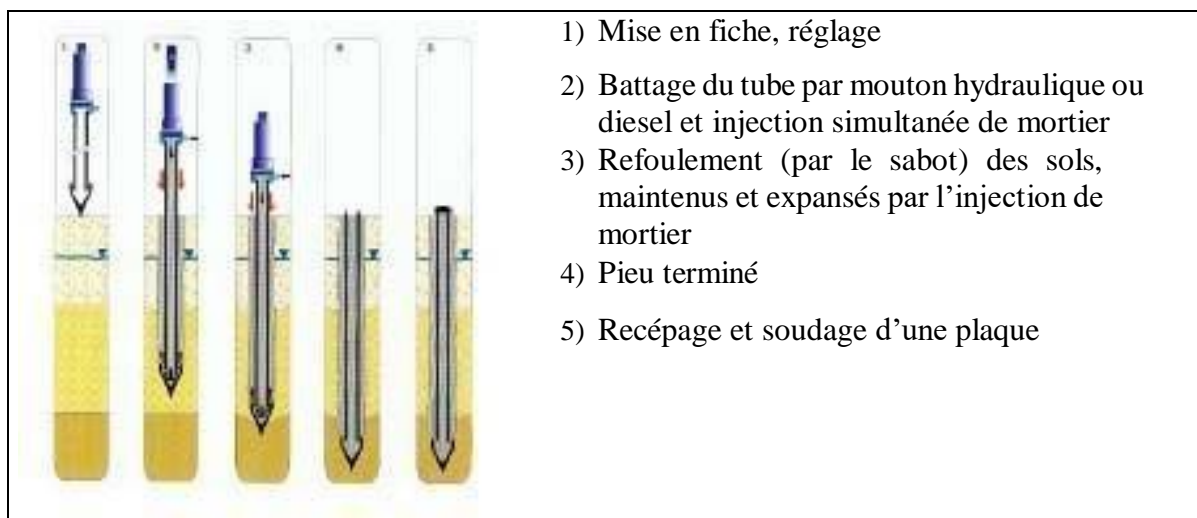


Figure I.44. Phases de réalisation de pieu battu préfabriqué [12]

- **Pieu métallique battu** : Ils sont fichés dans le sol par battage, ces pieux sont entièrement métalliques. Les sections sont :

-En forme de H.

-En forme d'anneau(Tube).

De formes quelconques (pal pieux).

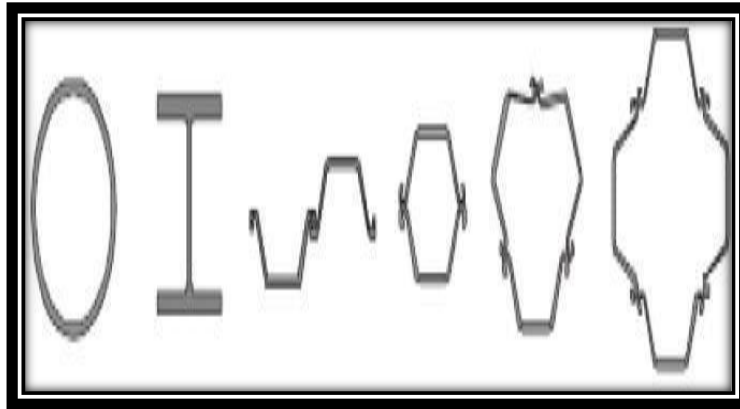
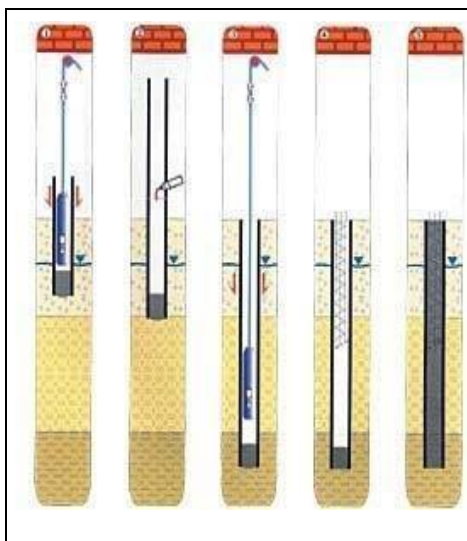


Figure I.45. Pieux métallique battu

- **tubulaire précontraint** : Ce type de pieux est constitué d'éléments tubulaires en béton légèrement armé, assemblés par précontrainte, antérieurement au battage. La mise en œuvre est normalement faite par battage avec base ouverte.
- **battu enrobé** : Ce type de pieux à âme métallique est constitué :
  - De tubes d'acier de 150 à 500 mm de diamètre extérieur.
  - De profilés H.
  - De caissons formés de profils ou de palplanches à 2,3 ou 4 éléments.

## 2 - Pieux à tube battu exécuté en place

- **Pieux battu pilonné** : Un tube, muni à sa base d'un bouchon de béton ferme, est enfoncé par battage sur le bouchon. En phase finale, le béton ferme est introduit dans le tube par petites quantités, successivement pilonnées à l'aide du mouton de battage au fur et à mesure de l'extraction du tube. Suivant les cas, les pieux peuvent être armés [12].



- 1) Mise en fiche, réglage, confection du bouchon entraînant le tube par pilonnage.
- 2) Soudure d'éléments de tube de longueur variable (suivant hauteur disponible) à l'avancement.
- 3) Ancrage contrôlé par mesure des refus.
- 4) Mise en place d'armatures partielles ou toute hauteur.
- 5) Bétonnage à sec.

Figure I.46. Phases de réalisation de Pieux battu pilonné [12]

• **Pieu battu moulé** : Un tube, muni à sa base d'une pointe métallique ou en béton armé, ou d'une plaque métallique raidie ou d'un bouchon de béton, est enfoncé par battage sur un casque placé en tête du tube. Le tube est ensuite rempli totalement de béton d'ouvrabilité moyenne, avant son extraction.



Figure I.47. Pieu battu moulé [12]

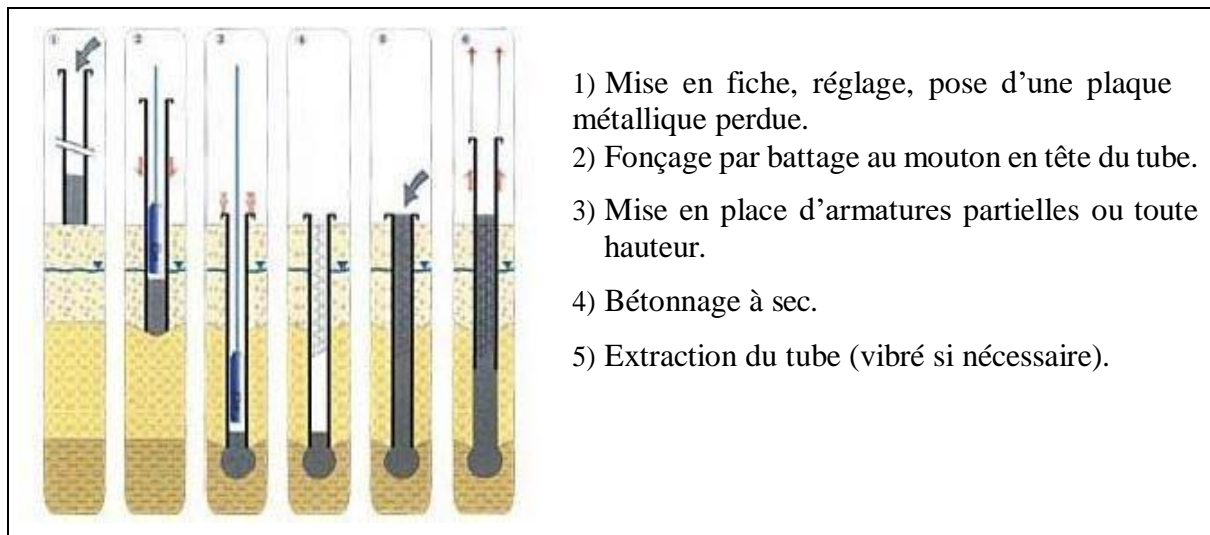


Figure I.48. Phases de réalisation de Pieu battu moulé [12]

### 3- Pieux foncés

• **Pieu béton foncé** : Ces pieux sont constitués d'éléments cylindriques en béton armé, préfabriqué ou coffrés à l'avancement, de 0.50 à 2.50 m de longueur et de 30 à 60 cm de diamètre. Ces éléments sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction.

• **Pieu métal foncé** : Ces pieux, entièrement métalliques, sont constitués d'acier E24-2 ou similaire avec addition éventuelle de cuivre (0.2à0.5%). Ils sont foncés dans le sol à l'aide d'un vérin qui prend appui sous un massif de réaction [12].

4- **vissé moulé (pieu foré)** : Ils sont installés dans les sols cohérents par vissage préalable d'un outil en forme de double vis.



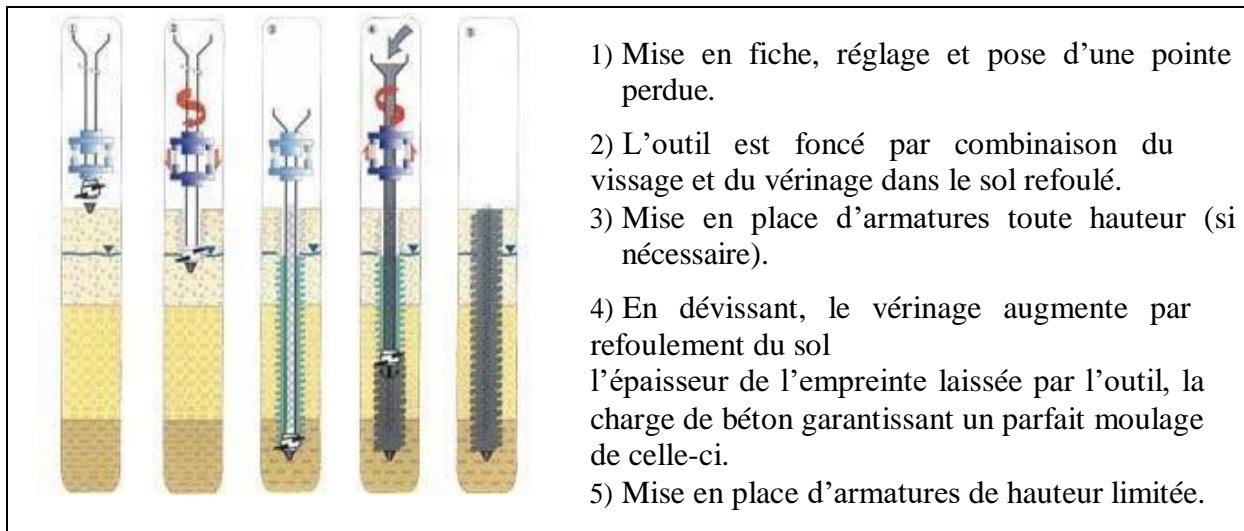


Figure I.49. Phases de réalisation de Pieu vissé moulé [20]

### b) Pieu ne refoulant pas par le sol à la mise en place

#### 1- Pieux forés

• **foré simple** : Mise en œuvre à partir d'un forage exécuté dans le sol par des moyens mécaniques tels que tarière, benne, etc. Ce procédé, qui n'utilise pas le soutènement de parois, ne s'applique que dans les sols suffisamment cohérents et situés au-dessus des nappes phréatiques.

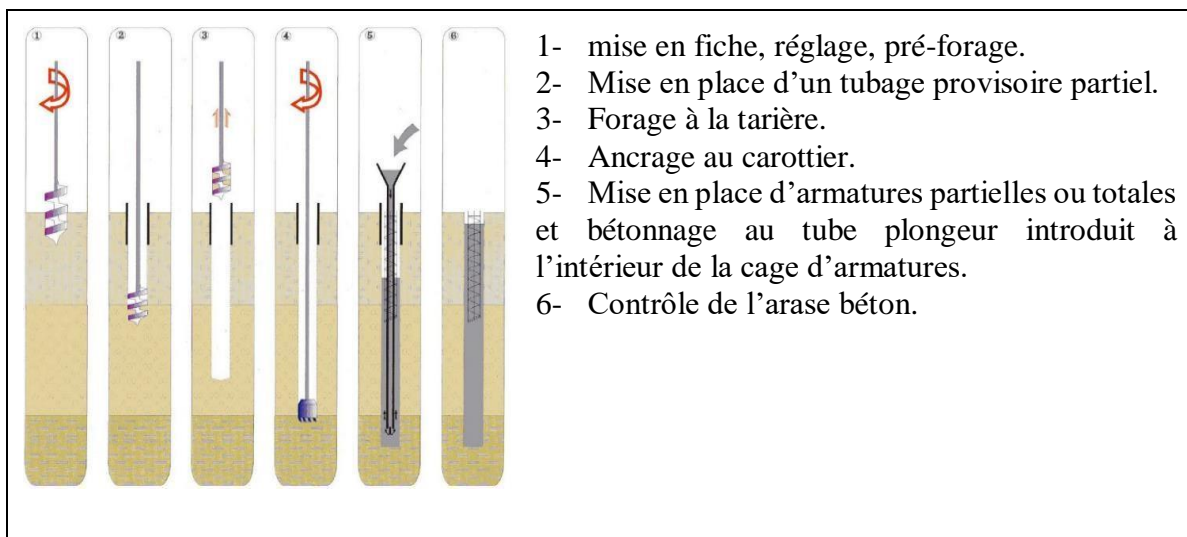


Figure I.50. Phases de réalisation de Pieux forés simple (forage sans blindage) [20]

• **foré tubé** : Même procédé que le précédent, mais seulement sous protection d'un tubage dans la base est toujours située au-dessous du fond de forage. Le forage est rempli partiellement ou totalement d'un béton de grande ouvrabilité, puis le tubage est extrait sans que le pied du tubage puisse se trouver à moins de 1 m sous le niveau du béton [20].

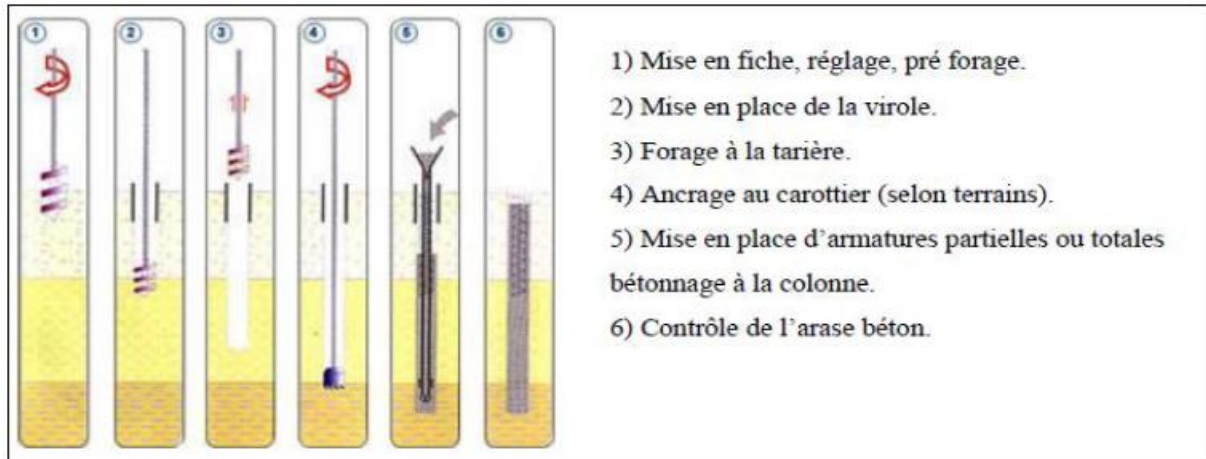


Figure I.51. Phases de réalisation de Pieu foré tubé [20]

- **Pieu foré boue** : La mise en œuvre se fait de la même manière que le pieu foré simple, sous protection d'une boue de forage. Le forage est rempli de béton de grande ouvrabilité sous la boue, en utilisant une colonne de bétonnage.



Figure I.52. Phases de réalisation de Pieux forés à la boue [20]

- **Pieu à la tarière creuse** : La mise en œuvre avec une tarière à axe creux, d'une longueur totale au moins égale à la profondeur des pieux à exécuter, vissée dans le sol sans extraction notable de terrain. La tarière est extraite du sol sans tourner pendant que, simultanément, du béton est injecté dans l'axe creux de la tarière, prenant la place du sol extrait.



Figure I.53. Pieu à la tarière creuse [12]

**2 -Puits :** Il s'agit d'une fondation massive creusée à la main, les parois étant soutenues par blindage. De par son élancement intermédiaire ( $D/Bentre4et 10$ ), ce type de fondation fait plutôt partie des fondations semi- profondes.



Figure I.54. Pieu Puits [12]

**3 -Micropieux :** de diamètre inférieur à 250 mm Il est parfois intéressant de consolider une couche de mauvais terrain par densification c'est-à-dire par serrage du sol. La création de micro-pieu par refoulement du terrain permet d'atteindre cet objectif. Signalons également que ce procédé peut être employé pour des travaux confortatifs de fondations défectueuses. Dans les cas courants on utilise ce type de fondation pour améliorer la couche porteuse située sous l'assise d'une fondation par radier, ou sous une dalle au sol destinée à reprendre des charges verticales importantes (dallages industriels).



Figure I.55. Micropieux [12]

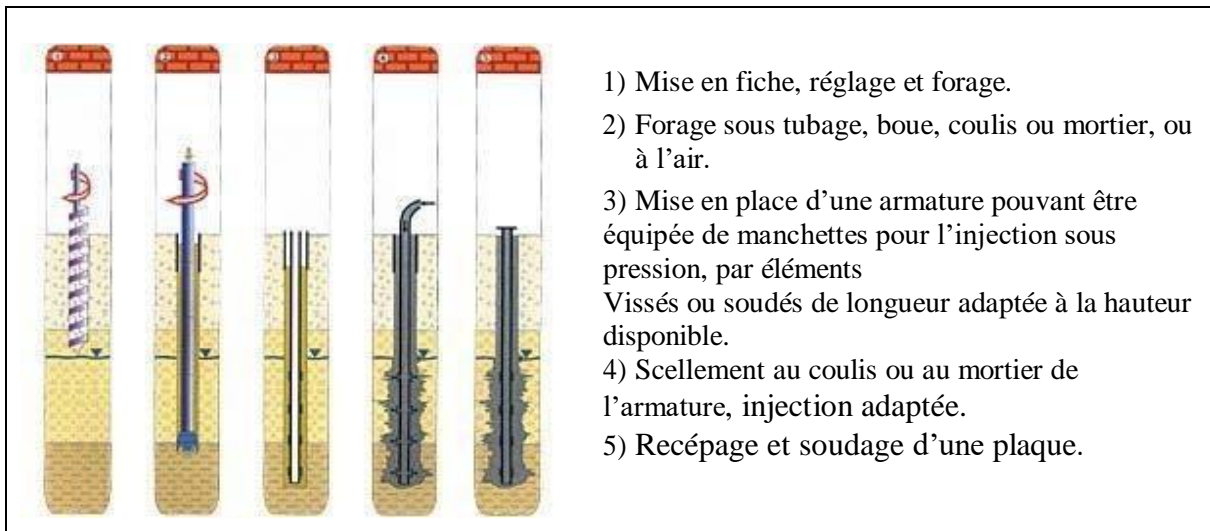


Figure I.56. Phases de réalisation de Micropieux [20]

• **micro Pieu type I** : C'est un pieu foré tubé, de diamètre inférieur à 250 mm Le forage est équipé ou non d'armatures et rempli d'un mortier de ciment au moyen d'un tube plongeur. Le tubage est récupéré en l'obturant en tête et en le mettant sous pression au-dessus du mortier.

Ces micropieux ne sont pas utilisés pour les ouvrages de génie civil.

• **micro Pieu type II** : De même procédé que I, mais seulement le forage est équipé d'une armature et rempli d'un coulis ou de mortier de scellement par gravité ou sous une très faible pression au moyen d'un tube plongeur.

• **micro Pieu type III** : C'est un pieu foré, de diamètre inférieur à 250mm. Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. L'injection es faite en tête à une pression supérieure ou égale à 1MPa. Elle est globale et unitaire.

• **micro pieu type IV** : C'est un pieu foré, de diamètre inférieur à 250 mm Le forage est équipé d'armatures et d'un système d'injection qui est un tube à manchettes mis en place dans un coulis de gaine. On procède à l'injection à l'obturateur simple ou double d'un coulis ou mortier descellement à une pression d'injection supérieure ou égale à 1 MPa. L'injection est répétitive et sélective [20].

### I.3.6 Critères influencent le choix de la technique de réalisation de pieu

- la configuration du site.
- les types de sols à traverser (homogénéité, résistance, cohérence – c'est-à-dire bouillant ou non).
- la zone d'ancrage (compacité).
- l'existence de cavités ou d'obstructions.
- la présence ou non d'eau (sous nappe phréatique).
- les dimensions du pieu (diamètre et profondeur).

- le ferrailage (certaines techniques ne permettent pas le ferrailage sur toute la hauteur).
- l'environnement (proche d'autres constructions ou non).
- le gabarit des engins (accès au chantier).
- la taille du projet (nombre de pieux à réaliser).
- le matériel disponible dans l'entreprise de fondations spéciales.
- le temps de réalisation.
- et naturellement le coût.

### 1) Cas d'un pieu isolé :

Un pieu transmet au sol les charges qu'il supporte :

- par l'appui de sa base sur le sol résistant (effort de pointe noté  $Q_p$ ).
- par le frottement latéral entre le sol et le pieu (effort de frottement latéral noté  $Q_s$ ).

L'effort de pointe est proportionnel à :

- section de la base du pieu.
- à la résistance du substratum.

Considérons un pieu isolé soumis à une charge verticale. Le pieu traverse différentes couches de sol de qualité plus ou moins bonnes pour s'ancrer dans une couche de sol aux caractéristiques mécaniques favorables. Cette couche s'appelle couche d'ancrage ou substratum résistant.

### 2) Cas de groupes de pieux :

D'une part, lorsque les pieux sont suffisamment rapprochés, il ne suffit pas de vérifier la résistance d'un pieu isolé. En effet, il arrive que la charge limite d'un groupe de pieux  $Q_{gu}$  soit inférieure à la somme des charges limites de chaque pieu isolé  $Q_{ui}$ .

#### I.3.7 Les Avantages de construction sur pieux

- Permet la recherche d'un sol d'assise à grande profondeur suivant son pendage (appui ou frottements).
- Permet un travail aisé en terrain aquifère sous conditions de précautions.
- Rapidité du travail d'exécution.
- Permet l'absence de vibrations pour les pieux forés, idéal en milieu urbain.
- Technique des pieux forés économique avec du matériel peu encombrant et adaptable aux formes du terrain.

#### I.3.8 Les inconvénients de construction sur pieux

- Difficulté du maintien de la verticalité ou de l'angle d'attaque du tubage sans risque de dévoiement.
- Difficulté dans la continuité du bétonnage et l'enrobage des armatures.
- Possibilité de devoir utiliser un matériel spécifique entraînant un surcoût.
- Nécessité d'analyser l'agressivité du sol pour les pieux en acier.
- Nécessité d'utiliser un ciment particulier en présence.



# **Chapitre II : Méthodes d'analyses et de calcul**

## Méthodes d'analyses et de calcul

### II.1- Introduction

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets géotechniques de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques, la méthode des éléments finis et la théorie de l'analyse limite sont devenues actuellement la plus performante des méthodes vues leur grand champ d'application. Ces méthodes sont utilisées dans de nombreux secteurs : génie civil, construction navale, mécanique, technique offshore, etc...[21].

### II.2-Méthodes numériques

Il existe plusieurs méthodes numériques dans la modélisation des problèmes géotechniques, parmi ces méthodes on peut citer :

#### II.2.1 Méthodes des éléments discrets

La méthode des éléments discrets est une méthode créée en 1979 par Cundall pour résoudre les équations de la dynamique dans un milieu granulaire. Cette méthode consiste à définir le domaine à l'aide de particules liées entre elles par des lois d'interaction. Cette méthode a été développée après pour résoudre les problèmes de discontinuité dans un milieu continu, et, plus précisément, pour visualiser la propagation de failles.

#### II.2.2 Méthodes des différences finies

La méthode des différences finies (MDF), est une des plus anciennes méthodes de simulation numérique qui est encore utilisée pour certaines applications, comme la propagation d'ondes sismiques ou électromagnétiques ou la mécanique des fluides compressibles. Pour d'autres applications, comme la mécanique du solide ou celles des fluides incompressibles. Elle consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres.

Cette méthode apparaît comme étant la plus simple à mettre en œuvre car elle procède en deux étapes : d'une part la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation/différentiation, d'autre part la convergence du schéma numérique ainsi obtenu lorsque la distance entre les points diminue.

#### II.2.3 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une version spéciale de la méthode des résidus pondérés où la fonction de projection égale à l'unité. Cette méthode consiste à subdiviser le domaine d'étude en volumes élémentaires de telle manière que chaque volume entoure un nœud principal  $P$ . Chaque volume est délimité par : deux interfaces dans le cas monodimensionnel noté  $(e,w)$ , quatre interfaces dans le cas bidimensionnel  $(e,w,s,n)$  et six interfaces dans le cas tridimensionnel  $(e,w,s,n,t,b)$ .

Chaque nœud principal P est limité par des nœuds voisins (E, W) dans le cas monodimensionnel, (E, W, S, N) dans le cas bidimensionnel, et (E, W, S, N, T, B) dans le cas tridimensionnel. L'équation différentielle est intégrée dans chaque volume élémentaire finis. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire l'inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, exponentielle, de puissance etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. Le résultat de discrétisation donne une équation algébrique qui est constituée par les valeurs nodales.

### II.2.4 Intégration numérique

La plupart des méthodes d'intégration numérique fonctionnent sur le même principe. On commence par couper le gros intervalle  $[a, b]$  en  $N$  plus petits intervalles  $[a_i, a_{i+1}]$ , avec  $a_1=a$  et  $a_{N+1}=b$ . Puis, pour chaque intervalle  $[a_i, a_{i+1}]$ , on essaie d'approcher. Cette méthode est appliquée généralement dans le domaine des problèmes complexes.

### II.2.5 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments qui représentent un maillage, cette procédure est appelée « discrétisation », Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure. La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions aux limites compliquées [22]. Cet outil permet, aussi de modéliser le chargement des pieux ainsi que leur mise en place dans le sol par forage ou par battage (Mestat, 1998). Ellison et al. (1971) ont été les premiers utilisés une analyse axisymétrique par éléments finis pour étudier le comportement de pieux isolés sous charge axiale. Frank, Guenot et Humbert (1980) utilisent la méthode des éléments finis pour modéliser des essais de chargement axial de pieux en vraie grandeur. Le sol est considéré comme élastique linéaire isotrope.

#### II.2.5.1 Domaine d'application

Elle s'applique dans les domaines suivants :

- Analyse linéaire (statique et dynamique).
- Analyse non linéaire (grands déplacements, grandes déformations, contact et frottement, flambage...).
- Mise en forme des matériaux u thermique (en régime permanent et transitoire, ...)
- Mécanique des fluides.
- Électromagnétisme.
- Dynamique rapide (choc, impact, crash).
- Optimisation des structures [23].

#### II.2.5.2 Étapes du calcul des éléments finis

##### a) Étapes logiques du calcul par éléments finis

- Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
- Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire  $[k^e]$  reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux  $\{u^e\}$  et les forces  $\{f^e\}$  appliquées aux nœuds :  $[k^e] \{u^e\} = \{f^e\}$ .
- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global  $[K] \{U\} = \{F\}$  de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.



- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites.
- Résoudre le système  $[K] \{U\} = \{F\}$  et obtenir les déplacements  $\{U\}$  aux nœuds.
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées [23].

Les étapes d'exécution pratique de cette méthode sont illustrées sur la figure ci-après.

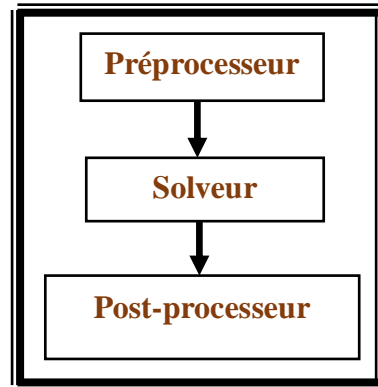


Figure II.1 : Organigramme générale d'un code de calcul [23]

#### Préprocesseur :

- Choisir le type d'éléments.
- Entrer les propriétés géométriques.
- Entrer les paramètres physiques.
- Créer le modèle géométrique.
- Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments.
- Appliquer les sollicitations.
- Imposer les conditions aux limites [23].

#### Solveur :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique...).
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire  $[k^e]$ ,  $\{f^e\}$ .
- Assembler  $[k^e]$  et  $\{f^e\}$  dans  $[K]$  et  $\{F\}$ .
- Prendre en compte les conditions aux limites.
- Résoudre le système d'équations  $[K] \{U\} = \{F\}$ .
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$ , ...) [23].

#### Post-processeur :

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique :
  - Sous forme numérique
  - Sous forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations, Interpolations, animation, etc [23].

En génie civil, l'utilisation de la méthode des éléments finis dans le domaine géotechnique est très courante, pour des grands projets. On peut réaliser des analyses par éléments finis afin de vérifier la stabilité d'un ouvrage en interaction avec son environnement, de contrôler les valeurs de déplacements admissibles et d'aider au dimensionnement des structures [24].

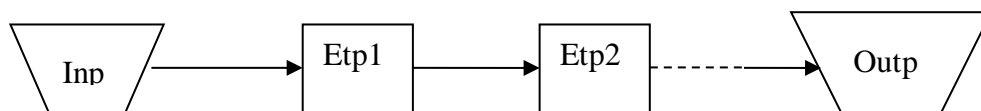
## II.3 Méthodes analytiques

Le calcul d'un problème de génie civil peut se faire, manuellement, analytiquement (C++, Fortran, MATLAB, etc.), expérimentalement (essais au labo.) ou numériquement (logiciels de calcul par MEF) ou paramétré (Réseaux de neurones, Excel.....).

Les méthodes analytiques, consistent tout d'abord à trouver le problème, qui est défini par un modèle mathématique choisi. La méthode analytique consiste à rechercher la solution exacte de problème en résolvant les équations qui régissent le modèle. Parmi les méthodes analytiques, on peut trouver :

### II.3.1 Modèle mathématique

Un modèle mathématique est la mise en équation d'un phénomène dans le but de représenter fidèlement le comportement réel du phénomène. Exp : fléchissement d'une poutre, flambement d'un poteau encastré, comportement d'un pieu axialement chargé, etc. . Des relations reliant les variables d'entrées (input) aux variables de sorties (output) sont établies.



Ce modèle mathématique est formulé par des équations aux dérivées partielles et des conditions aux limites. A chaque problème, les spécifiés des conditions aux limites. Exemple : Calcul d'un pieu en béton armé, ancré dans du sable et encastré à la semelle en haut et quelles sont les conditions aux appuis.

### II.3.2 Méthode de dérivés partiels

Elles peuvent être résolues par de nombreuses méthodes. Parmi ces méthodes :

- ***La méthode de la solution générale***

Qui consiste tout d'abord à déterminer la solution générale de l'équation aux dérivés partielles puis de la particulariser afin d'obtenir la solution du problème en utilisant les conditions aux limites

- ***La méthode de séparation des variables***

Elle consiste, par contre, à rechercher, d'abord des solutions particulières, puis les utiliser à la recherche de la solution du problème. La deuxième méthode est plus vaste, utilisée que la première.

Notons que les méthodes expérimentales, sont définies comme une activité pratique de recherche par des techniques de mesure de paramètres entrant globalement dans la résolution d'un problème donné. C'est un autre moyen mis à la disposition du chercheur ou ingénieur pour valider un résultat analytique ou numérique. La méthode expérimentale ne peut être fiable, que si elle tient compte d'un certain nombre de critères ou normes scientifiques et qui sont les suivantes :

- Tracer l'objectif à atteindre (émission d'hypothèse, formulation).
- Procédure d'analyse expérimentale et matériel expérimental.
- Résultats (appelés donnes).
- Interprétation des résultats et discussion/Validation.

## II.4 Principe de calcul des fondations profondes

### II.4.1 Principe de calcul fondation profonde

Le calcul des fondations profondes sont conformes à la théorie générale du calcul aux états limites principes de justification 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.

- Des résultats d'essais de chargement statique, dont l'adéquation a été démontrée pour des situations comparables par des calculs ou une autre méthode empirique
- Des méthodes empiriques ou analytiques validés par des essais de chargement statique dans des situations comparables.
- Des résultats d'essais de chargement dynamiques dont la validité a été démontrée par essais chargement statique dans des situations comparables (Eurocode 7,1994) [12].

Les fondations profondes mobilisent le sol :

- Par l'effort de pointe proportionnellement à leur section lorsqu'elles reposent directement sur le substratum.
- Par frottement latéral seul dans le cas de pieux flottants c'est-à-dire des pieux fichés dans une couche cohérente cas des sols argileux.
- Par frottement latéral et par effort de pointe lorsqu'il est impossible de descendre sur une couche suffisamment résistante [12].

Il y a plusieurs approches pour le calcul de la capacité portante des pieux en fonction des modèles pris en considération :

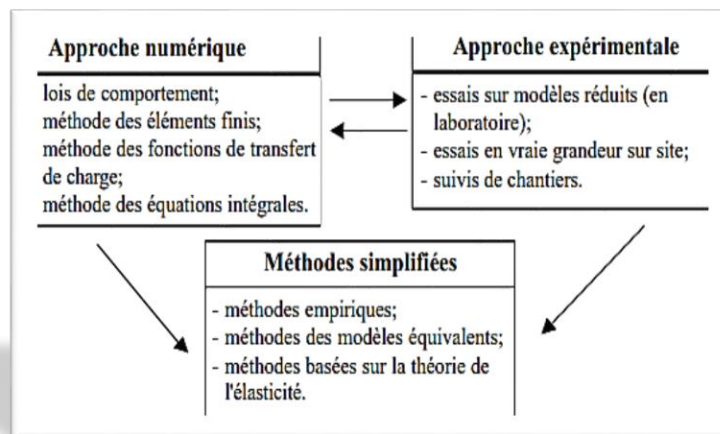


Figure II.2 : Schéma représentant les liens différents [25]

### II.4.2 Analyse limite

L'analyse limite est la méthode qui permet de définir une valeur de la charge de rupture sans l'utilisation de l'analyse élasto-plastique incrémentale. La méthode de l'analyse limite considère une loi de comportement idéaliste. Cette idéalisation, nommée normalité ou règle d'écoulement établit les théorèmes limites sur lesquels est basée l'analyse limite.

Dans l'optique de cette hypothèse l'approche est rigoureuse et ses techniques sont compétitives avec celle de l'équilibre limite. Les théorèmes plastiques limite de DRUCHER et al (1952) sont alors employés pour obtenir des bornes inférieures et supérieures de la charge de rupture dans les problèmes de stabilité, ou encore de la capacité portante des sols non homogène.

Les chercheurs DRUCKER, PRAGER, GREENBERG (1952), démontrent qu'une charge déterminée à partir d'une distribution de contrainte et satisfaisante aux conditions suivantes :

- Les équations d'équilibre sont vérifiées en tout point.
- Les conditions aux limites des contraintes sont vérifiées.
- Cette distribution des contraintes satisfait au critère de rupture en tout point.
- La charge n'est pas supérieure à la charge de rupture.

Cette distribution des contraintes est appelée champs de contraintes statiquement admissibles.

**a) Borne inférieure :**

Si une distribution de contrainte statiquement admissible peut être trouvée, l'écoulement plastique libre ne se produira pas sous l'effet d'une charge plus petite.

DRUCKER, PRAGER, GREENBERG (1952) démontre également que le travail extérieur est égale au taux de dissipation d'énergie pour un mode de déformation définie (ou champs de vitesse statiquement admissible), quand les conditions suivantes sont satisfaites :

- Les conditions aux limites des vitesses.
- Les conditions de compatibilité entre vitesse et déformation.
- La charge n'est pas plus petite que la charge de rupture est satisfaisante.

**b) Borne supérieure :**

Si un champ de vitesse cinématiquement admissible peut être trouvé l'écoulement plastique libre doit être imminent ou a lieu auparavant.

Les conditions pour obtenir une solution type borne supérieure sont les suivantes :

- Un mécanisme de rupture cinématiquement admissible.
- La dissipation d'énergie des forces extérieures due aux petits déplacements définis par le mécanisme est calculable.
- La dissipation d'énergie interne dans les régions plastiquement déformées du mécanisme est calculable.
- La solution la plus critique (plus petite borne supérieure) correspondant au mécanisme de rupture choisi, est obtenue en effectuant une minimisation du chargement de rupture par rapport aux paramètres définissant ce mécanisme [26].

### II.4.3 Application numérique sur les pieux verticaux

Le calcul de la capacité portante des pieux chargés verticalement est assez riche de méthodes de calcul de la capacité portante des pieux, Les méthodes d'évaluation de l'effort vertical limite peuvent être classées dans deux grandes catégories :

- a) Les méthodes empiriques où la résistance en pointe  $q_p$  est couramment supposée proportionnelle au nombre représentatif des coups  $N_p$  dans la zone mobilisée autour de la pointe, et telle que :  $q_p = K_s \cdot N_p$ .
- b) Les méthodes semi-empiriques issues de l'adaptation de certaines méthodes classiques de capacité portante aux observations expérimentales des pieux. On cite à ce titre, la méthode de Hansen (1970) pour la résistance en pointe combinée à celle de Burland (1973) pour le frottement latéral :  $Q_L = Q_P + Q_S$  [27].

Les méthodes de calcul utilisées pour la détermination de la capacité portante d'un pieu les plus adaptées sont les essais de laboratoire et essais in-situ.

**II.4.3.1 Capacité portant verticale :** La charge verticale limite  $Q_L$  d'un pieu résulte mobilisation d'une pression verticale à la pointe  $Q_l$  et d'un frottement latéral  $Q_s$  le long de fut pieu.

$$Q_L = Q_P + Q_S$$

**II.4.3.2 Calcul la capacité portante verticale d'un pieu isolé :** Selon l'eurocode-7, l'évaluation de la capacité portante d'un pieu se faire par calcul sur la base de paramètres géotechniques mesurés, soit par interprétation des essais de chargement statique ou dynamique.

- ❖ Les méthodes « classique » à partir des essais de laboratoire (caractéristique de résistance au cisaillement) et essai de compression triaxial ou l'odomètre.
- ❖ Chargement statique d'essai de chargement vertical d'un pieu. si le pieu est instrumenté par des jauges de déformation ou un extensomètre amovible, on peut mesurer les efforts le long du fut, on déterminer ainsi les efforts  $Q_P$ ,  $Q_S$  en déduire ainsi la capacité portante.
- ❖ La méthode dynamique, à partir des essais in-situ que ce soit tant les formules classiques dites de (battage) que les méthodes. Plus récentes utilisant l'analyse de la propagation des ondes.
- ❖ Formules de l'interprétation basées sur essai pénétration au cône (CPT) et pénétration standard (SPT) [28].

**II.4.3.3 Frottement négatif dans des pieux :** Suit au mouvement de consolidation d'un sol d'un sol fin saturé autour du pieu.

- ✓ Méthodes d'équilibre élasto-plastique : ou sol est considéré comme étant plastique à l'interface pieu/sol.
- les méthodes simplifiées (terzaghi) :  $Q = P \int_0^h q_s \cdot dz$ .
- les méthodes basées sur le concept d'accrochage du sol :  $q_s = \sigma'_v(z) k \cdot \text{tg} \delta$ .
- ✓ Méthode d'analyse en déplacements : permettant d'apprécier l'évolution des efforts de frottement négatif dans le temps en fonction du tassement du sol et du pieu, le comportement du sol étant considéré élastique [28].

## II.5 Modélisation numérique de pieu isolé en éléments finis (EF)

Ellison et al. (1971) ont parmi les premiers utilisés une analyse axisymétrique par éléments finis pour étudier le comportement de pieux isolés sous charge axiale. Frank, Guenot et Humbert (1980) utilisent la méthode des éléments finis pour modéliser des essais de chargement axial des pieux en vraie grandeur (Cran et Plancoet). Le sol est considéré comme élastique linéaire isotrope. L'interaction sol-pieu est modélisée par des éléments de contacts. Trochanis et al. (1991a et 1991b) ont étudié l'effet d'un modèle non linéaire du sol sur le comportement des pieux isolés par un calcul élasto-plastique tridimensionnel. De Gennaro (1999) utilise la méthode des éléments finis pour étudier le comportement d'interface entre un milieu granulaire et une structure métallique rugueuse. Cette étude a été réalisée dans le cadre de la théorie de l'élasto plasticité.

El-Mossallamy (2004) utilise le code de calcul en trois dimensions (PLAXIS 3D FOUNDATION) en éléments finis pour modéliser des essais de chargement axial des pieux en vraie grandeur dans un sol argileux sur-consolidé, cette étude à modéliser le sol par le critère de Mohr-Coulomb avec comportement drainé et le modèle du pieu considéré comme élastique linéaire isotrope. El-Mossallamy (2004) propose six variantes des maillages pour estimer l'influence de raffinement sur les résultats de calcul.

### a) Modélisation numérique axisymétrique des pieux par EF

Lors d'une modélisation axisymétrique, le pieu est supposé cylindrique et plein. Des caractéristiques équivalentes sont alors cherchées pour les surfaces, les modules et les densités pour les pieux à section non circulaire ou non pleine, en conservant généralement les rigidités axiales et les diamètres extérieurs ou les longueurs des pieux réels.

### ***b) Modélisation numérique tridimensionnelle des pieux par EF***

Cette approche requiert des moyens importants pour la réalisation du maillage autour des pieux. La modélisation de l'interface entre le pieu et le sol par des éléments adéquats augmente également le nombre de nœuds du maillage. Le calcul est relativement long et d'une durée parfois excessive [29].

#### **II.5.1 Considération générales dans le calcul de la fondation profonde**

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

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

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

- Tassement excessif du sol.
- Soulèvement excessif.
- Mouvement latérale excessif du sol.
- Vibrations inadmissibles [30].

#### **II.5.2 Considérations relative au calcul**

- Le comportement des pieux isolés et des groupes de pieux ainsi que la raideur et la résistance de l'ouvrage reliant les pieux doivent être pris en compte
- Lors du choix des méthodes de calcul et des valeurs des paramètres et lors de l'utilisation des résultats d'essais de chargement, la durée et la variation du chargement au cours du temps doivent être prises en compte.
- Les applications et suppressions de surcharges prévues ultérieurement et les variations éventuelles du régime des eaux souterraines doivent être pris en compte dans les calculs comme lors de l'utilisation des résultats d'essais de chargement.
- Le choix du type de pieu, y compris la qualité du matériau du pieu et la méthode d'installation (Eurocode 7,1994) [12].

#### **II.5.3 Calcul des pieux sous un chargement axial**

Les méthodes de calcul des pieux sont utilisées pour le dimensionnement des pieux ou pour faire des recherches.

Ces méthodes consistent à évaluer la charge admissible d'un pieu isolé et à vérifier la stabilité (calcul de la charge limite) pour s'assurer que les tassements sont admissibles pour la structure supportée.

Généralement, les méthodes de dimensionnement des pieux isolées sous charge axiales s'appuient principalement sur :

- Les méthodes statiques.

- Les méthodes dynamiques pour les pieux battus.
- Les méthodes pratiques à partir des essais in-situ et des essais de chargement statiques [31].

### II.5.4 Tassement du pieu isolé

C'est problème du déplacement vertical (tassement) d'un pieu isolé sous charge axiale, deux méthode de calcul sont habituellement utilisées pour estimer les tassements des pieux isolé sous charge service, méthode de calcul le tassement.

- la méthode élastique le sol modélisé par un continuum élastique linéaire isotrope (E module d'Young et V coefficient de poisson).
- la méthode des fonctions de transfert de charge ou méthode des « courbes t-». le tassement en tête d'un pieu isolé soumis à une charge axiale peut être calculé à partir de la méthode des courbes de transfert de charges si les lois de mobilisation du frottement ( $q_f$ ) et de l'effort de pointe ( $q_p$ ) en fonction du déplacement vertical du pieu.
- Méthode empiriques ce sont des méthodes basées sur des corrélations empiriques [32].

### II.5.5 La capacité portant d'un pieu isolé sous charge axial

Pour la détermination de la charge portante totale  $Q_T$  du pieu, il y a lieu de distinguer ici le terme de pointe  $Q_c$ , qui est la force limite supportée en résistance de pointe et le terme de frottement latéral  $Q_f$  qui est le frottement mobilisé à l'interface sol-structure.

En général le terme  $Q_c$ , est peu influencé par le type de pieu, ce qui n'est pas le cas pour le terme  $Q_f$  qui est fonction du matériau constitutif du sol, du fût du pieu et de son mode de mise en place. Le frottement latéral est plus difficile à évaluer et on s'attache à la détermination de la force portante verticale  $Q_{pv}$ .

Plusieurs méthodes ont été élaborées soit à la base des calculs théoriques : formule statique - calcul à la rupture ou calcul dynamique théorie d'analyse limite -. Pour le calcul de la charge admissible  $Q_{ad}$  comparé avec la charge résultante des descentes de charges, les termes  $Q_c$ , et  $Q_f$  seront minorés par des coefficients dits de sécurité. [33]

### II.5.6 Pieu isolé sous charge latérale

#### ➤ Détermination de la charge limite par frottement latéral

L'effort limite mobilisable par frottement latéral sur la hauteur concernée du fût du pieu est calculé par l'expression suivante :  $Q_{su} = P \times \int q_s(z) \times dz$ .

#### Les formules statiques :

On admet que le terrain oppose à l'enfoncement de la fondation deux types de résistance :  
a) La résistance à la base dite résistance de pointe «  $Q_p$  ».

La résistance qui se manifeste le long du fût du pieu, est équivalente au frottement latéral, plus la résistance au cisaillement, que l'on appelle terme de frottement «  $Q_f$  » [32].

- **Détermination des efforts transmis aux pieux :** il existe plusieurs méthodes approchées reposant sur des hypothèses simplificatrices pour déterminer les efforts transmis aux pieux, nous citerons la méthode analytique de BAGUELIN du L.C.P.C de paris qui repose sur les hypothèses suivantes :
  - La semelle de couronnement est infiniment rigide.
  - Les têtes du pieu sont articulées sous la semelle.
  - Les pieux sont des poteaux élastiques.

$$Q = \frac{Qv}{n} \pm \frac{My.X}{Iy} \pm \frac{Mx.Y}{Ix}$$

La charge verticale « Q » produite sur un pieu par le couple (Qv, M) [32].

### II.5.7 Différents logiciels de calcul des pieux battus et forés

**GEO5** : le programme est conçu pour analyser la capacité portante verticale d'un pieu chargé à la fois en traction et compression, le tassement du pieu ainsi que la capacité portante d'un pieu isolé. L'analyse de vérification peut être effectuée en suivant la norme EN 1997-1 ou les approches classiques (états limites, coefficient de sécurité).

**GEOFOND 2006** : Calcul de la capacité d'un pieu avec le Geofond 2006 nous utilisons le programme Geofond 2006 pour calculer la capacité portante des pieux, déjà calculés manuellement.

**PLAXIS** : Le code de calcul par éléments finis PLAXIS a été développé en premier lieu à l'université technologique de Delft en 1987. Dans les années suivantes, ce code, initialement réalisé pour analyser les digues en sols argileux, a vu son champ d'application afin de prévoir traiter les différents types de problèmes géotechniques. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto viscoplastiques en 2D ou 3D.

**Maillage** : Pour générer le maillage du massif de sol qui est hétérogène, Plaxis nous permet d'effectuer automatiquement le maillage du problème, avec la possibilité de le raffiner localement (maillage de pieu).

#### labGéolPack :

**Pieu Dir** : logiciel de dimensionnement calcul de fondations profond pieu foré, pieu battu selon la norme NFP94-262/ à partir de données préssiométrique.

**Pieu COE** : logiciel de calcul des comportements d'un pieu soumis à des efforts tranchant on des moments de flexion.

**LPILE** : est un programme spécifique basé sur rationalité des procédures pour l'analyse d'un pieu lorsque les pieux sont soumis aux charges latérales et group s'il s'agit d'un groupe de pieux dans fondations.

**Autodesk robot structural** : c'est un logiciel analyses des pieux forés.

**WEAP** : Les pieux battus calcul par le logiciel WEAP des nombres de coups par mètre nécessaires, respectivement B0et B1

Vérification du critère de battage :

Nombre de coups : B> B0.

- si le critère de battage n'est pas vérifié, vérification du critère de rebattage à 1jour (B> B).

- si ce deuxième critère n'est pas vérifié, reprise du battage en vue d'approfondir le pieu.

**Programme SPULL Windows** : SPULL fournit un made interactif par entrer les données, exécuter une analyse d'un pieu latéralement chargé, et afficher les résultats d'analyse. l'étude comparative des méthodes de calcul les courbes de réaction des pieux sous charges latérales est une étape très importante pour atteindre le but de la présente thèse. Elle consiste à comparer les résultats de calcul du déplacement, rotation, moment fléchissant et l'effort tranchant, à l'aide du logiciel SPULL, avec les résultats expérimentaux de chargement réel du pieu.

**Le programme PIVER-LCPC** : est basé sur cette solution analytique dans chaque couche Son originalité consiste en le fait qu'il n'a pas besoin d'approximations par différences finies. L'efficacité de ce modèle et de la méthode a pu être évaluée par Saïd et al. (2005) lors du récent



Symposium International PRESSIO 2005. Il s'agissait de calculer la capacité portante et les tassements d'un pieu foré à la tarière continue soumis à une charge axiale centrée, à partir des résultats d'essais pressiométriques Ménard.

**Modélisation des pieux à l'aide du logiciel ICFEP :** L'analyse des pieux a été effectuée à l'aide du logiciel CESAR, où les éléments d'interface utilisés sont des éléments de type couche mince. Une analyse analogue a été effectuée avec le logiciel ICFEP (Imperial Collège Finité Elément Program) d'Imperial Collège (Londres), qui dispose d'éléments d'interface particuliers sans épaisseur. Le modèle d'interface MEPI 2D a été intégré et validé dans ICFEP, puis la même analyse par éléments finis de l'essai du pieu type 2 (Dunkerque) a été effectuée.

**Logiciel CYPECAD et CYPE 3D :** plusieurs poteaux et noyaux peuvent être sélectionnés pour leur attribuer une semelle sur pieux commune. Ces deux logiciels conçoivent également des poutres de liaison et de redressement entre les semelles sur pieux.

**TASPIE+ :** est un logiciel de calcul des pieux, réseaux d'inclusions rigides et fondations mixtes. Il permet de simuler le comportement d'un pieu, sous chargement axial, en adoptant un modèle englobant l'élément de fondation et la maille élémentaire de sol associée. Ainsi, il est possible de prendre en compte le fait que le comportement du pieu est affecté par le tassement du sol encaissant mais aussi que le tassement du sol dépend de la distribution des efforts dans le pieu. Le logiciel fait appel à la notion de fonction de transfert : lois établissant la relation entre le frottement latéral et le déplacement du pieu d'une part, la contrainte en pointe et le déplacement de la pointe d'autre part. Dans le cas du dimensionnement des fondations mixtes, le maillage des pieux a été déterminé en partant de l'hypothèse d'un tassement égal du sol et des pieux sous la fondation, et en répercutant sur les pieux le frottement négatif engendré par le tassement du sol jusqu'à sa profondeur d'application. Le dimensionnement sous TASPIE+ a permis la détermination d'un maillage de pieux en fonction des charges ramenées au sol sous chaque bâtiment de la centrale. Nous traitons ici le cas de la salle des machines et turbine gaz-vapeur.

## II.6 Choix du logiciel approprié et phases de calcul

### II.6.1 définition logiciel MATLAB

MATLAB est un langage technique qui intègre le calcul, la visualisation et la programmation où les problèmes exprimés en notations mathématiques, MATLAB est une abréviation du Matrix Laboratoire. Ce programme incroyablement fonctionne principalement avec les matrices, MATLAB a besoin d'une meilleure compréhension de la façon de l'utiliser et des connaissances précises à commander. Les utilisations courantes de ce langage de programmation sont les suivantes :

- Mathématiques.
- Développement d'algorithmes.
- Modélisation, simulations et prototypage.
- Analyse de données, exploration et visualisation.
- Graphiques scientifiques et techniques.
- Les développements d'applications comme graphique user interface (GUI).

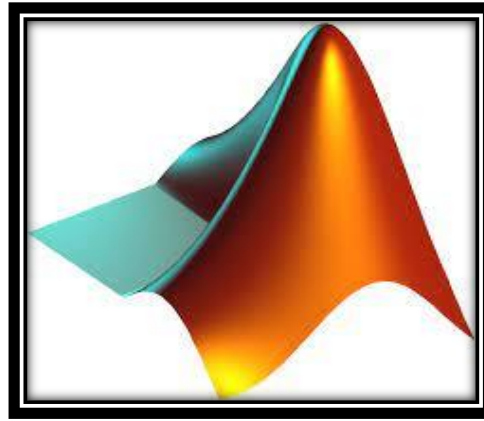


Figure II.3 logo du logiciel Matlab

MATLAB peut être utilisé dans différents aspects comme la Science, les mathématiques, l'analyse numérique, l'exploration de la recherche, la recherche de nouvelles solutions d'ingénierie et le traitement de l'image.

Un système interactif de programmation scientifique, pour le calcul numérique et la visualisation graphique, basé sur la représentation matricielle des données, dont le nom est dérivé de Matrix Laboratoire. C'est un outil multi-plates-formes qui est disponible pour les environnements Windows, Unix (et dérivés BSD, Linux, Solaris, MacOS...).

MATLAB a été écrit à l'origine, en Fortran, par C. Moler. La version actuelle, écrite majoritairement en C (mais aussi Perl, Java et autres) par The MathWorks Inc., existe en version professionnelle et étudiante, et est disponible sur plusieurs plates-formes avec quelques différences minimales de fonctionnalités. MATLAB se présente comme un environnement complet pour le calcul et la visualisation. Son langage de programmation relativement simple à assimiler en fait un environnement ouvert et programmable qui permet un gain de productivité important.

MATLAB se présente avant tout comme un langage de commande dont la caractéristique est d'être interprétée ; il permet donc d'utiliser simplement des structures de données et d'écrire rapidement des programmes assez complexes. Bien qu'il se veuille complet et autonome, MATLAB reste ouvert aux autres langages tels que C, Fortran et Java, ce qui permet d'en étendre les possibilités. Comme pour tout langage de commande, il peut apparaître une certaine lenteur d'exécution, notamment lors de l'écriture de boucles. Il est alors possible d'écrire les parties sensibles du code dans un autre langage de manière à en accélérer l'exécution. De plus, à l'aide de la boîte à outils compilateur (MATLAB Compiler), la génération automatique de code C et la création d'un programme « stand alone » ou d'une librairie dynamique partageable à partir d'une application développée en code MATLAB sont particulièrement simples à effectuer [34].

## II.6.2 les avantages et l'inconvénient du MATLAB

### ➤ Avantages du MATLAB

- Programmation infiniment plus rapide pour le calcul et pour l'affichage.
- Une librairie très riche.
- Possibilité d'inclure un programme en C/C++.
- Langage interprété : pas de compilation donc pas d'attente pour compiler.

- Possibilité d'exécuter du code en dehors du programme.
- Code facile à comprendre et très lisible.
- Une aide très bien faite.
  - **Inconvénients du MATLAB**
- Vitesse de calcul moins rapide que C/C++.
- Application auto-exécutable peu pratique [34].



**Chapitre III :**  
**Application et Cas**  
**d'Etude**

## Application et Cas d'Etude

### III.1 Introduction

Afin d'étudier l'influence du choix du type de la fondation profonde (pieux battus ou forés), pour les appuis d'un pont routier, se trouvant dans la wilaya de BAYADH, nous avons pris en considération, le calcul de deux appuis différents. Il s'agit de l'appui central (pile) et l'appui de rive culée, les plus défavorables.

Nous précédon's par des descentes de charges, depuis les charges routières du tablier jusqu'à la détermination des éléments de réduction (Moments fléchissant  $M_l$  et  $M_t$ , Efforts normaux  $H$  et Efforts verticaux  $N$ ), aux bases et milieux des semelles de fondations, au-dessus des pieux implantés.

### III.2 Etude de la culée

#### III.2.1 Introduction

La culée est un appui de rive, elle assure la continuité de la chaussée c'est-à-dire la continuité entre la chaussée de la route et celle qui est sur le pont, elle assure aussi le soutènement des terres les éléments constituant la culée ont un rôle bien précis il convient, alors de les étudier séparément comme suite.

#### III.2.2 Etude déférente étape de la culée

Le schéma de la culée étudiée est illustré par le schéma ci-joint (Fig. III.1).

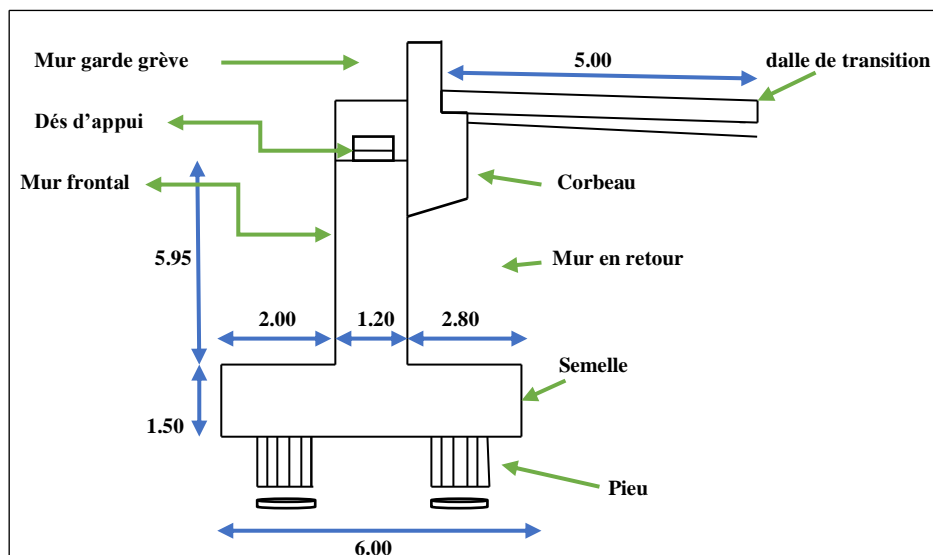


Figure III.1. Schéma de la culée

#### a/ Calcul du poids propre des éléments de la culée :

- La semelle :

Longueur :  $L=11$  m, largeur  $b=6$  m, hauteur  $h=1.5$  m.  $25\text{kN/m}^3 \Rightarrow 2.5\text{ t/m}^3$

$$(11 \times 6 \times 1.5) \times 2.5 = 247.5 \text{ t.}$$

- Dalle de transition :

Longueur :  $L=8$  m, largeur  $b=5$  m, hauteur  $h=0.30$  m.

$$(5 \times 8 \times 0.3) \times 2.5 = 30 \text{ t.}$$

- Mur garde grève :

Longueur :  $L=9.76$  m, hauteur  $h=1.90$  m, épaisseur  $e=0.30$  m.

$$(9.76 \times 1.90 \times 0.30) \times 2.5 = 13.91 \text{ t.}$$

- Corbeau :

$$(0.6 \times 2 \times 2.5) + (0.45 \times 0.45 / 2 \times 2.5) \times (9.76 - 2(0.5)) = 28.497 \text{ t.}$$

- Mur frontal :

Longueur :  $L=9.76$  m, hauteur  $h=5.95$  m, épaisseur  $e=1.20$  m.

$$(9.76 \times 5.95 \times 1.20) \times 2.5 = 174.216 \text{ t.}$$

- Mur en retour :

Longueur :  $L=7.77$  m, hauteur  $h=2.8$  m, épaisseur  $e=1$  m.

$$(7.77 \times 2.8 \times 2(0.5)) \times 2.5 = 54.39 \text{ t.}$$

- Des d'appui :

$$(0.60 \times 0.5 \times 2.5) = 0.75 \text{ t.}$$

- La poussée des terres :

$$P_a = 0.5 \times K_a \times \gamma \times h^2 \quad ; \text{ densité de remblai } \gamma = 1.8 \text{ t/m}^3. \quad K_a = \text{tg}^2 \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right).$$

$$P_t = 0.5 \times 0.333 \times 1.8 \times (7.77)^2 \times 11 = 199.031 \text{ t/m}^3.$$

- La surcharge :

$$P_s = 1 \times 0.333 \times 7.77 \times 11 = 28.462 \text{ t.}$$

- Remblai arrière :

$$(7.77 \times 10 \times 2.8) \times 1.8 = 391.608 \text{ t.}$$

- Remblai avant :

$$[(1.5 + 0.5) \times 2 \times 10] \times 1.8 = 72 \text{ t.}$$

b) calcul Le moment du à l'effort de poussée est donnée par formule :

$$M_t = \frac{1}{3} \times P_t \times h = \frac{1}{3} \times (199.031) \times (7.77 + 1.5) = -615.01 \text{ N.m.}$$

Le moment de la surcharge :

$$M_s = \frac{1}{2} \times P_s \times h = \frac{1}{2} \times (28.46) \times 9.27 = -131.921 \text{ N.m.}$$

-On a résumé le résultat de poids propre (culée) et calcule de moment dans le tableau III.1.

Tableau III.1 Détails de calcul du poids propre (culée)

Elément	Poids (t)	BL (m)	$M^S/0(t*m)$	$M^R/0 5(t*m)$
Semelle	247.5	0		0
Dalle transition	30	0.5		15
Mur grande grève	13.908	0.20		2.78
Corbeau	28.496	0.5		14.248
Mur frontal	174.22	0.40		69.688
Mur retour	54.39	1.6		87.024
Des d'appui	0.75	0.20		0.15
Remblai arrière	391.608	1.6		626.576
Remblai avant	72	2		144
La poussé	-199.031		-626.01	
La surcharge	-28.462		-131.921	
			$\sum M = 212.537$	

### b/ Calcul du poids propre du tablier du pont :

1) Calcul du poids propre de la charge permanente :

✓ La dalle : (Longueur × épaisseur × largeur) × 2.5.

$$P_{\text{dalle}} = (33.40 \times 0.2 \times 10) \times 2.5 = 167 \text{ t.}$$

✓ Revêtement + chape : (Longueur × épaisseur × largeur) × 2.2.

$$P_{\text{rev}} = (33.40 \times 0.08 \times 8) \times 2.2 = 47.027 \text{ t.}$$

✓ Trottoir : (Longueur × épaisseur × largeur) × 2.5.

$$P_{\text{trot}} = [(33.40 \times 0.25 \times 1) \times 2.5] \times 2 = 41.75 \text{ t.}$$

✓ Corniche :  $P_{\text{corniche}} = [(33.40 \times 0.21 \times 2.5) \times 2] = 35.07 \text{ t.}$

✓ Grade corps :  $P_{\text{GC}} = 0.2 \times 2 = 0.4 \text{ t.}$

✓ Glissière de sécurité :  $P_{\text{gs}} = 0.2 \times 2 = 0.4 \text{ t.}$

✓ Poids de glissière :  $2 \times 0.06 = 0.12 \text{ t.}$

**La somme G = 291.77 tonne.**

## 2) Poids propre de la poutre :

La poutre étant à section variable donc son poids propre décompose en P1 ; P2 ; P3.

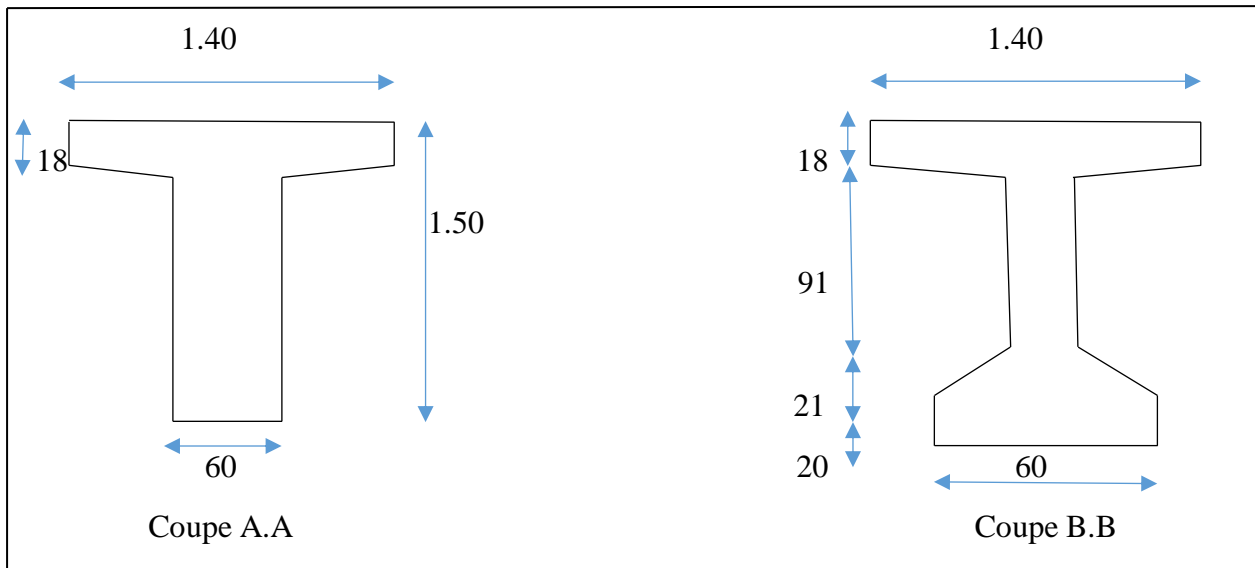


Figure III.2 Coupes A.A et B.B des poutres du tablier du pont

Le calcul des sections de coupes A.A et B.B, nous donnent des résultats comme suite :

$$S_{A.A} = 1 \text{ m}^2.$$

$$S_{B.B} = 0.58 \text{ m}^2.$$

On a:  $(P_1+P_2+P_3) \times 2$ .

$$P_1 = 1 \times 2.45 = 2.45 \text{ t.}$$

$$P_2 = 0.58 \times 13.25 = 7.685 \text{ t.}$$

$$P_3 = (0.58+1)/2 = 0.79 \text{ t.}$$

$$P_{\text{tot}} = \rho \times \sum V = [(2.5 \times (2.45+7.685+0.79)) \times 2] \times 6 = \mathbf{327.75 \text{ t.}}$$

On a résumé le calcul tablier dans un tableau III.2 suivent :

Tableau III.2 Résumé des valeurs trouvé

Tablier	
Charge permanent (G)	291.77 t
Poids des 6 poutres	327.75 t
	$\Sigma = 615.36 \text{ t}$

$$\text{Plot para sismique} = [(0.95 \times 0.90 \times 0.5) \times 2] \times 2.5 = 1.188 \text{ t.}$$



Le poids propre de la culée :

$$G = g_{\text{tab}} + g_{\text{MF}} + g_{\text{dapp}} + g_{\text{D.T}} + g_c + g_{\text{M.R}} + g_{\text{M.G.G}} + g_{\text{sem}} + g_{\text{terr}} + g_{\text{ps}}$$

$$G = 615.36 + 174.22 + 0.75 + 30 + 28.496 + 13.91 + 247.5 + 463.61 + 1.188$$

$$G = 1629.424 \text{ t.}$$

**c/. Calcule des surcharges routières :**

A) les surcharge sont :

- La surcharge de type A(L).
- Surcharge militaire MC120.
- Surcharge exceptionnelle convois D240.
- Le système Bc.
- Surcharge sur trottoir.

b) caractéristiques du pont

1- la largeur roulable  $L_r = 10 \text{ m}$ .

2- la largeur chargeable  $L_c = L_r - (2 \times 1) = 10 - 2 = 8 \text{ m}$ .

3- Le nombre de voie  $n = \frac{L_c}{3} = \frac{8}{3} = 2 \text{ voies}$ .

4- classe des ponts routiers  $L_r = 10 \text{ m} > 7$  donc le pont de 1<sup>er</sup> classe.

c) les surcharges

➤ **Systeme de charge : A(L)**

Pour les ponts comportant des portées unitaires atteignant au plus 200 m.

$$A(l) = 230 + \frac{36000}{12+L} \quad A = a_1 \times a_2 \times A(L).$$

L : portée du pont /  $L = 33.40 \text{ m}$ .

$$\text{Donc : } A(l) = 230 + \frac{36000}{12+33.40} = 1022.95 \times 10^{-3} = 1.023 \text{ t/m}^3.$$

Les coefficients  $a_1$  et  $a_2$  :  $a_1 = 1$  (2voies) donne tableau class de pont.

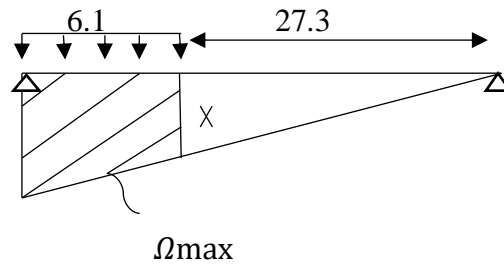
$$a_2 = \frac{V_0}{v} = \frac{3.5}{4} = 0.875 \quad V_0 = 3.5 \text{ class 1 de pont donne tableau.}$$

$$\text{Donc : } A = 1 \times 0.875 \times 1.023 = (0.895 \times 8 \times 33.40) / 2 = 119.59 \text{ t/m}^3.$$

d) les surcharge d'exploitation par Théorème de barré :

❖ Pour Mc120

$$q_{Mc120} = \frac{110}{6.1} = 18.033 \text{ t/ml 1.}$$



Les formules suivent :  $R_{MC120} = q_{MC120} \times \Omega_{max} \times \delta \delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2 \times L} + \frac{0.6}{1+4 \times \frac{G}{S}}$

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2 \times 33.40} + \frac{0.6}{1+4 \times \frac{615.36}{120}} = 1.08.$$

$$\text{Tang } \alpha = \frac{1}{33.4} = \frac{x}{27.3} \quad X = 0.817 \text{ m.}$$

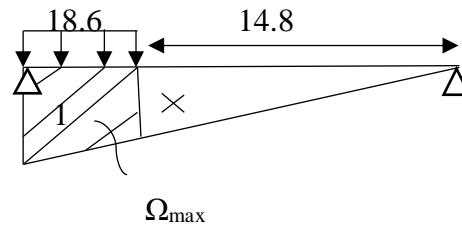
$$\Omega_{max} = \frac{0.817+1}{2} \times 6.1 \times 1.08 = 5.985 \text{ m}^2.$$

$$R_{MC120} = 5.985 \times 18.033 = 107.93 \text{ t.}$$

❖ Pour D240

$$q_{D240} = \frac{240}{18.6} = 12.90.$$

$$\text{Tang } \alpha = \frac{1}{33.4} = \frac{x}{14.8} \quad X = 0.443 \text{ m.}$$

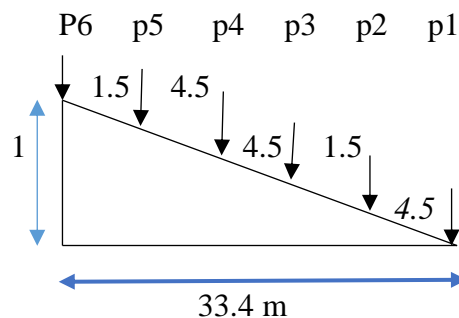


$$\Omega_{max} = \frac{1+0.443}{2} \times 18.6 = 13.42 \text{ m}^2.$$

$$R_{max} = 12.90 \times 13.42 = 173.118 \text{ t.}$$

❖ Pour BC

Disposition dans le sens longitudinal le nombre de camions est limitée à deux, la distance des deux camions d'une même file est déterminée pour produire l'effet le plus défavorable.



$$\sum P_i \times y_i = 12 \times 1 + 12 \times \frac{33.40 - 1.5}{33.40} + 6 \times \frac{33.4 - 6}{33.40} + 12 \times \frac{33.40 - 10.5}{33.40} + 12 \times \frac{33.40 - 12}{33.40} + 6 \times \frac{33.4 - 16.5}{33.40}$$

$$= 47.34 \text{ t.}$$

Donc :  $R_{BC} = \sum P_i y_i \times bc \times \delta \times n_{\text{vois}bc} = 1.10$  classe de pont donne le tableau.

$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1 + 0.2 \times 33.40} + \frac{0.6}{1 + 4 \times \frac{615.36}{30}} = 1.059.$$

$$R_{BC} = 47.34 \times 1.10 \times 1.059 \times 2 = 110.29 \text{ t.}$$

#### ❖ Pour $S_{\text{trottoir}}$

On a deux trottoirs la charge applique est une charge uniforme de  $150 \text{ kg/m}^2$ .

$$q_{\text{tot}} = 0.15 \times 1 \times 33.40 \times 2 = 10.02 \text{ t/ml.}$$

#### ❖ Pour freinage

La formule suivent :  $F = \frac{A \times S}{20 + 0.0035 \times S}$  ;  $A = 1.023$  ;  $S = 8 \times 33.40 = 267.2 \text{ m}^2$ .

$$F = \frac{1.023 \times 267.2}{20 + 0.0035 \times 267.2} = 13.057 \text{ t/ml.}$$

- Calcul le moment de réaction comme suite :

Tableau III.3 Valeurs dues aux surcharges

Elément	R (T)	BL	M <sup>s</sup>
AL (L)	119.59	0.20	23.918
MC <sub>120</sub>	107.93	0.20	21.586
D <sub>240</sub>	173.118	0.20	69.247
BC	110.29	0.20	22.058
S trottoir	10.02	0.20	2.004
Freinage	13.057	0.20	2.611
			$\sum = 141.424$

a) La Combinaison à l'ELU :

$$1.35G + 1.5 BC = (1.35 \times 1629.424) + (1.5 \times 110.29) = 2365.157 \text{ t.}$$

$$1.35G + 1.5 A (L) = (1.35 \times 1629.424) + (1.5 \times 119.59) = 2379.11 \text{ t.}$$

$$1.35G + 1.35 MC_{120} = (1.35 \times 1629.424) + (1.35 \times 107.93) = 2345.43 \text{ t.}$$

$$1.35G + 1.35 D_{240} = (1.35 \times 1629.424) + (1.35 \times 173.118) = 2433.4317 \text{ t.}$$

b) La combinaison à l'ELS :

$$1G + 1.2 BC = (1 \times 1629.424) + (1.2 \times 110.29) = 1761.772 \text{ t.}$$

$$1G + 1.2 A (L) = (1 \times 1629.424) + (1.2 \times 119.59) = 1772.93 \text{ t.}$$

$$1G + 1 MC_{120} = (1 \times 1629.424) + (1 \times 107.93) = 1737.35 \text{ t.}$$

$$1G + 1 D_{240} = (1 \times 1629.424) + (1 \times 173.118) = 1802.54 \text{ t.}$$

d) Calcul de stabilité de la fondation :

On prend la valeur La plus défavorable donne ELS  $\implies N = 1802.54 \text{ t}$

La formule :  $M = M^S - M^R$

$$M^S = 615.01 + 131.92 = 746.93 \text{ t} \cdot \text{m.}$$

$$M^R = 0 = 15 + 2.7816 + 14.248 + 69.688 + 87.024 + 0.15 + 626.576 + 144 = 959.466 \text{ t} \cdot \text{m.}$$

$$M = 959.466 - 746.93 = 212.537 \text{ t}$$

1) Vérification culée cas pieu foré :  $R_{\min/\max} = \frac{N}{n} \pm \frac{Ml}{Wl} \pm \frac{Mt}{Wt}$        $W_i = \frac{n_1 \times d_1^2 + n_2 \times d_2^2}{d_{\max}}$

- On a un nombre de 8 pieux.

Culée :  $\left\{ \begin{array}{l} N = 1802.54 \text{ t.} \\ M_1 = 212.537 \text{ t.} \end{array} \right.$

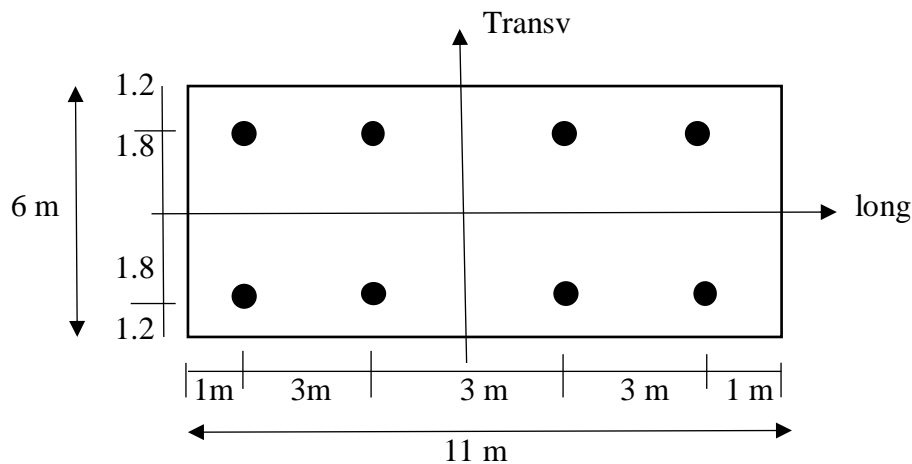


Figure III.3 Répartition des pieux forés dans la semelle/culée

$$W_i = \frac{4 \times 1.8^2 + 4 \times 1.8^2}{1.8} = 14.40 \text{ m.}$$

$$R_{\min} = \frac{1802.54}{8} - \frac{212.537}{14.40} = \mathbf{210.56 \text{ t.}}$$

$$R_{\max} = \frac{1802.54}{8} + \frac{212.537}{14.40} = \mathbf{240.08 \text{ t.}} \implies \text{Vérifié.}$$

Donc la capacité portant de pieu est stable car  $240.08 < 290.5$  (valeur du rapport de sol).

### III.3 Etude de la pile

#### III.3.1 Introduction

La pile est appui intermédiaire qui a pour rôle de transmettre les charges au sol elle se compose d'un chevêtre sur lequel repose le tablier par l'intermédiaire des appareils d'appuis d'épaisseur de 1.20 m, de trois futs circulaires de 1.20 m sont en béton armé composées d'une semelle, les piles sont fondées sur des pieux (forés battues) de diamètre 1200 mm

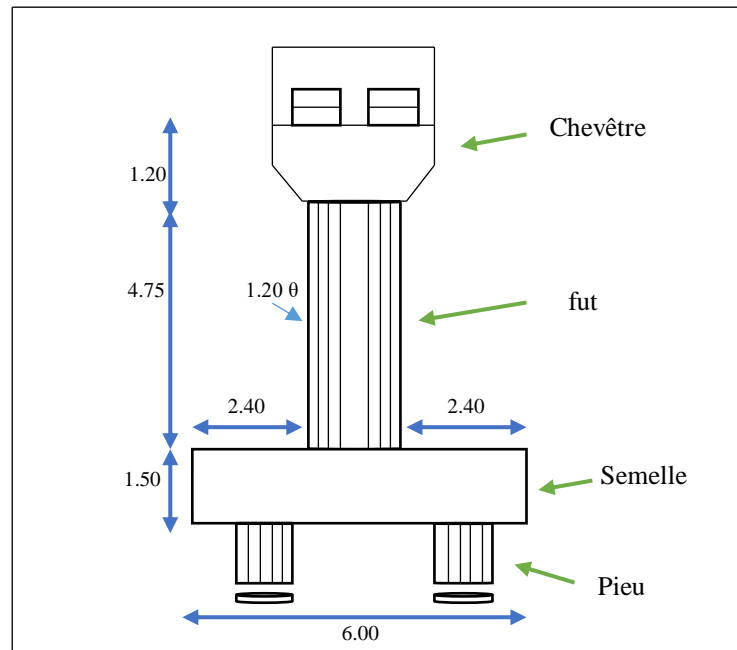


Figure III.4 Schéma de la pile

#### III.3.2 Etude déférente étape de la pile

##### a) Le poids propre :

- La semelle :

Longueur :  $L=10$  m, largeur  $b=6$  m, hauteur  $D=1.5$  m.

$$(10 \times 6 \times 1.5) \times 2.5 = 225 \text{ t.}$$

- Des d'appui :

$$(0.60 \times 0.5 \times 2.5) \times 2 = 0.75 \text{ t.}$$

- Chevêtre :  $p = \rho \times v.$

$$(1.2 + 1.02) \times 2.5 = 5.55 \text{ t.}$$

- Mur caché :

$$[(2 \times 0.20 \times 1.20) \times 2.5] \times 2 = 2.4 \text{ t.}$$

- Fut : (diamètre  $\theta=1.2$  ; hauteur  $h=4.75$ ).

$$\left[ \left( \frac{\pi \times 1.2}{4} \times 4.75 \right) \times 3 \right] \times 2.5 = 2.4 \text{ t.}$$

- Pour calculer le moment dans un tableau comme suite :

Tableau III.4 Détails des valeurs trouvées

elements	Le poids	Bras de levier	Moments
Désd'appuis	0.75	0	0
Fut	40.29	0	0
semelle	225	0	0
Mur caché	2.4	0	0
Chevêtre	5.55	0	0

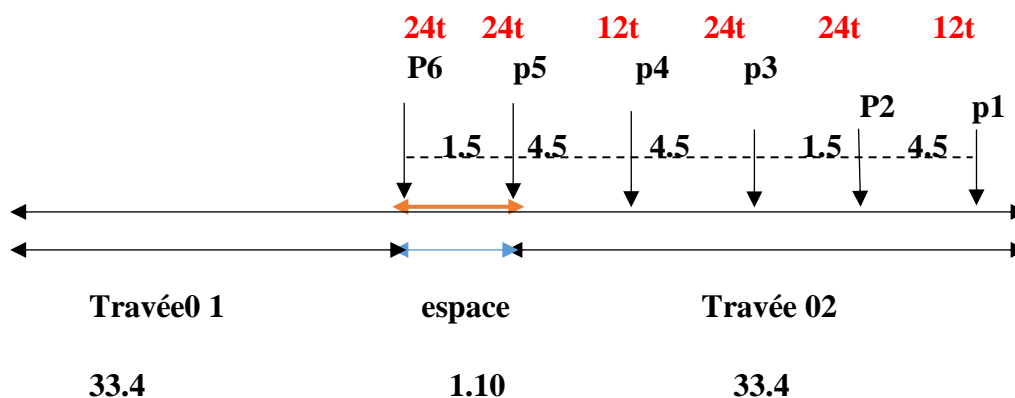
### b) Les charges d'exploitation :

Pour le cas d'étude d'un pont, les actions variables comprennent :

- La surcharge de type A(L).
- Surcharge militaire MC120.
- Surcharge exceptionnelle convois D240.
- Le système Bc

#### ❖ Système BC :

- **Théorème de barré** : pour calculer le moment de élément pile.



$$\sum P_i \times y_i = X_R = [(24 \times 1)] + \left[ \frac{(12 \times (33.4 - 0.4))}{33.4} + \frac{(6 \times (33.4 - 4.9))}{33.4} + \frac{(12 \times (33.4 - 9.4))}{33.4} \right. \\ \left. + \frac{(12 \times (33.4 - 10.9))}{33.4} + \frac{(6 \times (33.4 - 15.4))}{33.4} \right] = 24 + (36.916 \times 2) = 97.38 \text{ m.}$$

Donc :  $L$  (portée de travée)  $L = 33.40 \text{ m}$ ,  $G$  : la charge permanente,  $G = 615.33 \text{ t}$ .

$S^* = 30$ ;  $S^*$  : charge de système,  $Bc$  maximale multipliée au préalable par  $bc$ .

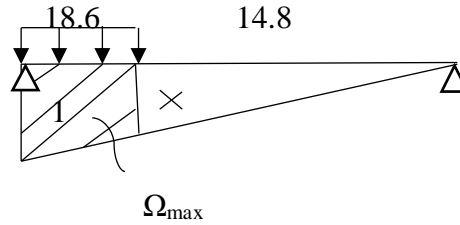
$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2 \times 33.40} + \frac{0.6}{1+4 \times \frac{615.36}{30}} = 1.059; \quad R_{BC} = \sum P_i y_i \times bc \times \delta$$

$$R_{Bc} = 97.83 \times 1.1 \times 1.059 = 113.96 \text{ t}$$

❖ **Surcharge D<sub>240</sub> :**

$$q_{D240} = \frac{240}{18.6} = 12.90.$$

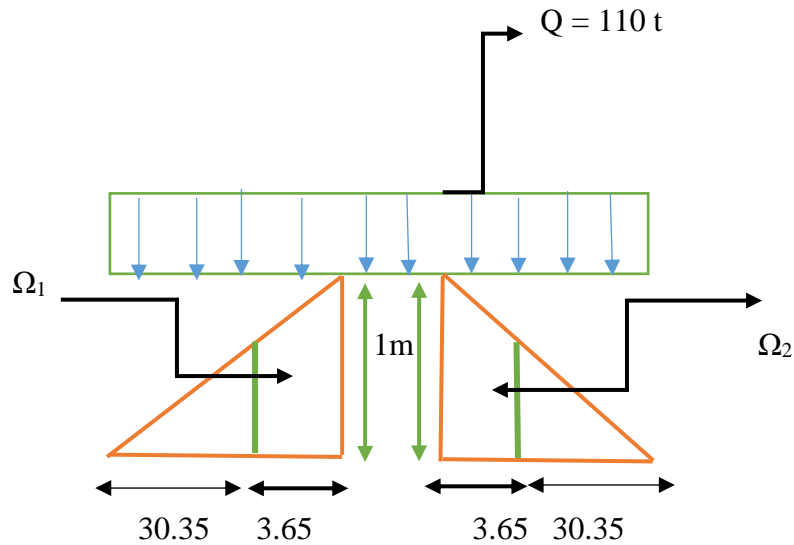
$$\text{Tang } \alpha = \frac{1}{33.4} = \frac{x}{14.8} \quad X = 0.443 \text{ m.}$$



$$\Omega_{\max} = \frac{1+0.443}{2} \times 18.6 = 13.42 \text{ m}^2.$$

$$R_{\max} = 12.90 \times 13.42 = 173.118 \text{ t. (Le cas plus défavorable).}$$

❖ **Surcharge Mc<sub>120</sub> :**



$$\delta = 1 + \frac{0.4}{1+0.2 \times 33.40} + \frac{0.6}{1+4 \times \frac{615.36}{120}} = 1.08.$$

$$Q = \frac{110}{6.1} = 18.032 \text{ t.}$$

$$\text{Tang } \alpha = \frac{1}{33.4} = \frac{x}{30.35}; \quad X_1 = X_2 = 0.909 \text{ m.}$$

$$\Omega_1 = \frac{(0.909+1)}{2} \times 3.05 = 2.911 \text{ (}\Omega_1 = \Omega_2\text{)}.$$

$$\Omega_{\max} = \Omega_1 + \Omega_2 = \Omega_{\max} = 5.822.$$

$$R_{MC120} = 5.822 \times 18.033 = 113.38 \text{ t.}$$

- Calcul le moment de réaction comme suite :

Tableau III.5 Valeurs dues aux surcharges

Element	R(t)	B.L(m)	Moment (t*m)
Mc120	113.38	0.55	62.36
BC	113.96	0.55	62.68
M <sub>D240</sub>	173.12	0.55	95.22
A surcharges	119.59	0.55	65.77
			M = 286.03

- Calcul de la charge Permanente total :

Tableau III.6 Valeurs dues aux surcharges permanentes

éléments	Poids (t)
Tablier	615.36
Des appuis	0.75
Fut	40.29
semelle	225
Chevêtre	5.55
Mur cache	2.4
$\Sigma$ =La somme	889.35

- a) *La Combinaison ELU :*

$$1.35G + 1.5 BC = (1.35 \times 889.35) + (1.5 \times 113.96) = 1371.56 \text{ t.}$$

$$1.35G + 1.5 A (L) = (1.35 \times 889.35) + (1.5 \times 119.59) = 1380.01 \text{ t.}$$

$$1.35G + 1.35 MC_{120} = (1.35 \times 889.35) + (1.35 \times 113.38) = 1353.69 \text{ t.}$$

$$1.35G + 1.35 D_{240} = (1.35 \times 889.35) + (1.35 \times 173.12) = 1434.33 \text{ t.}$$

- b) *La combinaison ELS :*

$$1G + 1.2 BC = (1 \times 889.35) + (1.2 \times 110.29) = 1021.62 \text{ t.}$$

$$1G + 1.2 A (L) = (1 \times 889.35) + (1.2 \times 119.59) = 1032.86 \text{ t.}$$

$$1G + 1 MC_{120} = (1 \times 889.35) + (1 \times 113.38) = 1002.73 \text{ t.}$$

$$1G + 1 D_{240} = (1 \times 889.35) + (1 \times 173.12) = 1062.47 \text{ t.}$$



On prend le cas le plus défavorable donc  $\implies N = 1062.47 \text{ t}$ .

c) **Calcul de stabilité de la fondation :**

2) Vérification pile cas pieu foré :  $R_{\min/\max} = \frac{N}{n} \pm \frac{Ml}{Wl} \pm \frac{Mt}{Wt}$   $W_1 = \frac{n1 \times d_1^2 + n2 \times d_2^2}{d_{\max}}$

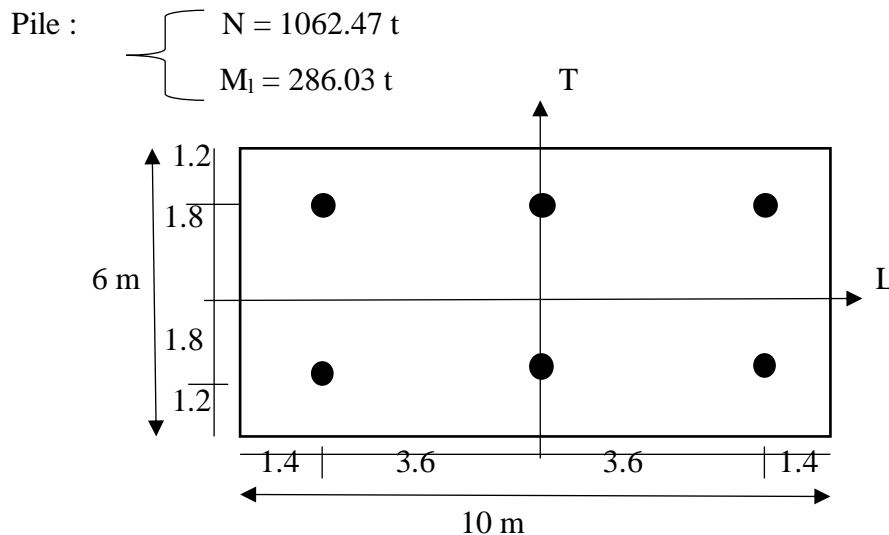


Figure III.5 Répartition des pieux forés dans la semelle/pile

$$W_i = \frac{3 \times 1.8^2 + 3 \times 1.8^2}{1.8} = 10.8 \text{ m.}$$

$$R_{\min} = \frac{1062.47}{6} - \frac{286.03}{10.8} = 150.59 \text{ t.}$$

$$R_{\max} = \frac{1802.54}{8} + \frac{212.537}{14.40} = 203.56 \text{ t.} \implies \text{Vérifier.}$$

Donc La capacité portant de pieu est stable car  $203.56 < 290.5$  (valeur du rapport de sol).

- Cas pieu battu utiliser formule Crandall comme suite :

- Calcule résistance dynamique  $R_d = \frac{1}{F} \times \frac{M^2 \times h}{\left(e + \frac{e^1}{2}\right) \times (M+P)}$

Avec :  $R_d$  : résistance dynamique.

$M$  : poids du mouton = 1150 kg.

$P$  : poids des pièces mobiles nécessaire au battage = 1864 t.

$H$  : hauteur de chute du mouton = 2.3 m.

$e$  : enfoncement moyen du pieu par coup de mouton = 0.7 mm.

$e^1$  : refus élastique du sol = 4 mm.

D'où la valeur de la portance d'un pieu battu  $R_d$  est donnée par le calcule suivant :

$$R_d = \frac{1}{F} \times \frac{(1150)^2 \times 2.3}{(2.7 \times 10^{-3}) \times (1150 + 1864)} = 124.6 \text{ t.}$$

Pré-Dimensionnement (emplacement des pieux-éviter l'effet de groupe)

- 3) Vérification culée cas pieu battu :  
 - On prendra un nombre de 19 pieux.

Culée :  $\left\{ \begin{array}{l} N = 1802.56 \text{ t.} \\ M_1 = 212.537 \text{ t.} \end{array} \right.$

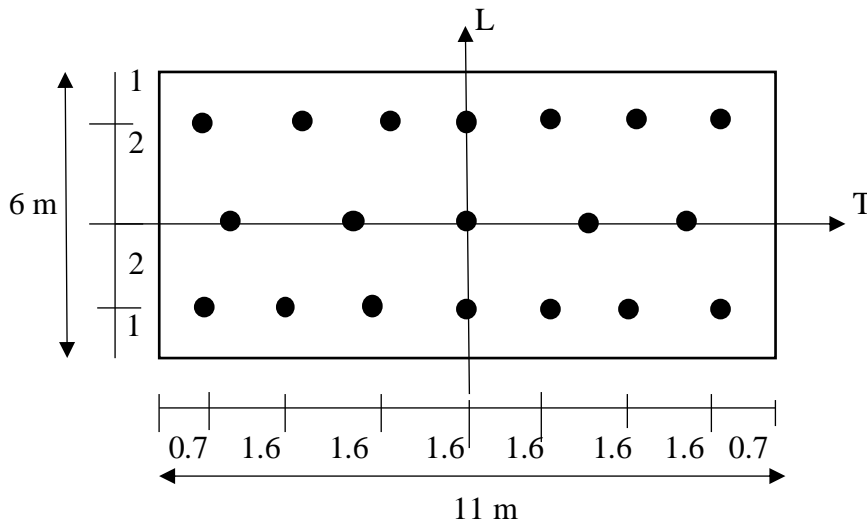


Figure III.6 Répartition des pieux battu dans la semelle/culée

Calcule le module longitudinale  $W_1$  :

$$W_1 = \frac{n_1 \times x_1^2 + n_2 \times x_2^2}{x_{max}}$$

$$W_1 = \frac{3 \times 0^2 + 4 \times 1.6^2 + 4 \times 3.2^2 + 4 \times 4.8^2 + 2 \times 2^2 + 4 \times 4^2}{4.8} = 44.86 \text{ m}$$

Donc étape suivent vérification :  $R_{min/max} = \frac{N}{n} \pm \frac{Ml}{Wl} \pm \frac{Mt}{Wt}$

$$R_{max} = \frac{1802.56}{19} + \frac{212.537}{44.86} = 99.60 \text{ t} < R_d = 124.6 \text{ t} \text{ (pas de tassement).}$$

$$R_{min} = \frac{1802.56}{19} - \frac{212.537}{44.86} = 90.14 \text{ t} > 0 \text{ (pas d'arrachement).}$$

**Remarque :** pieu stable.

- 4) Vérification pile cas pieu battu :  
 - On prendra un nombre de 10 pieux.

Pile :  $\left\{ \begin{array}{l} N = 1062.47 \text{ t.} \\ M_1 = 286.03 \text{ t.} \end{array} \right.$

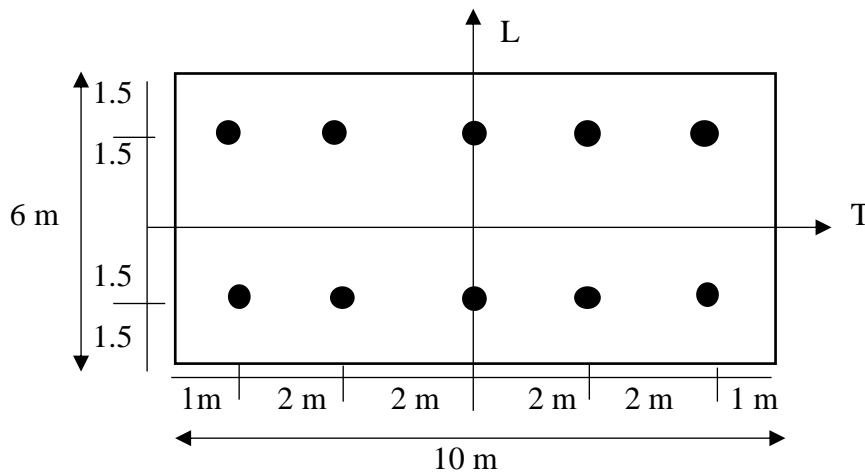


Figure III.7 Répartition des pieux battu dans la semelle/pile

Calcule le module longitudinale  $W_l$  :

$$W_l = \frac{n_1 \times x_1^2 + n_2 \times x_2^2}{x_{max}}$$

$$W_l = \frac{2 \times 0^2 + 4 \times 2^2 + 4 \times 4^2}{4} = 20 \text{ m.}$$

Donc étape suivent vérification :  $R_{\min/\max} = \frac{N}{n} \pm \frac{Ml}{Wl} \pm \frac{Mt}{Wt}$

$$R_{\max} = \frac{1062.47}{10} + \frac{286.03}{20} = 120.54 \text{ t} < R_d = 124.6 \text{ t (pas de tassement).}$$

$$R_{\min} = \frac{1062.47}{10} - \frac{286.03}{20} = 91.94 \text{ t} > 0 \text{ (pas d'arrachement).}$$

**Remarque :** pieu stable.

### Conclusion

Dans ce chapitre, On a procédé à des calculs fins, afin de comparer deux types de fondations profondes (pieux forés et battus), du point de vue technique et économique

- Une descente des charges routières (poids propre, surcharge retirée, charge d'exploitation, combinaison de la charge ELS...) pour obtenir les éléments de réduction (M N) des culés et piles.

- la capacité portance des pieux pour pieu foré (culées et piles) ainsi que pieu battu (culées et piles). Des essais in situ qui déterminent Q admissible issue du rapport de sol qui confirme pieu foré et la formule de crandall (Rd) qui vérifie pieu battu.

- La stabilité de l'ensemble des pieux est obligatoire pour éviter le tassement et l'arrachement

De sol. En déduction pieux forés sont les plus sollicités rentables.



**Chapitre IV :**  
**Organigramme et Calcul**  
**sur Matlab**

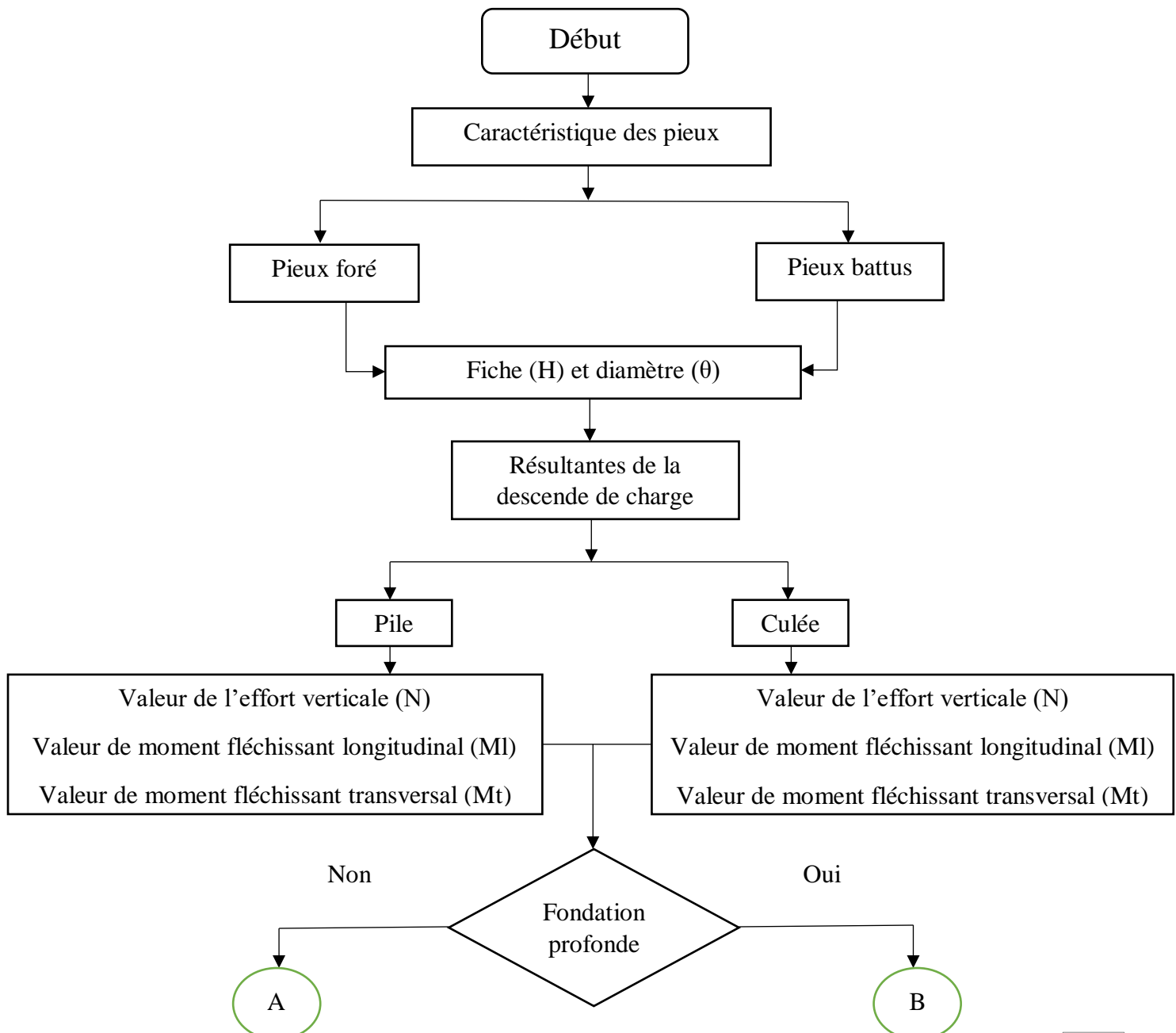
## Organigramme et Calcul sur Matlab

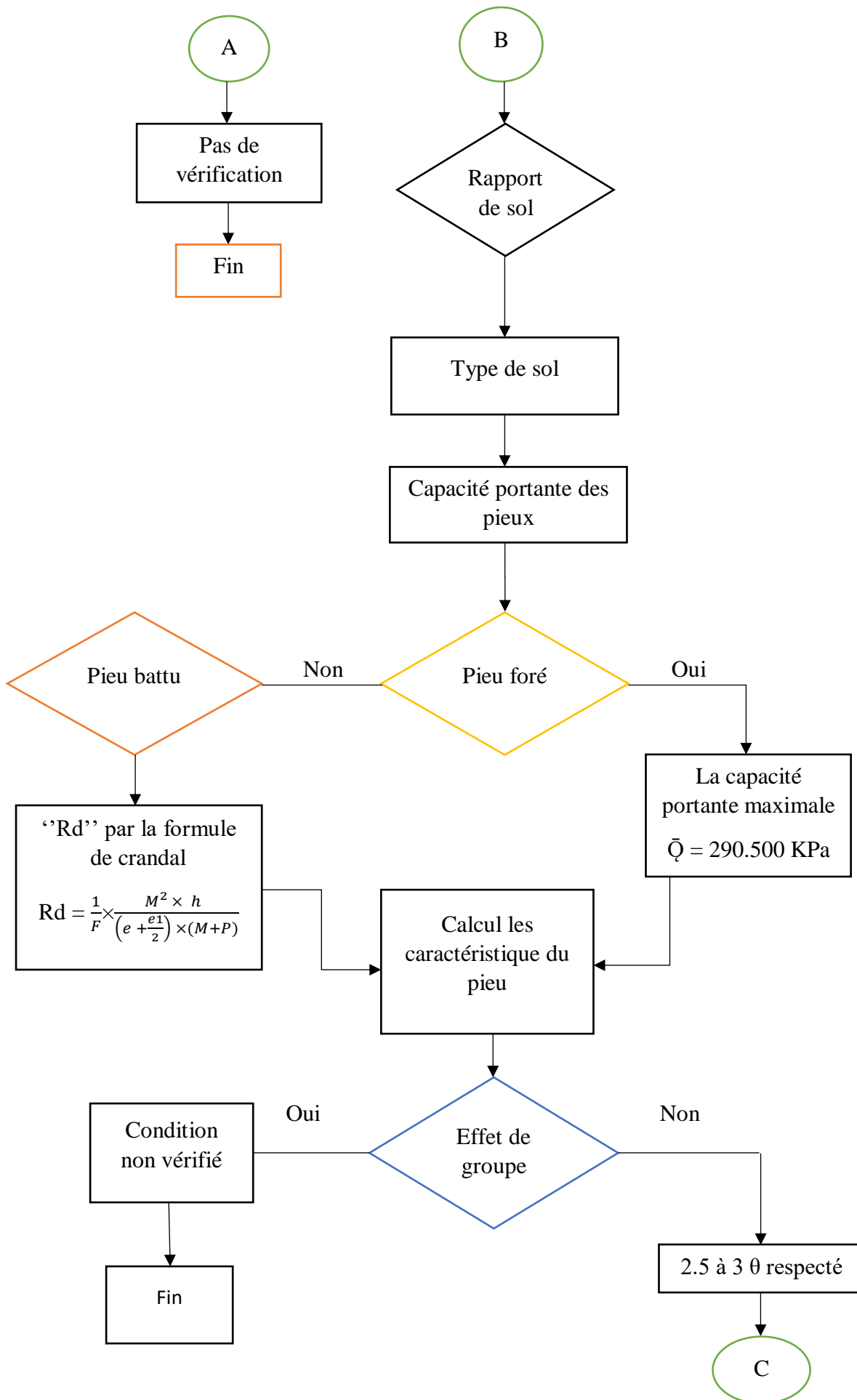
### IV.1 Préambule

L'analyse analytique consiste à écrire un algorithme (organigramme) [35], sur la base des équations et des expressions utilisées pour le calcul de la portance des pieux forés et des pieux battus. La vérification à la stabilité de chaque pieu sera faite en déterminant la valeur de réaction maximale ( $R_{max}$ ) et la valeur de la réaction minimale ( $R_{min}$ ), qu'il faut les comparer à la portance du pieu forée ( $Q_{admissible}$ ) et  $R_d$  (déterminée par la formule de "Crandall").

A cet effet, un programme écrit sur le compilateur "Matlab" [36], a été établi et ce, afin de comparer les résultats trouvés manuellement (chapitre III). La figure IV.1, donne l'organigramme qui a été élaboré pour définir les différentes phases de calcul.

### IV.2 Organigramme de calcul





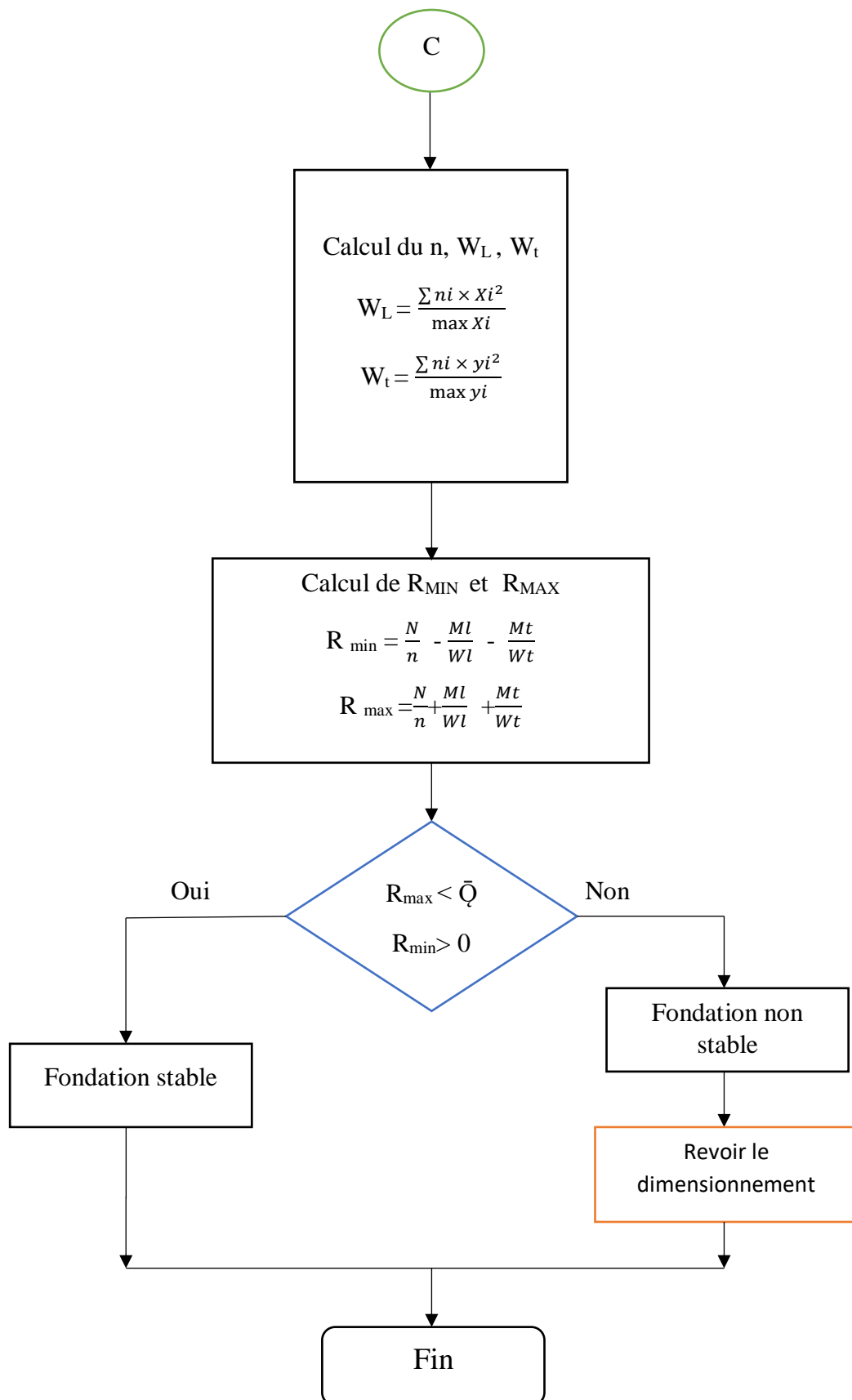


Figure IV.1 Organigramme de calcul des pieux

### IV.3 Listing du programme sur Matlab

Le listing suivant a été écrit avec le langage ‘‘Fortran’’, compilateur du logiciel ‘‘ Matlab’’. Ce programme est composé de quatre (04) parties :

- \* Pieux forés pour la culée ;
- \* Pieux forés pour la pile ;
- \* Pieux battus pour la culée ;
- \* Pieux battus pour la pile.

\*\*\*\*\* Programme de Calcul des Pieux pour Appuis \*\*\*\*\*

```

clear all
close all
clc
%-----
%-----Pieux Forés-----
%-----
%----- Pieux forés Culée -----
N=1802.54; % effort vertical
Ml=212.537; % moment fléchissant longitudinal
n=8; % nombre de pieu
n1=4;
n2=n1;
d1=1.8; % distances
d2=d1;
Qmax=290.5; % capacité portante
%-----calcul des formules-----
Wl=((n1*d1^2)+(n2*d2^2))/max(d1,d2)
Rmax=(N/n)+(Ml/Wl)
Rmin=(N/n)-(Ml/Wl)
if (Rmax<=Qmax) && (Rmin>0)

```



```

    disp('fondation stable')
else
    disp('fondation non stable')
end

%-----
%-----Pieux forés Pile -----

N2=1062.47; % effort vertical
Ml2=286.03; % moment fléchissant longitudinal
nfp=6; % nombre de pieu
n1fp=3;
n2fp=n1fp;
d1fp=1.8; % distances
d2fp=d1fp;

%-----calculs des formules-----

Wl2=((n1fp*d1fp^2)+(n2fp*d2fp^2))/max(d1fp,d2fp)
Rmax2=(N2/nfp)+(Ml2/Wl2)
Rmin2=(N2/nfp)-(Ml2/Wl2)
if (Rmax<=Qmax) && (Rmin>0)
    disp('fondation stable')
else
    disp('fondation non stable')
end

%-----
%-----
%-----Pieux battus -----

F=3; % fréquence
M=1150; % poids du mouton
P=1864; % poids des pièces mobiles au battage
h=2.3; % hauteur de chute

```

```

e=0.7; % enfoncement moyen du pieu
e1=4; % refus élastique du sol
%-----formule Crandall_calcul-----
Rd=(1/F)*((M^2*h)/((e+(e1/2))*(M+P)))
%-----
%-----Pieux battus Culée-----
N3=1802.56; % effort vertical
Ml3=212.537; % moment fléchissant longitudinal
nbc=19; % nombre de pieu
ni=[3 4 4 4 2 4];
x=[0 1.6 3.2 4.8 2 4]; % distances

%-----calcul des formules-----
Wl3=sum(ni.*x.^2)/max(x)
Rmax3=(N3/nbc)+(Ml3/Wl3)
Rmin3=(N3/nbc)-(Ml3/Wl3)

if (Rmax3<=Rd) && (Rmin3>0)
    disp('pas de tassement et pas d arrachement, donc une fondation stable')
else
    disp('il y a un tassement et un arrachement, donc une fondation non stable')
end
%-----
%-----Pieux battus Pile-----
N4=1062.47; % effort vertical
Ml4=286.03; % moment fléchissant longitudinal
nbp=10; % nombre de pieu
ni2=[2 4 4];
x2=[0 2 4]; % distances

```

```
%-----calculs des formules-----  
Wl4=sum(ni2.*x2.^2)/max(x2)  
Rmax4=(N4/nbp)+(Ml4/Wl4)  
Rmin4=(N4/nbp)-(Ml4/Wl4)  
if (Rmax4<=Qmax) && (Rmin4>0)  
    disp('pas de tassement et pas d arrachement, donc une fondation stable')  
else  
    disp('il y a un tassement et un arrachement, donc une fondation non stable')  
end
```

```
*****  
*****
```

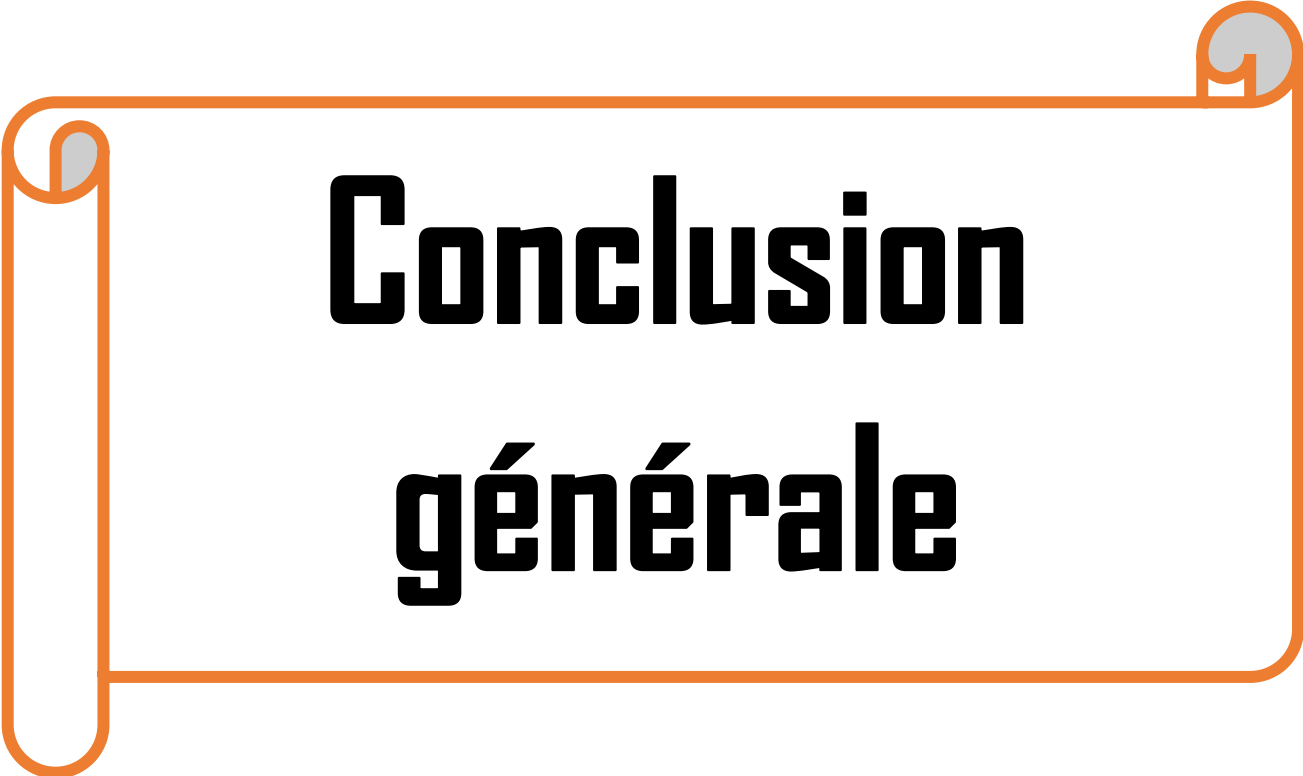
## IV.4 Comparaison des résultats et discussion

Plusieurs chercheurs ont étudié la comparaison technique et des fois économiques entre l'immolation des pieux forés à celle des pieux battus. Compte tenu de l'ampleur et de l'importance des fondations sur pieux qui supportent des structures de haute performance, telles que les ponts, les immeubles de grande hauteur, les centrales électriques et les plateformes (des aérodromes, des aéroports, etc.), il devient nécessaire de trouver la meilleure conception de fondation sur pieux en en termes d'économie et de performance. Le coût des fondations, pour ce type de systèmes structurels, peut varier de 5 à 20 % du coût de construction de la structure, tandis que le nombre de pieux nécessaires peut dépasser plusieurs milliers. C'est pour cela, qu'il faut passer à la formulation d'un problème d'optimisation visant à atteindre la conception la plus économique (optimale) des pieux [37].

Pour l'exemple traité, nous avons trouvé un total de pieux forés (de fiche 25 m) de 8 pieux pour la culée et six (06) pieux pour la pile, avec une capacité portante de 290.5 tonne (pour la pile et pour la culée), selon le rapport de sol établi à cette effet. La stabilité vis-à-vis au tassement et à l'arrachement, a été largement vérifiée.

En ce qui concerne les pieux battus, qui sont généralement issus des chutes des "papelines" des projets des conduites de gaz et de pétrole de "Sonatrach", on a trouvé un nombre de 19 pieux battus pour la culée et 10 pieux pour la pile, avec une capacité portante de  $R_d = 124.6$  tonne (selon la formule de Crandall et les conditions battage).

De point de vue économique et vu le manque de données financières exactes auprès des entreprises économique, comme la SAPTA, l'ENGOA et COSIDER, ainsi que les centres de calcul et les BET, comme CTTP et SAETI, et ce, à cause de non-exécution des pieux battus depuis plus de 15ans en Algérie, On peut en déduire que la solution "pieu foré", reste la solution la plus répondeur pour les fondations des ponts et des constructions de grandes dimensions.



# **Conclusion générale**

## Conclusions Générales et Recommandations

Au terme du travail de ce mémoire, consistant à comparer deux types de fondations profondes d'un pont routier, sollicité par différents types de surcharges routières, avec le cas d'étude traité, plusieurs conclusions ont été observées et ceci, compte tenu de l'importance des fondations sur pieux qui supportent les structures de ponts. Les conclusions à tirer se résument à :

- \* Le choix judicieux du type de fondations profondes en pieux, pour tout type de ponts, ne peut se faire, sans l'analyse préalable des résultats des investigations (essais et calcul de la portance) du rapport géotechnique.
- \* Une descente des charges routières, avec l'application des normes et règlements en vigueur ; est nécessaire pour déterminer les éléments de réduction (M, N et H), à la base et milieu de la semelle de fondation.
- \* Il faut impérativement avoir déterminé la portance du pieu foré par les essais in situ (pression-métrique, pénétromètre statique ou autre), ou pieu battu (Rd) par la formule de Crandall ou des Hollandais.
- \* La stabilité de l'ensemble des pieux est obligatoire pour éviter le tassement et l'arrachement.
- \* La vérification de non effet de groupe pour chaque pieu doit satisfaire les conditions d'espacement entre deux pieux adjacents.
- \* Les pieux forés sont les plus utilisés pour les fondations des appuis des ponts, cependant l'utilisation des pieux battus est nécessaire en cas d'urgence d'exécution (risques majeurs, inondations, dégâts matériels comme chute des appuis).

Pour les futurs travaux, nous recommandons de faire des études plus poussées, en prenant en considération des bases de données de plusieurs cas de fondations de ponts. et en élargissant d'autres types de pieux (battu préfabriqué en BA ou BP, palpieux, micro pieux, etc...). Aussi, un travail numérique basé sur la méthode des éléments, par le biais des logiciels de calcul comme Plaxis, Ansys, GEOFOND, Flac, Abaqus, etc.

Un travail par investigation expérimentale avec des essais sur des échantillons de pieux à échelle réduit, donnera plus de renseignements et résultats.

Des approches pratiques, avec des stages au niveau des organes et organismes spécialisés dans le domaine de réalisation des pieux, comme : la SAPTA, l'ENGOA et COSIDER, ainsi que les centres de calcul et les BET, tels que le CTPP, la SAETI et le LCTP, sont recommandées.

**Références Bibliographiques**

- [1] Mansour M & Rafaraafet M « Etude de fondations d'un pont pour le projet d'un ouvrage d'art sur oued Louse Mascara », mémoire de master 2, Option Géotechnique, Département de Génie Civil, université de Blida1, 2019, Algérie.
- [2] « Naissance-des-ponts », Planete-tp.com (publié le 27 novembre 2007 (modifié le 4 mars 2008)).
- [3] Chelit A « Modélisation non linéaire des poutres renforcées par des TFC », mémoire de master 2, Département de Génie Civil, Université de Blida1, 2019, Algérie.
- [4] Abdessemed M « Fondations des Ouvrages d'Art », Cours de VOA2, Master2 Option géotechnique, Département de Génie civil, Université de Blida1, 2018, Algérie.
- [5] Mokhtari A « Comparaison entre les différents matériaux de construction », Rapport pont 4 avril 2015.
- [6] Akabli M « Les ponts et leurs classification », Article juillet 30, 2018, France.
- [7] Nick M « Top 20 des ponts les plus spectaculaires au monde », article 30 décembre2021, France.
- [8] Bouquerel M « La passerelle cyclistes et piétons entre Sully-sur-Loire et Saint-Père-sur-Loire est ouverte », article 30 mai 2020, France.
- [9] Luc S « Géotechnique pour le technicien IUT Génie Civil et Construction Durable », Cours de MXG5 Licence Géotechnique, Génie Civil, 2018, France.
- [10] Khadri H « fondation », article avril 07, 2015, Algérie.
- [11] Zaidi L & Selatnia F « Modélisation d'un pieu profond sous chargement axial », mémoire de master 2, Département de Génie Civil, l'Université 08 Mai 1945 de Guelma, 2020, Algérie.
- [12] Belkadi A & Malti A « Calcul de fondations profondes », mémoire de master 2, Département de Génie Civil, Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, 2021, Algérie.
- [13] Kerney F & Bouyakoub M « Dimensionnement des fondations sur pieux sous charge horizontale-étude comparative des méthodes de calcul », mémoire de master 2, Option géotechnique, Département de Génie civil, Université de Blida 1, 2014, Algérie.
- [14] Djeblio T « Etude des fondations profondes d'une tour+14A VEC une modélisation numérique », mémoire de master 2, Option structure, Département de Génie civil, Université de Blida 1, 2020, Algérie.
- [15] Mousaoui O & Bouanane A « Dimensionnement du corps de chausser d'un tronçon routier reliant le port de Djendjen a l'autoroute est-ouest, calcul d'une fondation d'un viaduc et étude de stabilité d'un talus situe le long du tronçon », mémoire de master 2, Option géotechnique, Département de Génie civil, Université Blida 1, 2021, Algérie.

- [16] Ali Bachir O « Pieu isole sous charge axial Contribution à la détermination des paramètres de transfert de charge », mémoire de master 2, Option géotechnique, Département de Génie civil, Université Blida 1, 2013, Algérie.
- [17] Mahdi H & Ouldeneould A « Dimensionnement des pieux charges axiales étude comparative à partir d'une base de données locale d'essai de chargement de pieux », mémoire de master 2, Département de Génie civil, Université blida1, 2011, Algérie.
- [18] Plumelle C « fondation profonde et pieux », cour C.N.A.M, Option Géotechnique B1/B6, (2005).
- [19] Addaci O « Analyse numérique par la méthode des éléments finis d'un pieu isolé sollicité par une charge latérale », mémoire de master 2, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2012, Algérie.
- [20] Kacem K « Contribution à l'étude du comportement des pieux soumis à des charges horizontales et dynamiques », Mémoire de master 2, Option géotechnique, Département de Génie civil, Université d'USTHB, 2010, Algérie.
- [21] Saadaoui A « Analyse par modélisation numérique des glissements de terrain dus à la construction des ouvrages d'art », mémoire de magister, Université 08 mai Guelma 1945, Année 2011, Algérien.
- [22] Bougara M & Bougara F « Etude et simulation numérique du comportement des pieux sous charges axiales », mémoire de master 2, Université Mohammed Al-siddiq bin yahya Jijel, 2020, Algérie.
- [23] Zhi-Qiang F & Jean M.C & Gregory T « Méthode des Eléments Finis », cour MEF, Licence GMP-ME23, Université d'Evry – Val d'Essonne, 2012.
- [24] Nemri I « Formulation du problème d'élasticité par la méthode des éléments finis avec la prise en compte des éléments d'interface (Application aux calculs des pieux) », Mémoire de master 2, Option géotechnique, Université Ziane Achour de Djelfa, 2016, Algérie.
- [25] Boukhatер GH « Etude théorique en calcul à la rupture de la charge limite de groupe de pieux », Thèse de Doctorat, Université Badji- Mokhtar-Annaba, 2011, Algérie.
- [26] Zaidi.L & Selatnia F « Modélisation D'un pieu profonde sous Chargement axial », mémoire de Master 2, Université 08 Mai 1945 de Guelma, 2020, Algérie.
- [27] Bouafia A « Analyse comparative des méthodes de calcul des pieux forés isolés à partir de l'essai SPT », Revue française de géotechnique, no 105, p 41-50, 2003.
- [28] Bouafia A « Calcul des ouvrages géotechniques problèmes résolus », livre, Université Saad Dahleb de Blida, 2018, Algérie.
- [29] Mohammed Lakhdar R « Etude Numérique De L'interaction Sol-Pieu », Magister en Génie Civil, Université Mohamed Khider Biskra, 2012, Algérie.
- [30] Hassini I « Evaluation des tassements pour une fondation profonde », mémoire de Maste2, Département de génie civil, Université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou, 2016, Algérie.



- [31] Yahiaoui O « Comportement d'un pieu isolé sous charges verticales dans un sableux », mémoire de Master 2, Département de génie civil, Université Mohamed Boudiaf M'sila, 2016, Algérie.
- [32] Hamdidi.T « Étude de comportement d'une fondation sur un groupe de pieux », mémoire de Master 2, Département de génie civil, Université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou, 2019, Algérie.
- [33] Messai N & Hannachi S « Modélisation du comportement des fondations profondes : cas de groupe des pieux », Mémoire de Master 2, Université Larbi Tébessi Tébessa, 2017, Algérie.
- [34] Fezazi C « simulation et réalisation d'un système anti incendie à ondes sonores », Mémoire de Master 2, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2020, Algérie.
- [35] Taibi N & Taibi S « Pratique du Fortran 77 », Cours et exercices résolus, (livre), 3<sup>ème</sup> Edition revue et corrigée, Berti Editions, 1992, Dely Brahim, Alger.
- [36] Mameri A « Méthodes numériques », Cours, TD et TP Examens, (Matlab), 2016, Université de Tlemcen (Abu Bakr Belkaid ), Algérie.
- [37] Letsios Ch & Lagaros N.D & Papadrakakis M « Optimum design of pile foundations », Proceedings of the Sixth International Conference on Engineering Computational Technology, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland, Paper 180.