

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structure

Par: EL HADJ SAID Khadidja & BILLAMI Meriem

Sujet

ETUDE DE L'EFFET DES CONSTRUCTIONS SOUTERRAINES SUR LES FONDATIONS

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

BEDJAOUI M. C.	MAITRE ASSISTANT	Université de Tlemcen	Président
BOURABAH M. A.	MAITRE DE CONFERENCES	Université de Tlemcen	Examinatrice
EL HOUARI N.	MAITRE DE CONFERENCES	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicaces

Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Je dédie ce travail à :

- Ma mère, pour son amour, ses encouragements, ses sacrifices, pour son soutien durant toutes ces longues années d'études jusqu'à ce jour.
- Mes sœurs Meriem et Fatima Zohra.
- Toute la famille Bendehina.
- Mes amies de la promotion M2 Structure (2021,2022).
- Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.

El Hadj Said Khadidja

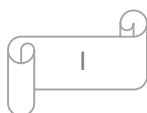
Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents que j'aime par-dessus tous, pour l'éducation qu'ils ont su me donner et qui m'a permis avec l'aide du BON DIEU d'arriver là où je suis.

Aussi, à ma famille et mes amis pour leurs soutiens et leur disponibilité, je n'aurai pas à les nommer, ils se reconnaîtront d'eux même.

Je tiens aussi à dédier ce travail à tous mes camarades de la promotion M2 Structure (2021,2022).

Billami Meriem



Remerciements

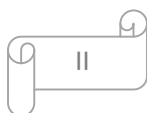
Je tiens à remercier Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement notre encadrante Mme El Houari N. Maitre de conférences à l'université de Tlemcen pour ses conseils précieux et pour sa patience, sa disponibilité et surtout toutes les commodités et aisances qu'elle nous a apportées durant la préparation de ce mémoire.

Nous tenons à remercier, aussi, vivement et respectueusement, Mr Bedjaoui Mohammed Chakib qui nous a fait l'honneur de présider le jury. Nous remercions aussi vivement Mme Bourabah Maghnia Asmahane Maitre de conférence à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

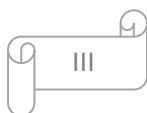
Merci à tous



Résumé

Dans ce mémoire, des analyses sont présentées pour estimer l'effet du creusement d'un tunnel sur un pieu isolé déjà existant. Deux cas d'étude sont présentés pour analyser les réponses latérales et verticales du pieu et du sol. En premier, une estimation de ces mouvements sans la présence du pieu est effectuée. Et en second, l'analyse de l'effet du creusement du tunnel sur le pieu est présentée ainsi que les efforts et les moments fléchissant. Aussi, une étude paramétrique a été effectuée en vue de voir l'influence de trois paramètres: la position horizontale séparant l'axe du pieu de l'axe vertical du tunnel, la longueur du pieu et finalement la profondeur du tunnel. Les résultats trouvés ont été comparés à d'autres fournis par d'autres auteurs en vue de faire des comparaisons, ils sont en bon accord.

Mots Clés : Tunnel, Pieu isolé, Modélisations, Etude paramétrique.



Abstract

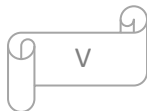
In this dissertation, analyzes are presented to estimate the effect of tunneling on an existing single pile. Two case studies are presented to analyze lateral and vertical soil and pile responses. First, an estimation of these movements without the presence of the pile is carried out. And secondly, the analysis of the effect of the tunneling on the pile is presented as well as the forces and the bending moments. Also, a parametric study was carried out in order to see the influence of three parameters: the horizontal position separating the pile axis from the vertical tunnel axis, the pile length and finally the tunnel depth. The results found were compared with others provided by other authors in order to make comparisons, they are in good agreement.

Keywords: Tunnels, Single pile, Simulation, Parametric study,

ملخص

في هذه الأطروحة ، يتم تقديم التحليلات لتقدير تأثير حفر نفق على ركيزة معزولة موجودة بالفعل. تم عرض دراستين لتحليل الاستجابات الجانبية والرأسية للتربة والكومة. أولاً ، يتم إجراء تقدير لهذه الحركات دون وجود الكومة. وثانياً ، تمعرض تحليل تأثير النفق على الركيزة وكذلك القوى ولحظات الانحناء. كما أجريت دراسة باراميتريية لمعرفة تأثير العوامل الثلاثة: الوضع الأفقي الذي يفصل محور الركيزة عن المحور المتوسط الرأسي للنفق ، وطول الركيزة ، وأخيراً عمق النفق. تمت مقارنة النتائج التي تم العثور عليها مع نتائج أخرى قدمها باحثون آخرون من أجل إجراء مقارنات ، فهما متفقان جيداً.

الكلمات المفتاحية: نفق ، ركيزة معزولة ، نمذجة ، دراسة باراميتريية



Listes des figures et tableaux

Chapitre 1

Figure 1.1 : Les méthodes d'exécution.....	4
Figure 1.2 : Plan de tir séquentiel optimisé pour le tunnel de Chamoise (1993).....	5
Figure 1.3 : Cycle du creusement à l'explosif.....	6
Figure 1.4 : Différentes catégories des machines de creusement (El Houari, 2008)	7
Figure. 1.5 : Bouclier a. Lötschberg 1908 b. Saverne 19 juin 2012.....	9
Figure. 1.6 : Principales fonctions du tunnelier.....	10
Figure1.7 : Tunnelier pour la construction du tunnel de base St. Gothard. Soutènement par ancrage, cintres et béton armé.....	11
Figure1.8 : Tunnelier à front pressurisé.....	13
Figure1.9 : Bouclier à pression de boue (Chantier METEOR à Paris).....	15
Figure.1.10 : Bouclier à pression de terre (Tunnel de Caluire).....	16

Chapitre 2

Figure 2.1 : Fondations superficielles (a : isolée, b : filante et c : radier).....	20
Figure 2.2 : Actions amenées par la structure au niveau du sol de fondation.....	21
Figure 2.3 : Les fondations en Pieux.....	22
Figure 2.4 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique De.....	23
Figure 2.5 : Pieux métalliques battus injectés.....	26
Figure 2.6 : Pieu vissé moulé.....	26
Figure 2.7 : Pieux forés simples.....	26
Figure 2.8 : Les pieux forés tubés.....	26
Figure 2.9 : Tarière creuse.....	26
Figure 2.10 : Micro-pieu.....	26

Figure 2.11: Force portante d'un pieu.....	28
Figure 2.12 : Zone d'influence pour tassement.....	31
Figure 2.13 Interaction sol- pieux- tunnel.....	33
Chapitre 3	
Figure 3.1 : Définition du problème de calcul (Chen et al, 1999).....	36
Figure 3.2 : Modèle élément fini retenu pour l'exemple de calcul.....	37
Figure 3.3 : Déplacements verticaux du sol à $x_p=4,5m$	38
Figure 3.4 : Déplacements horizontaux du sol à $x_p=4,5m$	39
Figure 3.5 : Déplacements vertical du pieu.....	40
Figure 3.6 : Déplacements latéral du pieu.....	40
Figure 3.7 : Moment fléchissant du pieu.....	41
Figure 3.8 : Effort axial du pieu.....	42
Figure 3.9 : Déplacements verticaux	43
Figure 3.10 : Déplacements verticaux.....	44
Figure 3.11 : Déplacements verticaux.....	45
Figure 3.12 : Zone d'influence du tunnel	45
Chapitre 1	
Tableau 1.1 : Historique du bouclier.....	9
Chapitre 2	
Tableau 2.1 : Classification des pieux selon différentes paramètre.....	23
Tableau 2.2 : Différentes méthodes d'exécution des fondations profondes.....	26
Chapitre 3	
Tableau 3.1 : Caractéristiques du sol pour le modèle de référence (Chen et al., 1999).....	36

Table des matières

Dédicace	I
Remerciements.....	II
Résumé.....	III
Abstract.....	IV
ملخص.....	V
Liste des figures et tableaux.....	VI
Table des matières.....	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
Chapitre 01 : Conception des tunnels	
1.1 INTRODUCTION.....	3
1.2 HISTORIQUE.....	3
1.3 LES DIFFERENTES METHODES D’EXECUTION DES TUNNELS.....	4
1.3.1 Méthode traditionnelle.....	5
1.3.2 Technique de creusement mécanisé.....	6
1.4 PRINCIPALES MACHINES D’EXCAVATION– TUNNELIER ET BOUCLIER.....	7
1.4.1 Étude historique.....	8
1.4.2 Description générale.....	9
1.4.3 Les différents types de bouclier.....	12
1.4.3.1 Bouclier mécanisés à front ouvert	12
1.4.3.2 Bouclier mécanisés à front confiné (bouclier fermé)	12
1.5 DOMAINE D’APPLICATION DES TUNNELIERS	16
1.6 PRÉCAUTION D’EMPLOI.....	17
1.7 CONCLUSION.....	17
Chapitre 02 : Etude bibliographique sur les fondations	
2.2 INTRODUCTION.....	19
2.2 DEFINITION DES FONDATIONS.....	19
2.2.1 FONDATION SUPERFICIELLES.....	19
2.2.2 FONCTIONNEMENT DES FONDATIONS SUPERFICILLES	21
2.2.3 FONDATION PROFONDES	21
2.2.3.1 Définition d’un pieu isolé.....	22
2.2.3.2 Classification des pieux.....	23
2.2.3.3 Les déférents types des pieux.....	24
2.2.3.4 Classification suivant le mode de transmission des charges au sol	27
2.2.3.5 Choix de type du pieu	27
2.3 DIMENSIONNEMENT D’UNE FONDATION SUR PIEU.....	27
2.3.1 Le choix de diamètre du pieu	27
2.3.2 Le choix de longueur du pieu	27
2.4 LA CAPACITE PORTANTE DES FONDATIONS PROFONDES	28
2.5 COMPORTEMENT DE GROUPE DE PIEUX.....	29
2.6 EFFET DE GROUPE PIEUX.....	29
2.7 TASSEMENT D’UN PIEU ISOLE.....	30

2.8 TASSEMENT D'UN GROUPE PIEUX.....	31
2.9 INTERACTION SOL-PIEUX-TUNNEL.....	31
2.10 CONCLUSION	32
Chapitre 03 : Analyse de l'effet du creusement des tunnels sur un pieu isolé	
3.1 INTRODUCTION.....	34
3.2 BREF APERÇU SUR L'OUTIL DE CALCUL : PLAXIS V 8.2.....	34
3.3 PRESENTATION D'UN CAS D'ETUDE	35
3.3.1 Caractéristique des matériaux	36
3.3.2 Modélisation par élément finis-Maillage retenu	36
3.4 RESULTATS DES CALCULS DU CAS D'ETUDE	37
3.4.1. 1 ^{er} CAS D'étude-Absence du pieu.....	37
3.4.1.1 Déplacement verticaux.....	38
3.4.1.2 Déplacement latéraux	39
3.4.2. 2 ^{ème} CAS D'étude-En présence du pieu.....	39
3.4.2.1 Déplacement verticaux	39
3.4.2.2 Déplacement latéraux	40
3.4.2.3 Moment fléchissant du pieu	41
3.4.2.4 Effort axial du pieu	42
3.5 Influence de la position horizontale du pieu (x_p)	43
3.6 Influence de la longueur du pieu (L_p).....	43
3.7 Influence de la position du tunnel par rapport au pieu (Y_p).....	44
3.8 CONCLUSION	45
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	48
BIBLIOGRAPHIE.....	49

Introduction Générale

Introduction générale

Suivant que la population urbaine augmente, les demandes associées à l'expansion urbaine augmentent également. Il s'agit notamment de créer une infrastructure capable de répondre à la fois aux besoins et à la qualité de vie de la population tout en se concentrant attentivement sur les perspectives de croissance urbaine, les ingénieurs utilisent l'espace souterrain comme un moyen alternatif pour répondre aux besoins sociaux sans perturber de manière significative l'activité de surface.

En conséquence, les tunnels deviennent de plus en plus pratiques pour inspecter et moderniser les installations souterraines, mais peuvent également rencontrer et interagir avec d'autres structures telles que les métros, les bâtiments et les différents types de fondations qui les supportent qu'elles soient superficielles ou profondes telle que les pieux.

Ces derniers sont fortement influencés par cette interaction et des conséquences intolérables peuvent apparaître en raison de la modification du champ de contraintes du terrain encaissant ; des conséquences qui peuvent apparaître sous forme de déformations et d'efforts. D'où la nécessité d'effectuer des études afin de prédire ce genre de déformations et d'estimer l'ampleur de ces efforts.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de ce mémoire dont l'objectif est d'évaluer les mouvements induits par le creusement d'un tunnel et leurs effets sur des fondations profondes plus précisément les pieux.

Pour atteindre l'objectif visé, le travail commence par une étude bibliographique divisée en deux chapitres suivie d'une étude d'un modèle de référence exposée dans le dernier chapitre ; plus précisément, dans le premier chapitre, nous avons exposé des généralités sur les tunnels, leur historique ainsi que sur les différentes méthodes de leurs constructions.

Dans le deuxième chapitre, il s'agit de présenter des généralités sur les fondations et plus spécialement celles profondes, leurs dimensionnement sera exposé en parallèle ainsi que les tassements qu'ils engendrent. A la fin, une brève synthèse sur l'interaction tunnel pieux est présentée.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'interaction entre un tunnel et un pieu isolé ; le modèle est celui de Chen et al., (1999). L'étude est effectuée à l'aide du code de calcul Plaxis 2D qui est basé sur la méthode des éléments finis en déformation plane. Une série d'analyses s'est portée sur l'évaluation des déplacements vertical et latéral du sol ainsi que du pieu isolé, les moments fléchissant et les efforts axiaux seront déduits en parallèle. En premier, l'étude se fera sans la présence du pieu et en deuxième on présentera les résultats en la présence du pieu ce qui permet de prédire les déplacements et les efforts appliqués à ce dernier. Une étude paramétrique a accompagné ces résultats et ceci en modifiant trois paramètres : la position horizontale séparant l'axe du pieu de l'axe médian du tunnel (notée x_p), la longueur du pieu (notée L_p) et finalement la position de l'axe horizontal du tunnel par rapport à la pointe du pieu (notée Y_p).

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale et des perspectives de recherche dans cette thématique.

CHAPITRE 1

Conception des tunnels

1.1 INTRODUCTION

Pour écrire valablement une histoire des tunnels, il faudrait d'abord que l'objet en fut bien défini ; le terme « tunnel » est d'abord attesté sous la forme « tonnelle » en 1794 pour traduire l'anglais tunnel, puis sous la forme « tunnel » en 1825 ou 1827. Le mot anglais dérive lui-même du français « tonnelle » évoquant la forme du tonneau. Ce mot apparaît après la construction du tunnel « sous la Tamise » construit par Marc Isambert Brunel. Le mot anglais a été ensuite repris par Marc Seguin au moment de la construction de la ligne de chemin de fer Saint-Étienne – Lyon, de préférence au terme officiel de « souterrain » qui a été conservé par Voies navigables de France (VNF) pour les canaux. Le mot est d'abord féminin, d'après le genre de « tonnelle », avant de devenir masculin.

Dans ce chapitre, il serait question de présenter des généralités sur les tunnels, leur historique ainsi que sur les différentes méthodes de leurs constructions.

1.2 HISTORIQUE

Les ouvrages souterrains ne sont pas une découverte moderne, car l'histoire de leurs constructions remonte au temps où l'homme cherchait abri dans les cavernes naturelles ou dans les refuges et les couloirs souterrains qu'il creusait.

La plus ancienne mention d'un tunnel est celle de Diodore de Sicile décrivant le tunnel de Babylone qui aurait été construit par la reine Sémiramis, il y a près de 4000 ans.

Depuis les années 1970, la construction des tunnels s'est développée à la fois dans le domaine des aménagements hydrauliques et surtout dans le secteur des communications rapides.

Le plus long tunnel routier du monde est le tunnel du Saint-Gothard en Suisse(1996), avec 57.1km, et le plus long tunnel ferroviaire du monde est le tunnel de Seikan au Japon(1988), avec 53,85km. Le tunnel sous la Manche, mis en service en 1994, à une longueur de près de 50,45km, mais son parcours sous-marin est le

plus long du monde (28km). En Algérie le tunnel de Kherrata(1988) à une longueur de 7km.

1.3 LES DIFFERENTES METHODES D'EXECUTION DES TUNNELS

Le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées à la géométrie de l'ouvrage à réaliser, les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrogéologiques (présence ou non de la nappe phréatique). Les méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées. (Figure 1.1)

La bonne connaissance des différentes techniques du creusement constitue une base importante pour pouvoir comprendre la réponse du terrain lors de son creusement. On distingue deux grandes tendances :

- 1 Le creusement conventionnel (ou traditionnel);
- 2 Le creusement au tunnelier.

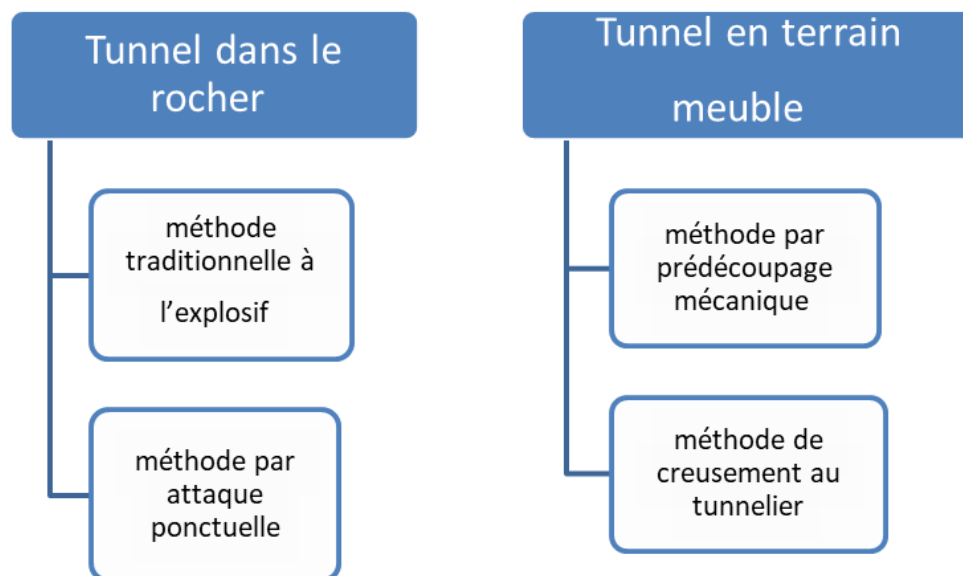


Figure1.1 Méthodes d'exécution

1.3.1 Méthode traditionnelle

La technique de l'excavation à l'explosif est très ancienne mais reste encore, dans de nombreuses situations, la plus économique.

Cette méthode est adaptée à une roche saine et homogène aux caractéristiques géotechniques élevées. Le creusement s'effectue en trois phases successives :

Perforation, Abattage, Marinage

1. **La perforation:** elle se fait aux marteaux perforateurs à l'air comprimé, la longueur des trous de mines est généralement comprise entre 2 et 5 m.

2. **L'abattage :** se fait par passes ou volées dont la longueur varie suivant le type de roches (1 à 5m). Il peut être pleine section (on excave toute la section du tunnel) ou par sections divisées.

En général, on réalise au maximum deux sections dites calotte et stross avec un décalage suffisant pour attendre la stabilisation des convergences. Le plan de tir (Figure 1.2) est le plan d'implantation des forages où sont introduits les explosifs, figurent également les différents retards des détonateurs. Il faut répartir les charges explosives et leurs retards de façon optimale pour obtenir le résultat escompté.

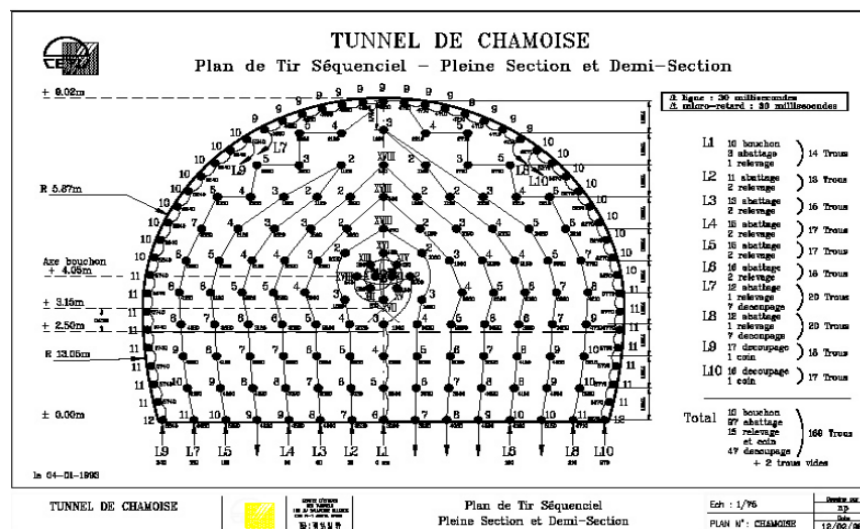


Figure 1.2 Plan de tir séquentiel optimisé pour le tunnel de Chamoise (1993). (CETU, 2012)

3. **Le marinage** (l'évacuation des déblais) s'effectue après purge du toit et du front et éventuellement ancrage ou soutènement des blocs instables.

Une technique d'abattage s'effectue pour chaque volée d'avancement de manière cyclique selon les opérations élémentaires suivantes (Voir figure 1.3).

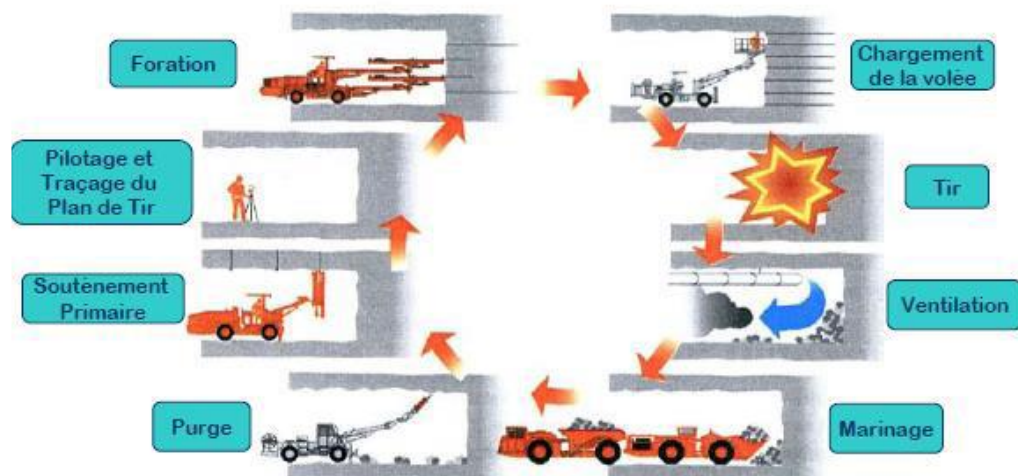


Figure 1.3 Cycle du creusement à l'explosif.(Kitcheh, 2012)

1.3.2 Technique de creusement mécanisé

Le creusement mécanisé des tunnels a connu des développements importants durant les vingt dernières années, en particulier grâce à l'apparition et aux évolutions technologiques des tunneliers (figure 1.4). Ils ont permis d'élargir le domaine de réalisation des tunnels dans des conditions géologiques délicates, pour une grande gamme de diamètres et de terrains (sols meubles, roches tendres, argiles molles, terrains instables ou aquifères, etc.) en améliorant considérablement la productivité et la sécurité des chantiers. On peut distinguer deux classes de tunneliers selon qu'il s'agit de simples machines de creusement ou de véritables machines de construction de tunnels intégrant les fonctions correspondant à la réalisation d'un ouvrage finalisé de point de vue génie civil.

L'organigramme qui suit regroupe les principales catégories de tunnelier existantes.

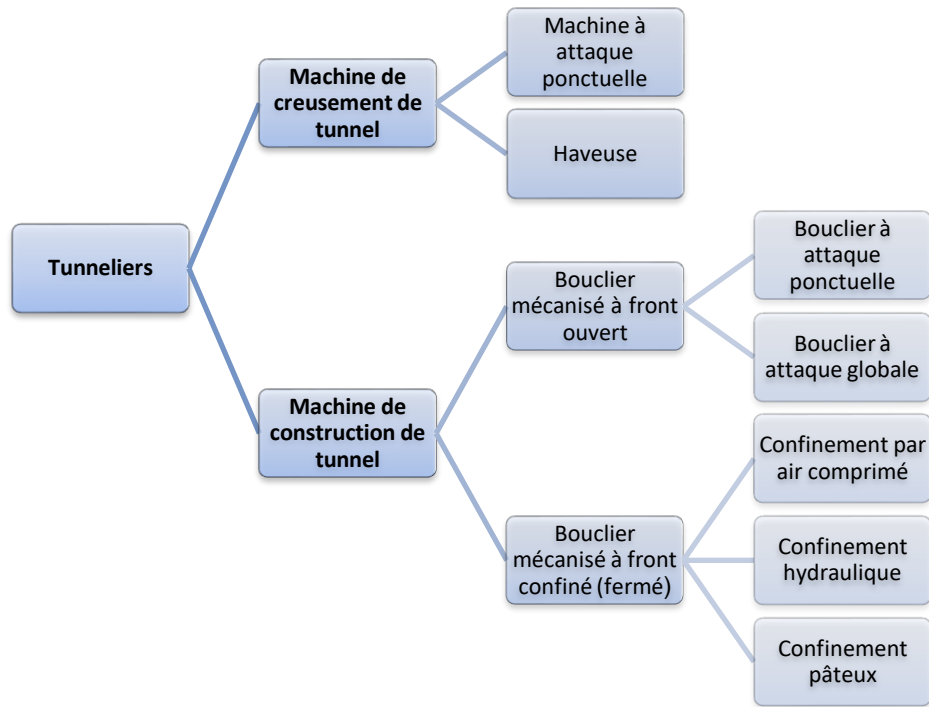


Figure 1.4 Différentes catégories des machines de creusement (El Houari, 2008)

Ce sujet de mémoire se focalise surtout sur les modélisations par la technique de pressurisation à l'aide du tunnelier, pour cette raison, nous n'avons pas développé les autres techniques de creusement afin de se concentrer sur cette technique.

1.4 PRINCIPALES MACHINES D'EXCAVATION -TUNNELIERS ET BOUCLIERS

Les tunnels sont creusés soit de façon conventionnelle, avec des moyens mécaniques simples ou à l'aide de machines spécialement conçues à cet effet que l'on appelle des tunneliers. Ces machines sont des véritables usines mobiles qui creusent et mettent en place le revêtement définitif de l'ouvrage. La période récente a vu une évolution soutenue de cette technique. Le présent article explique le principe de fonctionnement des tunneliers, les avantages apportés par cette technologie ainsi que les différents types de tunneliers qui existent sur le marché.

Actuellement, le creusement de tunnels à faible profondeur en site urbain est essentiellement réalisé par des tunneliers à front pressurisé (pression de terre, de boue ou d'air). Dans ce cas, une grande attention doit être apportée à l'évaluation des mouvements induits par le creusement, en particulier les tassements de surface qui peuvent affecter les constructions.

Les différentes opérations réalisées par le tunnelier, on parle de : excavation, soutènement du front de taille, pose du revêtement, injection du vide annulaire,... rendent très complexes la compréhension des phénomènes induits par le creusement et l'identification des paramètres de fonctionnement du tunnelier prépondérants.

Ces paramètres sont en effet liés à de nombreux éléments tels que la nature et les caractéristiques des sols rencontrés, les dimensions du tunnel, son tracé et la performance du creusement assurée par le tunnelier. Toutefois, la connaissance des paramètres influençant les mouvements du sol peut aider à mieux contrôler ceux-ci lors du creusement.

Étude historique

1.4.1 Étude historique

La technique du bouclier n'est pas récente, l'idée de cette méthode est apparue au XIX siècle, mais elle a fait l'objet d'importants développements au cours de ces dernières années. Cette progression a d'abord eu lieu en Grande Bretagne et en Allemagne et puis surtout au Japon.

Bejui (1989) et Schlosser (1989) donnent quelques dates historiques sur 'histoire de la construction des tunnels :

Marc Brunel, ingénieur français qui a dut fuir a Angleterre à cause des idées royalistes pendant la révolution française, construit à l'aide d'un bouclier manuel une galerie piétonne à Londres sous la Tamise (1825-1843). La stabilité du front de taille est assurée par un soutènement en bois, l'avancement est obtenu par des vérins à vis prenant appui sur le revêtement en briques. Cet ouvrage a été nommé «La Tonnelle» qui plus tard en français sera nommé « Tunnel » (Figure 1.5) (Dolkenzo, 2002).



Figure 1.5 Bouclier a. Lötschberg 1908 b. Saverne 19 juin 2012

Tableau 1.1. Historique du bouclier

1897 : Premier bouclier à Chesterfield par Markam

1901 : Premier bouclier mécanisé Markam

1920-1930 : Boucliers cloisonnés développés en Grande Bretagne et en Allemagne

1936 : Premier bouclier ouvert avec abattage manuel, construit au Japon

1960 : Premier bouclier à boue bentonitique en Grande Bretagne

1974 : Premier bouclier japonais à pression de terre

1984 : Première utilisation du bouclier à pression de boue en France pour le métro de Lyon.

1.4.2 Description générale

Un tunnelier est un engin polyvalent qui doit créer une cavité sans détériorer son environnement en perturbant le moins possible son état naturel d'équilibre. Il garantit un support temporaire pour l'abattage, les parois latérales et les fronts de taille lors de l'excavation.

La mise en œuvre du tunnelier a trois fonctions principales : excavation, soutènement et décapage. Ces fonctions sont conçues pour répondre à deux objectifs principaux :

- 1 L'avancement qui nécessite l'abattage du terrain au front de taille, l'évacuation des déblais et la propulsion de la machine à l'aide de vérins hydrauliques.
- 2 La stabilisation qui est obtenue par le confinement du terrain au front et la mise en place d'un soutènement provisoire ou d'un revêtement définitif sur les parois latérales de la galerie.

En terrain meuble et aqueux, le tunnelier est constitué d'un bouclier qui résiste à la pression du sol et sert de support aux éléments suivants (Figure 1.6) :

- Partie d'abattage ou outils de coupe (trousse coupante, blindage frontal).
- Partie de poussée et de pilotage (bloc moteur, vérins).
- Convoyeur évacuant les déblais.
- Systèmes de contrôle et de mesure.
- Partie de pose du revêtement (érecteurs, convoyeurs de voussoirs).

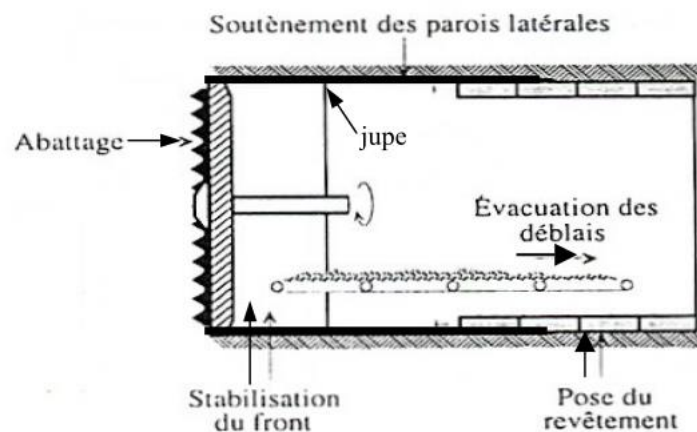


Figure 1.6 Principales fonctions du tunnelier (Boubou, 2010)

La sécurité doit être assurée lors du creusement du tunnel, tant dans le couloir qu'au sol. Par conséquent, il est nécessaire de contrôler la stabilité du front de taille et des parois latérales, et éventuellement de maintenir le site à l'abri de l'eau. En théorie, les tunneliers doivent faire face à ces problèmes en perturbant le moins possible le terrain environnant.

Le tunnelier creuse un tunnel circulaire :

Ainsi, dans la roche, les travaux d'excavation peuvent se faire au moyen d'une attaque monolithique à l'aide d'une foreuse pleine face, qui prend appui directement sur le sol, généralement au moyen de pinces ou de plots d'ancrage latéraux. Sur les terrains nécessitant beaucoup de soutien, la forme ronde est la meilleure pour absorber la force.

Le tunnelier comprend un bouclier, le front de taille peut être pressurisé avec de grands diamètres, et l'excavation se fait par une attaque globale à l'aide d'une molette de coupe à l'avant de la machine et d'un procédé de décapage adapté au mode fermé. La machine avance contre le revêtement en place au fur et à mesure qu'il avance dans le cylindre.

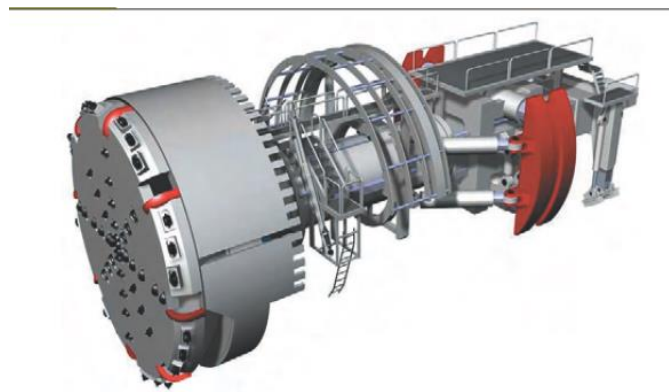


Figure 1.7 Tunnelier pour la construction du tunnel de base St. Gothard

Il y a donc intérêt à perturber au minimum le champ de contraintes initial dans le sol et à éviter les contraintes latérales et verticales. La construction d'un tunnel nécessite une connaissance fine du milieu à traverser d'un point de vue géologique, géotechnique et hydrogéologique.

A cet effet, le système de tunnelier complète l'espace annuel laissé entre le terrain excavé et le revêtement en appliquant une pression sur le front de taille et en injectant le coulis de remplissage à l'arrière de la jupe. Le front de taille est supporté

de différentes manières, dans des blocs à faible résistance, la propulsion du tunnelier est assurée par des vérins longitudinaux, qui s'appuient sur des supports installés, généralement constitués de profilés préfabriqués en béton.

1.4.3 Les différents types de boucliers

L'utilisation de boucliers est devenue très courante sur les chantiers, mais cela dépend de plusieurs critères comme la nature du terrain, la proximité de la surface, le mode de soutènement utilisé.

Sur la base de ces critères, les boucliers sont principalement divisés en deux catégories :

1. Les boucliers ouverts, à front pressurisé ou non
2. Les boucliers fermés, à front pressurisé ou non.

1.4.3.1 Bouclier mécanisés à front ouvert

L'objectif principal de ce type de bouclier est de stabiliser les murs de la galerie avant la mise en place des supports. L'excavation au sommet du bouclier peut être partiellement ou totalement mécanisée. L'avancement est généralement assuré par des vérins hydrauliques, qui sont situés sur des supports montés.

Front à l'emplacement sélectionné. De plus, ils peuvent abattre des parties visibles en permanence de n'importe quelle forme et avoir un accès libre à l'avant.

1.4.3.2 Bouclier mécanisés à front confiné (bouclier fermé)

Ce type d'excavation est utilisé dans des formations à faible résistance, et le front de taille ne peut garantir l'équilibre de la pression hydrostatique ou de la pression des terres sans soutènement. Dans ce mode, une excavation du sol en pleine section est effectuée à l'aide d'une technologie mécanisée, et l'appui latéral et frontal est également assuré pendant l'excavation du sol. Ces étapes peuvent être réalisées par différents types de tunneliers.

En effet, dans le cas du creusement au tunnelier, le front de taille adopte généralement une méthode pressurisée (méthode fermée), mais il peut aussi être

creusé en méthode ouverte (sans appliquer de pression de confinement) selon les caractéristiques de la strate et les conditions hydrologiques. Conditions front de taille pendant l'excavation). Dans cette partie bibliographique, nous nous intéressons au creusement par tunneliers à front de taille sous pression, méthode la plus courante, notamment sur les sites urbains.

Le tunnelier est une machine conçue pour l'excavation des tunnels dans les sols à résistance moyenne jusqu'à forte (300 MPa). Plus elle réunit tout ce qu'il faut pour construire automatiquement un tunnel dans des conditions optimales.

Ce type de bouclier est particulièrement adapté aux sols meubles et aux aquifères couramment rencontrés dans les formations alluviales et sédimentaires des vallées. En raison de délais importants et de coûts de production élevés, il remplace progressivement les méthodes de traitement sur site par congélation ou injection, qui s'avéraient nécessaires dans les formations très difficiles.

La différence par rapport à un bouclier avant non pressurisé est la présence d'une cloison étanche à l'avant dont la pression de confinement est constamment et en permanence mobilisée (Atahan, 2010).

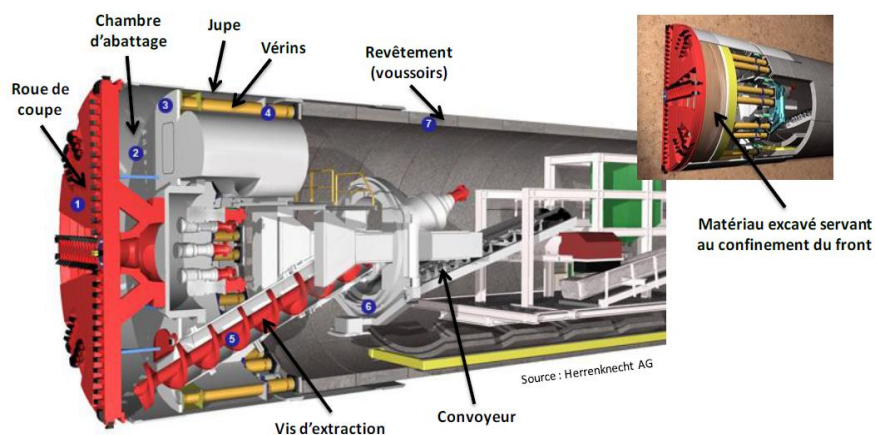


Figure 1.8 Tunnelier à front pressurisé, [Herrenknecht AG]. Cité par (Berthoz, 2012)

- **Bouclier à air comprimé**

Ce type de bouclier fonctionne suivant les mêmes principes que les boucliers à front ouvert, mais permet le creusement de tunnels en présence de terrains meubles contenant de l'eau. Cette technique est cependant limitée aux terrains homogènes, de faible perméabilité.

De plus, une couverture minimale d'au moins un diamètre est nécessaire, afin de réduire les fuites d'air. La présence d'un sas de décompression est indispensable pour le personnel, ce qui augmente les coûts d'exécution et pose des problèmes de sécurité.

- **Bouclier à pression de boue**

Dans ce cas, la circulation d'une boue bentonitique sous pression permet d'assurer les fonctions de marinage et de soutènement du front de taille (figure 1.9). Cette boue constitue une membrane appelée "cake" sur le front, ce qui garantit une étanchéité et permet le report des pressions dans le terrain. Le revêtement composé de voussoirs, formant un anneau circulaire, est assemblé à l'arrière et à l'abri de la jupe.

L'avancement du tunnelier s'effectue suivant un cycle, qui se compose de deux phases : l'abattage du terrain et la pose du revêtement. Pendant la phase d'avancement un coulis est injecté dans le vide annulaire. Le domaine d'utilisation de ce type de machine est relativement large et comprend notamment les sables et graviers sous la nappe. Les terrains les plus favorables sont ceux qui contiennent 20% à 30% d'argile ou de limon. Dans les terrains argileux, on se heurte souvent au problème de collage du terrain aux outils et de colmatage du circuit de marinage.



Figure 1.9 Bouclier à pression de boue (Chantier METEOR à Paris)
(Dossier Pilote, 1998)

- **Bouclier à pression de terre**

Ce type de bouclier est basé sur le principe du confinement du terrain dans la chambre d'abattage (figure 1.10). L'excavation s'effectue à l'aide d'une roue de découpage. Les déblais d'excavation s'accumulent dans la chambre d'abattage située entre la tête et une paroi étanche séparant le front de la galerie revêtue. Le marinage est assuré par une vis d'extraction, associée à un système de tapis et de chariots. La vitesse d'extraction des déblais de la chambre au moyen de la vis constitue le principal moyen de contrôle dans la pression de la chambre d'abattage, l'objectif étant d'équilibrer les contraintes existant dans le terrain dans son état naturel.

Cette méthode nécessite un sol suffisamment fluide et homogène, pour pouvoir assurer un soutènement permanent sur toute la surface du front de taille. Les limons sableux constituent a priori les terrains idéaux pour ce type de machine. Dans le cas des argiles, un apport d'eau peut être nécessaire pour augmenter la fluidité du matériau dans la chambre d'abattage.

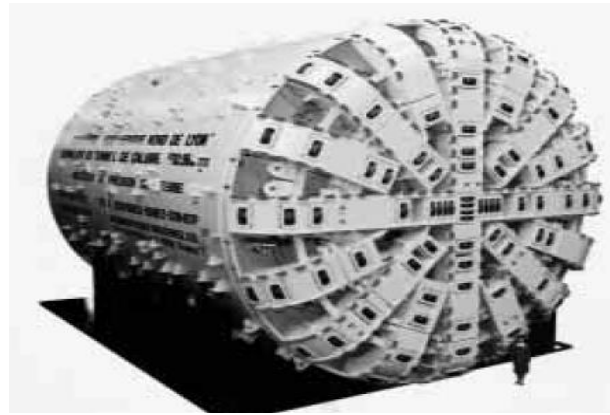


Figure 1.10 Bouclier à pression de terre (Tunnel de Caluire)

1.5 DOMAINE D'APPLICATION DES TUNNELIERS

De par leur conception et leur principe de fonctionnement, les boucliers à confinement sont parfaitement adaptés aux terrains difficiles à médiocres pour lesquels les techniques traditionnelles de creusement de tunnel imposent la modification ou l'amélioration de leurs caractéristiques géologiques et géotechniques (rabattement de nappe, congélation, traitement par injection, jet grouting).

Cette méthode de creusement au bouclier à confinement reste souvent la seule méthode possible quand les contraintes d'environnement excluent une solution par tranchée couverte ou rabattement de nappe.

Le confinement permet par ailleurs de limiter les décompressions de front de taille et par voie de conséquence les tassements en surface induits par le creusement.

À ce titre, le bouclier à pression de confinement est parfaitement bien adapté aux sites urbanisés et sous faible couverture moyennant un remplissage immédiat du vide annulaire et un blocage efficace du revêtement mis en œuvre à l'abri de la jupe du bouclier, car ce vide remontant progressivement en surface est à l'origine de la majorité des tassements constatés en surface.

1.6 PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Elles résultent de la bonne adaptation du bouclier aux conditions du projet, la sensibilité des paramètres géologiques et géotechniques étant telle qu'une remise en cause de la faisabilité ne peut être envisagée en cours de travaux compte tenu des investissements élevés occasionnés par cette méthode.

Des méthodes de reconnaissance spécifiques destinées à réduire les aléas sont préconisés et graduées suivant la nature des terrains et les contraintes inhérentes au site.

L'hétérogénéité des terrains est sans conteste la contrainte la plus importante ; elle nécessite une connaissance parfaite du toit rocheux et de la présence d'obstacles naturels (karst, discontinuités) ou artificiels (pieux, ouvrages enterrés, fondations).

Le choix du type de confinement résultera de la combinaison des caractéristiques hydrauliques (perméabilité et charge hydraulique) ainsi que physiques (granulométrie et porosité). Pour la détermination des paramètres spécifiques au bouclier, ce sont les caractéristiques physiques et mécaniques des terrains qui sont essentielles.

L'attention est également attirée sur les tassements, même réduits, induits par cette méthode et le risque de création de fontis à l'avancement qui nécessite une maîtrise parfaite du confinement (Cetu, 2012).

1.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté des aspects généraux sur les constructions souterraines, et ceci en exposant un ensemble assez répondu de procédés de la conception ainsi que les différents modes de creusement et ceci afin d'avoir une idée sur ces différentes techniques.

Bien que l'usage des tunneliers pour construire des ouvrages souterrains soit maintenant largement répandu, on constate que les machines font toujours l'objet d'amélioration afin de les rendre plus fiables et plus performantes. Le nombre

d'entreprises qui utilisent à présent cette technologie est plus important qu'il y a une vingtaine d'années, mais cela ne doit pas laisser penser que l'utilisation de ces machines peut être envisagée sans une solide expérience. En effet, si certaines géologies sont tolérantes vis-à-vis des variations de pression de confinement, la plupart du temps, des écarts fortuits sur les valeurs de consigne peuvent entraîner des conséquences catastrophiques pour le projet mais également pour son environnement. L'expérience pour la conduite et la maintenance efficace des machines est une compétence qui prend du temps à s'acquérir.

Dans le chapitre suivant, nous allons exposer une étude bibliographique sur les fondations et plus précisément sur celles profondes puisque nos modélisations seront déployées sur cette catégorie.

CHAPITRE 2

Généralité sur les fondations

2.1 INTRODUCTION

Le chapitre précédent s'est focalisé sur des notions sur les tunnels, leur historique ainsi que sur les différentes méthodes de leurs constructions.

Dans ce chapitre, il s'agit de présenter des généralités sur les fondations et plus spécialement celles profondes, leurs dimensionnement sera exposé en parallèle ainsi que les tassements qu'ils engendrent. A la fin, une brève synthèse sur l'interaction tunnel pieux est présentée en citant les méthodes analytiques utilisées pour prédire les déplacements vertical et horizontal causés par le creusement des tunnels sans la présence du pieu.

2.2 DEFINITION DES FONDATIONS

On appelle fondations, les parties enterrées d'un ouvrage conçues pour transmettre au solde manière rationnelle, les charges provenant de la superstructure.

Quand les caractéristiques mécaniques du sol sont convenables au voisinage de la surface, Les fondations sont exécutées avec un encastrement minimum dans le sol. On réalise dans ce cas, des fondations superficielles dont l'encastrement (l'ancrage) « D » est inférieur à 4 ou 5 fois la largeur de la semelle « B ».

Si on désigne par D la profondeur d'encastrement de la fondation dans le sol, par B sa largeur et par L sa longueur, on distingue 3 types de fondations :

- Fondation superficielle : $D/B \leq 4$ à 5
- Fondation semi-profonde : $4 \leq D/B \leq 10$
- Fondation profonde : $D/B \geq 10$

Le choix du type de fondation va dépendre des caractéristiques du sol et de la descente des charges amenées par la superstructure (Bakour, 2008).

2.2.1 Fondations superficielles

Le principe d'une fondation superficielle peut être retenu si les sols sont assez homogènes et s'ils comportent des couches porteuses assez proches de la surface.

On distingue 3 types de semelles pour les fondations superficielles:(figure2.1)

- **Les semelles isolées** : des sections carrées, ou circulaires et supportant des charges ponctuelles.
- **Les semelles filantes (ou continues)** : sont des fondations de très grande longueur par rapport à leur Largeur et supportant un mur ou une paroi.
- **Les radiers (ou dallage)** est une dalle plane, constituant l'ensemble des fondations d'un bâtiment, elle est adapter lorsque la portance du sol est faible et que sa compression est homogène.

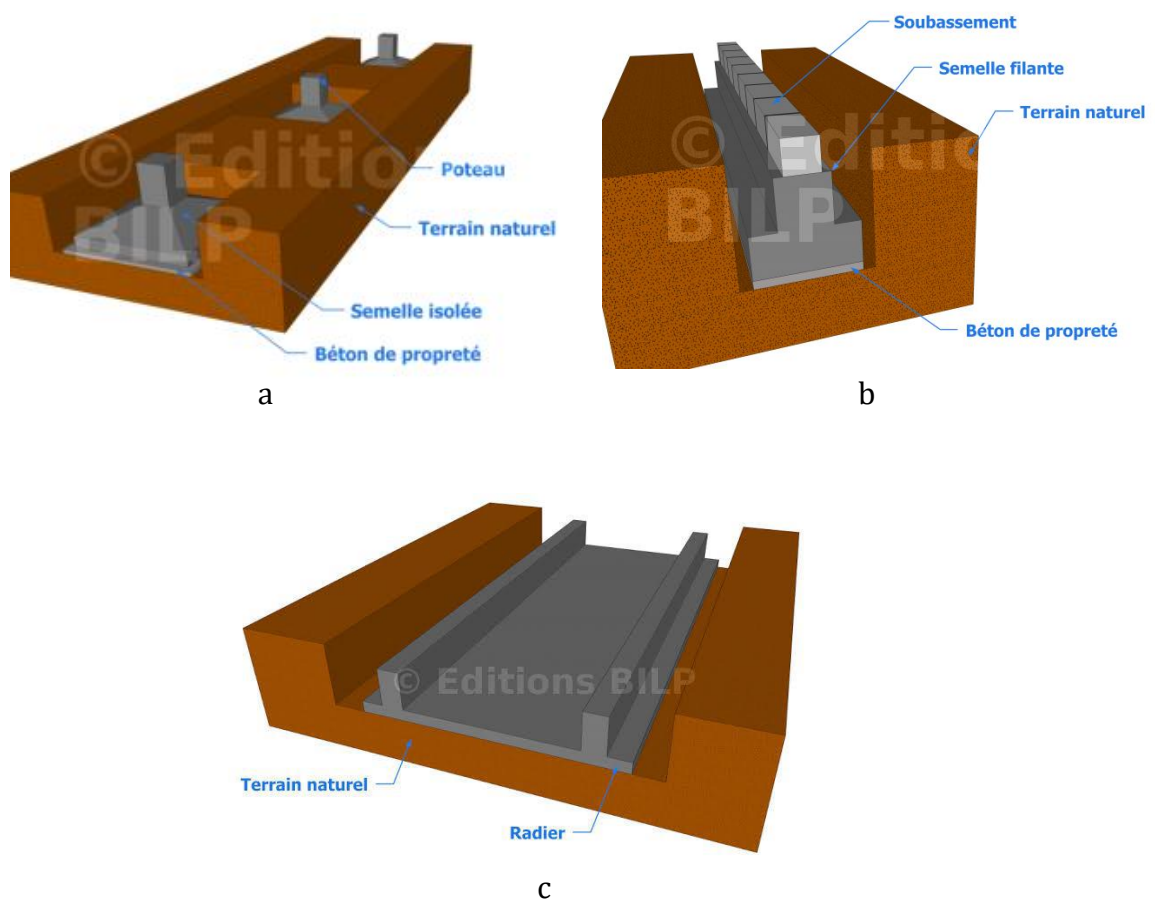


Figure 2.1. Fondations superficielles (a : isolée, b : filante et c : radier)

2.2.2 Fonctionnement des fondations superficielles

La fonction d'une fondation est de transmettre au sol les charges qui résultent des actions appliquées sur la structure qu'elle supporte. Cela suppose donc que le concepteur connaisse :

- **La capacité portante de la semelle de fondation:** Le sol ne doit pas tasser de façon inconsidérée sous la semelle.
- **Les actions amenées par la structure au niveau du sol de fondation:** La semelle doit résister aux actions auxquelles elle est soumise.
- **La pression exercée à la surface du sol:** entraîne des pressions dans les couches de sol situées au-dessous jusqu'à une certaine profondeur qui varie suivant le type de fondations et la charge appliquée. Cette pression s'appelle contrainte et est notée σ . (figure.2.2)

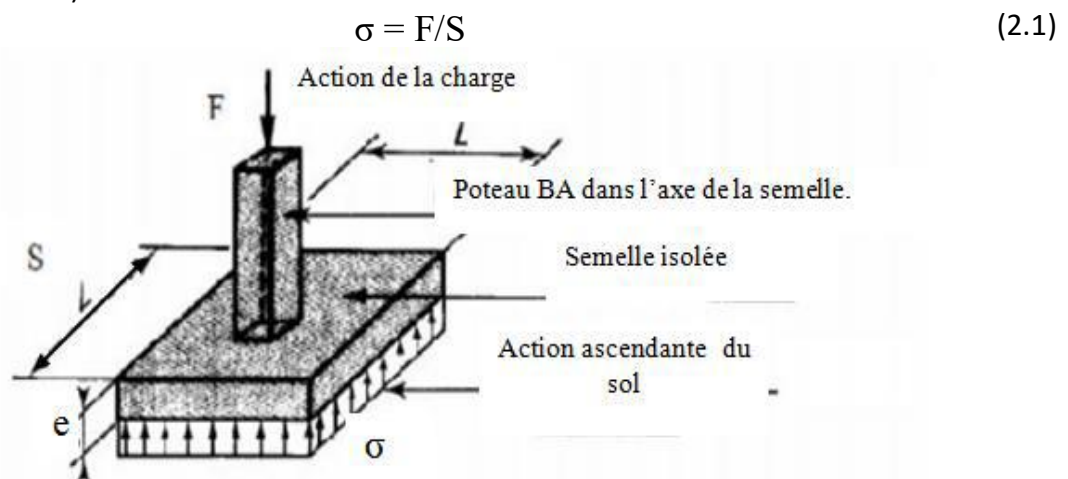


Figure 2.2. Actions amenées par la structure au niveau du sol de fondation

2.2.3 Fondations profondes

Lorsque le terrain superficiel sur lequel repose une fondation n'est plus capable de résister aux sollicitations qui lui sont transmises, on a recours à une fondation profonde (pieu) qui permet d'atteindre le substratum.

Ce cas se présente souvent lorsque les couches superficielles sont peu résistantes, molles et compressibles, par exemple le cas des Argiles, vases, des tourbes, et dans le cas où il serait impossible d'améliorer la portance de ces couches.

Si la fondation était exécutée directement sur ces couches compressibles, des tassements incompatibles à la stabilité de l'ouvrage se produiraient (Roger, 2003).

Il s'agit d'éléments d'élanement généralement supérieur à 5 ou 6 (rapport de la longueur utile à la largeur de l'élément.)

Une fondation profonde est caractérisée par la manière dont le sol est sollicité pour résister aux charges appliquées :

- Résistance en pointe
- Par frottement latéral
- Résistance de pointe et frottement latéral (cas courant)

Les fondations profondes sont souvent désignées par le terme de « pieu »

2.2.3.1 Définition d'un pieu isolé

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. (Figure 2.3)

Le mot pieu désigne aussi bien les pieux, et les puits.



Figure 2.3 Fondations en Pieux

D'un point de vue mécanique, on distingue la longueur D du pieu de la hauteur d'encastrement mécanique D_e . Cette valeur de D_e tient compte du fait que les caractéristiques mécaniques de la couche d'ancrage sont nettement supérieures à celles des sols de couverture par le pieu. (Voir figure 2.4)

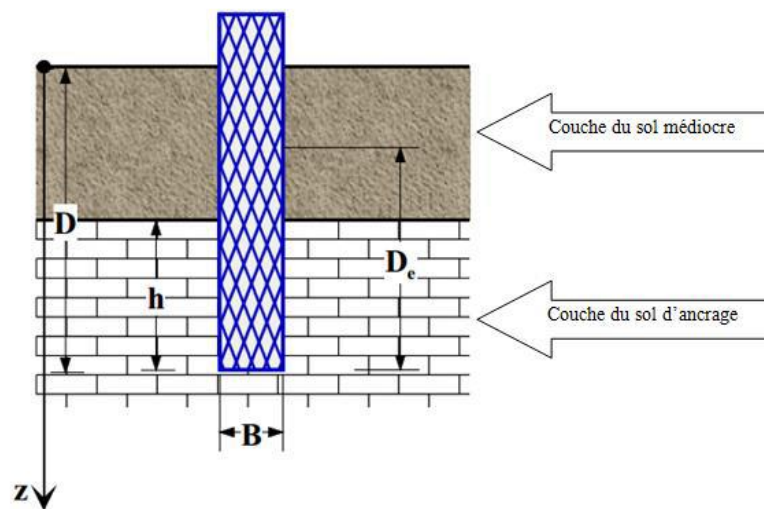


Figure 2.4 : Définitions de la hauteur d'encastrement géométrique D et mécanique D_e .

Les fondations profondes mobilisent le sol :

- Par l'effort de pointe proportionnellement à leur section lorsqu'elles reposent directement sur 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 descente sur une couche suffisamment résistante. (Plumelle, 2004)

2.2.3.2 Classification des pieux

Les pieux peuvent être classés de différentes façons selon les paramètres d'intérêt. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau suivant (Tableau 2.1). (MCIF, 2006)

Tableau 2.1 : Classification des pieux selon différentes paramètres

Classification selon :	Type du pieu
Mode d'installation	Battu, foré, tubé, vissé, moulé
La nature du matériau constitutif	Béton, bois, métal
Géométrie de forme	Vertical (section variable ou uniforme base élargie), incliné
Rigidité	Long (flexibles), court (rigide)
Type de structure	Tour, machinerie, bâtiment
Déplacement de sol	Subissant un grand déplacement, Un faible déplacement, Subissant pas de déplacement
Mode de fonctionnement	Friction, pointe

2.2.3.3 Les différents types des pieux

Il existe des différents types des pieux en fonction des matériaux qui les composent ou la manière dont ils sont installés dans le sol. Cette classification est donc non exhaustive de la technologie des pieux. (HASSINI.2016)(Tableau 2.2)

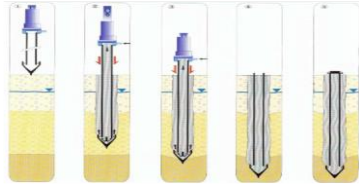
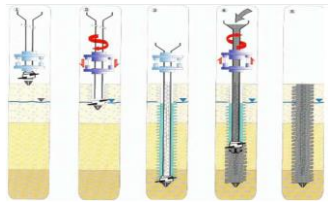
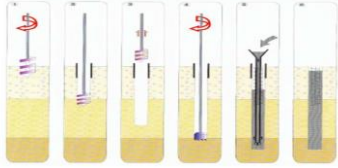
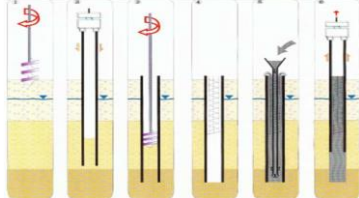
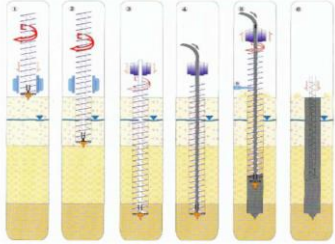
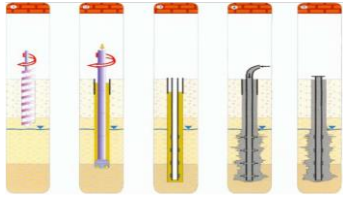
- a- **Pieux battus**: des pieux préfabriqués, en béton armé ou précontraint, ou des pieux métalliques à base obturée sont enfoncés dans le sol par battage en tête, par l'intermédiaire d'un casque. Appartiennent aussi à cette catégorie les pieux battus par pilonnage, par moulage, ou par enrobage (Figure 2.5).
- b- **Pieux foncés** : ce sont des pieux en béton préfabriqués, ou des pieux métalliques qui sont installés dans le sol par fonçage, avec un vérin s'appuyant sur un massif de réaction
- c- **Pieux vissés moulés** : ils sont installés dans les sols cohérents par vissage préalable d'un outil en forme de double vis (Figure 2.6)

Les pieux appartenant à la catégorie d'installation sans refoulement du sol sont divers, mais sont essentiellement :

- d- **Pieux forés simple** : ils sont installés dans les forages réalisés au préalable dans les sols cohérents, sans maintien des parois du forage, avec une tarière ou une benne (Figure 2.7)

- e- **Pieux forés à la boue** : le procédé consiste à réaliser forage avec maintien des parois avec la boue.
- f- **Pieux forés tubés** : le procédé consiste à foncer préalablement un tubage, au sein du quel on réalise un forage, on coule le béton et on récupère graduellement le tubage (Figure 2.8)
- g- **Pieux réalisés à la tarière creuse** : un exemple de ce procédé est celui appelé star sol mis au point par l'entreprise sol étanché (Figure 2.9)
- h- **Micro-pieux** : ce sont des pieux forés de diamètre inférieur à 250mm, largement utilisés dans le renforcement du sol et la reprises-en sous-œuvre (Figure 2.10)
- i- **Puits** : il s'agit d'une fondation massive creusée à la main, les parois étant soutenues par blindage. De par son élancement intermédiaire (D/B entre 4 et 10), ce type de fondation fait plutôt partie de fondations semi-profondes.

Tableau 2.2 Différentes méthodes d'exécution des fondations profondes

Les types des pieux	Méthode d'exécution
 <p>Figure 2.5. Pieux métalliques battus injectés</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en fiche, réglage ; 2. Battage du tube par mouton hydraulique ; 3. Refoulement des sols, maintenus et expansés De mortier 4. Pieu terminé ; 5. Recépage et soudage d'une plaque.
 <p>Figure 2.6. Pieu vissé moulé</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en fiche, réglage et pose d'une pointe perdue 2. L'outil est foncé par combinaison du vissage et du vérinage dans le sol refoulé ; 3. Mise en place d'armature ; 4. En devisant le vérinage augmente par refoulement du sol l'épaisseur de l'empreinte laissée par l'outil, la charge de béton garantissant un parfait moulage de celle-ci ; 5. Pieu exécuté.
 <p>Figure 2.7. Pieux forés simples</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en fiche, réglage, préforage ; 2. Mise en place de virole ; 3. Forage à la tarière ; 4. Ancrage au carottier ; 5. Mise en place d'armatures partielles ou Totales et bétonnage à la colonne ; 6. Contrôle de l'arase béton.
 <p>Figure 2.8. Les pieux forés tubés</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise fiche, réglage, préforage ; 2. Vibro-forage du tubage de travail ; 3. Forage et extraction des terres ; 4. Mise en place d'armatures partielles ou totales ; 5. Bétonnage au tube plongeur ; 6. Extraction du tubage de travail.
 <p>Figure 2.9. Tarière creuse</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en fiche des réglages des guides de forage ; 2. Forage ; 3. Ancrage par rotation et avec poussée sur l'outil ; 4. Injection de béton dans l'axe creux de la tarière ; 5. Descente du tube plongeur, remontée de la tarière en rotation lente bétonnage en continu ; 6. Mise en place d'armateur.
 <p>Figure 2.10. Micro-pieu</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mise en fiche, réglage et forage ; 2. Forage sous tubage, boue, coulis ou mortier ; 3. Mise en place d'une armature pouvant être équipée de manchettes pour l'injection sous pression 4. Scellement au coulis, ou au mortier de L'armature.

2.2.3.4 Classification suivant le mode de transmission des charges au sol

Les pieux agissant sur le sol soit :

- Par effet de pointe : φ_p (pieu colonnes)
- Par frottement latéral + effet de pointe
- Par frottement latéral : φ_f (pieux flottants)

2.2.3.5 Choix de type de pieu

Le choix de type de pieux est souvent en fonction des données géotechniques, des méthodes d'exécutions envisagées pour la réalisation de la fondation, du montant, des habitudes locales et du comportement de la structure à fonder. Il est recommandé de choisir le même type de pieux pour l'ensemble de la fondation.

2.3 DIMENSIONNEMENT D'UNE FONDATION SUR PIEUX

Dimensionnement d'une fondation sur pieux ne peut se faire que par tâtonnement, on part d'un avant-projet établi de façon plus ou moins empirique : c'est le pré dimensionnement. On le soumit ensuite aux vérifications nécessaire. Si une ou plusieurs conditions ne sont pas satisfaites, on reprend le projet jusqu' l'obtention d'une fondation capable de résister correctement aux charges transmises par l'ouvrage et résultant d'une descente de charge (ou donnée par le logiciel).

2.3.1 Le choix de diamètre de pieu

Le diamètre de pieu est subordonné à la portance, l'importance des efforts horizontaux à reprendre et à l'entraxe de deux pieux voisins doit d'un minimum de 3 fois le diamètre de pieu. Ce diamètre peut être aussi conditionné par sa longueur (problème de flambement).

En général les pieux forés un diamètre ($B > 0.8\text{m}$) sont réservés aux grands ouvrages et les petits pieux forés ayant ($B < 0.60\text{m}$) sont adaptés aux ouvrages à réactions modestes.

2.3.2 Le choix de la longueur du pieu

La longueur de pieu dépend de :

- L'épaisseur des couches du sol à traverser pour mobiliser un frottement latéral dans le cas des pieux flottants
- La profondeur de substratum résistant et de l'écartement prévu dans le substratum en cas des pieux travaillant à la pointe

2.4 LA CAPACITE PORTANTE DES FONDATIONS PROFONDES

La force portante d'un pieu est définie comme la charge maximale Q_l qu'il peut supporter, Au-delà de cette charge se produit la rupture du sol. La capacité portante maximale q_l sera la charge par unité de surface, encore appelée contrainte limite.

Pour le cas des fondations profondes, on sépare la résistance verticale limite Q_l supportée par le pieu en deux composantes: la résistance de pointe Q_p et la résistance au frottement Q_f . (Voir **Figure 2.11**)

$$Q_l = Q_p + Q_f \quad (2.2)$$

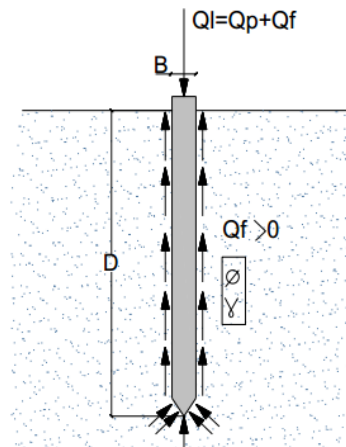


Figure 2.11. Force portante d'un pieu

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination de la force portante d'un pieu :

- L'utilisation des formules basées sur les résultats du battage des pieux ;
- L'utilisation des formules statiques de force portante établies à l'aide de la mécanique théorique des sols ;
- L'interprétation des diagrammes de pénétrations obtenues soit avec le phénomène statique, soit avec le pénétromètre dynamique.

- L'interprétation des essais de mise en charge d'un ou de plusieurs pieux.

2.5 COMPORTEMENT DE GROUPES DE PIEUX

Le comportement de groupes des pieux revêt différents aspects qui sont abordés dans ce paragraphe

Le pieu qui fait partie d'un groupe a un comportement différent de celui du pieu isolé, les modifications dont il y a lieu de tenir compte concernent :

1. La force portante, sous sollicitation axiales.
2. Les tassements
3. Les réactions latérales et les poussées latérales du sol.
4. Le frottement négatif.

Deux causes différentes sont à l'origine de ces effets de groupe :

- a. La mise en place d'un ensemble de pieux crée un remaniement du sol qui est différent de celui qui est produit par la mise en place d'un pieu isolé dont le comportement sert de référence, la réaction du sol sous et autour de pieu est modifiée.
- b. La charge appliquée sur un pieu a une influence en termes d'effort et de déplacement sur le comportement des pieux voisins, cette influence peut être chiffrée par des méthodes rationnelles telle que la méthode des éléments finis, toutefois, l'application courante de telle méthode se heurte à un certain nombre de difficultés (Roger Frank, 2003):

- Loi de comportement du sol souvent mal connues
- Aspect tridimensionnel du problème difficile à prendre en compte
- État initial du sol après mise en place des pieux difficile, sinon impossible à appréhender.

2.6 EFFET DE GROUPE DE PIEUX

L'effet de groupe est très bénéfique dans le cas des pieux flottants exécutés dans des sols grossiers qui peuvent se compacter lors de la mise en place. Cet effet de groupe permet de diminuer les caractéristiques mécaniques du terrain en particulier lorsque les pieux

sont très rapprochés. il est donc nécessaire, lors du battage des pieux, de respecter un écartement d'au moins trois diamètres d'axe en axe ou de calculer l'entre-axe par la formule empirique suivante.

$$e^* = \sqrt{2,5 \times \frac{Q}{100}} \quad (2.3)$$

e^* : écartement des pieux.

Q: charge nominale du pieu en tonnes.

La charge nominale peut être déterminée à partir des :

- Essais en laboratoire.
- Essais in situ.
- Essais de chargement.

Quelque soit la méthode de détermination de la charge nominale, l'influence des autres pieux (effet de groupe) sur le comportement d'un de ces pieux n'est nuisible que s'il s'agit de pieux flottants. En effet l'effet de groupe ne joue aucun rôle si les pieux travaillent uniquement en pointe. (Melbouci, 2009).

2.7 TASSEMENT D'UN PIEU ISOLE

Le tassement d'un pieu isolé sous les charges usuelles est généralement faible et ne constitue pas un paramètre de calcul déterminant pour la plupart des structures. Par contre, dans certains cas où l'on a des pieux isolés, il est nécessaire de prendre en compte le tassement.

Expérimentalement, on remarque que le tassement en tête des pieux est en général de 1cm, sous une charge de référence égale à 0.7Qp et ce pour une gamme de pieux dont la longueur de fiche est comprise entre 6 et 45m et dont le diamètre B varie entre 0.30 et 1.5m.

On définit une valeur limite du tassement notée S_{ref} sous la charge de référence :

- Pour les pieux forés: $S_{ref} = 0.006 B$ (avec des valeurs extrêmes de 0.003 et 0.010 B)
- Pour les pieux battus: $S_{ref} = 0.009 B$ (avec des valeurs extrêmes de 0.003 et 0.010 B)

2.8 TASSEMENT D'UN GROUPE DE PIEUX

Le tassement d'un groupe de pieux S_c est plus important que le tassement d'un pieu isolé, pour une même charge par pieu, compte tenu de la zone d'influence mobilisée par le groupe versus un pieu isolé. En effet, les dimensions globales d'un groupe de pieux ont une influence sur le tassement. Les pressions transmises par le groupe de pieux sont importantes et entraînent des mouvements non négligeables au niveau de la pointe des pieux. (Voir figure 2.12).

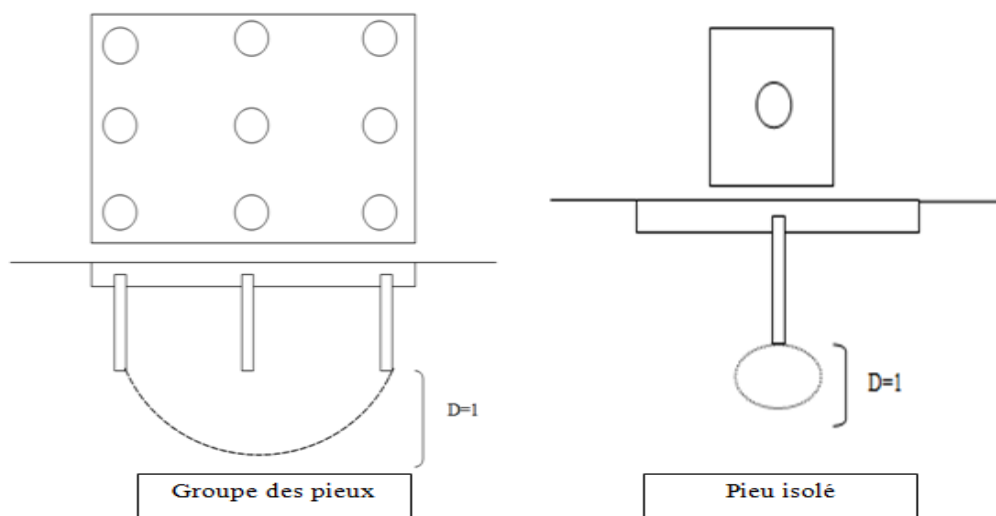


Figure 2.12 Zone d'influence pour tassement

2.9 Interaction sol- pieux- tunnel

Au cours des dernières années, et avec la rapide croissance des milieux urbains ainsi que la forte demande de transports publics, le nombre de tunnels a augmenté d'une manière spectaculaire.

Les tunnels seront construits à proximité de structures existantes telles que les bâtiments et d'autres structures (figures 2.13), beaucoup de ces bâtiments sont supportés par des fondations profondes telles que les pieux. Ces derniers sont fortement influencés par ce type de construction. Ainsi des conséquences importantes peuvent apparaître en raison de la modification du champ de contraintes du sol et, par conséquent, des déplacements se créeront favorisant ainsi les déformations et les efforts au niveau de ces pieux.

La prévision précise de ces mouvements et l'estimation des forces axiales et des déformations supplémentaires causés à ces pieux existants dues au creusement devient une partie importante du processus de l'interaction pieu-tunnel et pose un défi majeur lors de la conception et de la construction en génie civil : Une attention particulière est accordée à ce type de prédiction.

Plusieurs chercheurs ont étudié les effets du creusement de tunnels sur la capacité portante et la déflexion des pieux par les essais sur modèle de centrifugeuse et ont effectué des tests expérimentaux dans laboratoire et numérique pour étudier les effets du creusement de tunnels sur les fondations sur pieux.

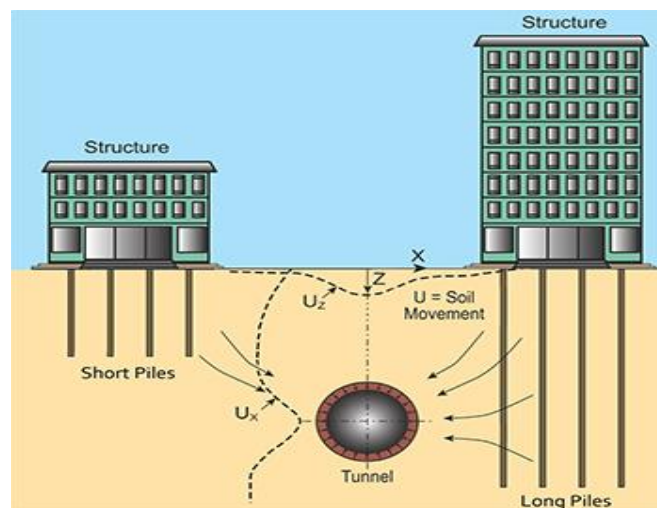


Figure 2.13 Interaction sol- pieux- tunnel

2.10 CONCLUSION

Ce chapitre représente une synthèse sur les différents types des fondations superficielles et profondes dans les quelle son s'est basés sur les pieux, leur mode d'exécution et le domaine de leur utilisation. Cette exposition de l'état de l'art nous a permis de définir différents critères qui influencent le choix des types de pieux à utiliser dans les travaux à réaliser et déterminent leur capacité portante.

Anis nous avons conclu à travers les informations récoltées que le travail d'un groupe est différent de celui d'un pieu isolé. Cela est dû à la mise en place de ce groupe de pieux qui induit le remaniement du sol, et aux types de charge appliquée à celui-ci.

Le chapitre suivant sera focalisé sur la modélisation numérique d'analyse de l'effet du creusement des tunnels sur les fondations- Cas d'un pieu isolé.

CHAPITRE 3

Analyse de l'effet du creusement des tunnels sur les fondations- Cas d'un pieu isolé

3.1 INTRODUCTION

Le creusement de tunnels dans des sols meubles entraîne certainement des déformations dans ces terrains et ceci est valable pour les deux axes vertical et horizontal et auront une incidence directe sur les structures avoisinantes.

En vue d'explorer ce type de résultats, il était question dans les chapitres précédents de présenter le comportement des sols vis-à-vis le creusement des tunnels ainsi que des informations sur les fondations en général et sur les fondations profondes plus précisément.

Le chapitre présent est un complément à ces deux chapitres; il se focalise sur l'application de ces connaissances aux analyses de l'effet du creusement d'un tunnel sur un pieu isolé.

Il s'agit de modéliser un exemple tiré de la littérature ; ce modèle a été entrepris par Chen et al., en 1999 et poursuivi par plusieurs autres auteurs et chercheurs depuis.

Pour atteindre cet objectif, le travail présenté dans ce chapitre s'est porté sur les points suivants:

- Une description brève du code de calcul PLAXIS V 8.2.
- Des analyses en 2D sur le modèle de référence de Chen et al., (1999).
- Une étude paramétrique par rapport à :
- La distance horizontale séparant l'axe vertical du tunnel de l'axe du pieu (Notée x_p).
- La longueur du pieu (Notée L_p).
- La distance verticale séparant l'axe horizontal du tunnel de la pointe du pieu (Notée Y_p).

3.2 BREF APERÇU SUR L'OUTIL DE CALCUL : PLAXIS V 8.2

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au le modèle est difficile à évaluer. Il sait que le domaine élément fini est parfois rebutant, et il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer d'un code sur l'ordinateur gérant sa bureautique et sa technique quotidienne, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. À ce titre, nous présentons les principes du code de calcul PLAXIS :

Le code éléments finis PLAXIS est conçu par des géotechniciens numériques, il présente certainement un optimum actuel sur les plans scientifiques et pratiques dans le domaine de la géotechnique.

Scientifiquement, c'est un outil d'analyse aux éléments finis des projets géotechniques: déplacements, déformations, capacité portante, etc. Doté de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Il contient les sous programmes suivants :

- Programme d'entrée de données (input)
- Programme de calculs
- Programme des résultats
- Programme courbe

3.3 PRÉSENTATION DU CAS D'ETUDE

Le modèle traité est celui de Chen et al, (1999), il consiste à un tunnel circulaire de diamètre $D=6\text{m}$ construit dans un massif de sol argileux homogène à une profondeur $H=20\text{m}$ de la surface naturelle. Le tunnel est en interaction avec un pieu isolé de diamètre $d=50\text{cm}$, de longueur de $L_p=25\text{m}$ et un module d'élasticité longitudinal; $E_p=30\text{GPa}$ (Figure 3.1). La distance horizontale entre l'axe vertical du tunnel et le pieu est supposée égale à $x_p=4,5\text{m}$.

Le modèle de sol est modélisé en utilisant le critère de Mohr-Coulomb, les déplacements horizontaux et verticaux sont supposés nuls au niveau du substratum et les déplacements horizontaux sont bloqués sur les côtés latéraux.

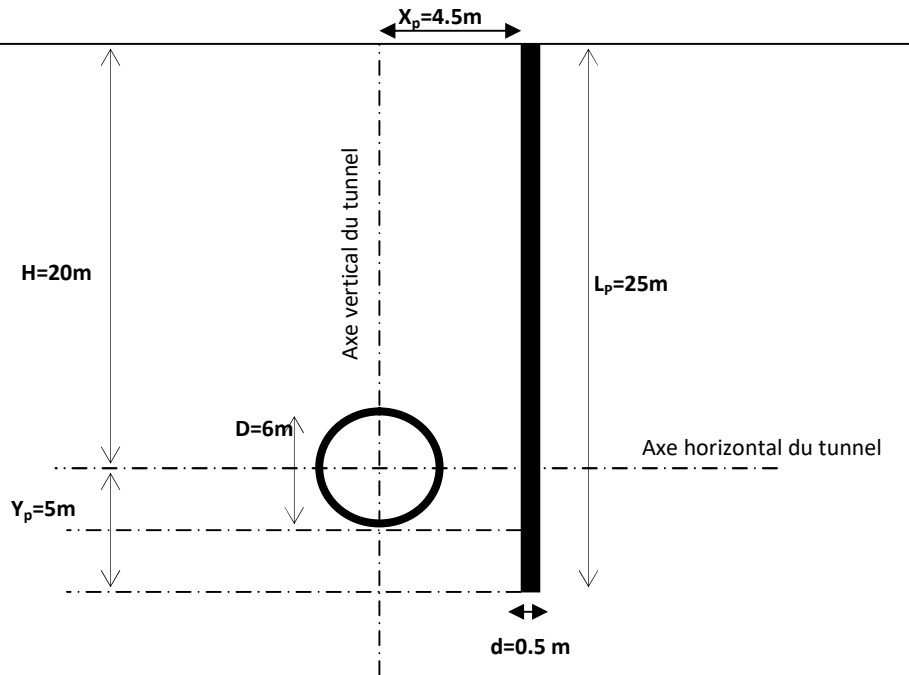


Figure 3.1 Définition du problème de calcul (Chen et al, 1999)

3.3.1 Caractéristiques des matériaux

Le tableau qui suit résume les caractéristiques du modèle choisi :

Tableau 3.1 Caractéristiques du sol pour le modèle de référence (Chen et al., 1999)

Paramètres du modèle	Argile
Modèle type	Mohr-Coulomb
Poids volumique sec (KN/m^3)	15
Poids volumique humide (KN/m^3)	18
Module de Young (KN/m^2)	24000
Coefficient de poisson	0.35
Cohésion (KN/m^2)	10
Angle de frottement (degrés)	25

Le revêtement en béton du tunnel a une épaisseur égale à 35cm, ses rigidités normale et flexionnelle sont égales respectivement à $EA=1,4 \cdot 10^7 \text{ KN/ml}$ et $EI= 1,43 \cdot 10^5 \text{ kN.m}^2/\text{ml}$.

3.3.2 Modélisation par éléments finis- Maillage retenu

Les modélisations numériques ont été faites par le logiciel Plaxis 2D, le maillage retenu est présenté dans la figure (3.2), le modèle comprend :

- 334 éléments triangulaires de 15 nœuds.
- 2801 nœuds.

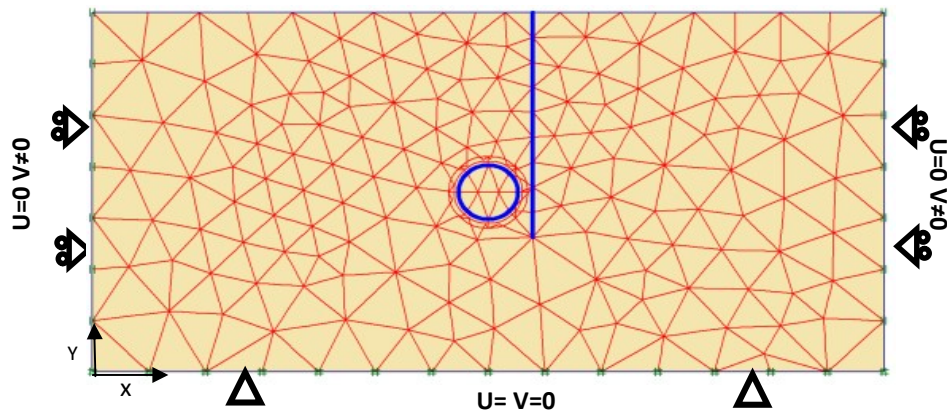


Figure 3.2 Modèle éléments finis retenu pour l'exemple de calcul

3.4 RÉSULTATS DES CALCULS DU CAS D'ETUDE

Dans cette étude, nous avons adopté deux approches pour analyser les réponses latérales et axiales du pieu isolé et du terrain encaissant causées par le creusement d'un seul tunnel.

Nous débuterons par le calcul des déplacements latéraux et verticaux du terrain sans la présence du pieu, ensuite, nous analyserons l'effet du creusement de ce tunnel sur le pieu isolé déjà existant, il sera aussi question de calculer les moments fléchissants et les efforts axiaux dans le pieu induit par la construction du tunnel.

Par la suite, une étude paramétrique sera présentée et ceci en modifiant les paramètres suivants :

- La distance horizontale séparant l'axe du pieu de l'axe vertical du tunnel (notée x_p),
- La longueur du pieu (notée L_p)
- La distance verticale séparant la pointe du pieu de l'axe horizontale du tunnel (notée Y_p).

3.4.1 1^{er} CAS D'Etude- Absence du pieu

En ce qui suit, nous analyserons la réponse du sol vis-à-vis le creusement du tunnel sans la présence du pieu, nos résultats seront présentés à une distance de $x_p=4,5m$ (à l'emplacement exact du pieu).

3.4.1.1 Déplacements verticaux

Nous présentons dans la figure (3.3) la distribution des déplacements verticaux au niveau de l'axe vertical du pieu à la distance $x_p=4,5m$ (L'emplacement exact du pieu; sans la présence du pieu) en comparaison avec les résultats de Chen et al., (1999), Kitiyodom et al., (2005) et Basile (2014).

On peut voir que les déplacements verticaux augmentent avec l'augmentation de la profondeur jusqu'à la clé du tunnel (à $Y=23m$) et ceci est valable pour les quatre études y compris la nôtre, puis les mouvements diminuent rapidement au niveau du radier (là où le sol n'est plus perturbé par le creusement à $Y=17m$).

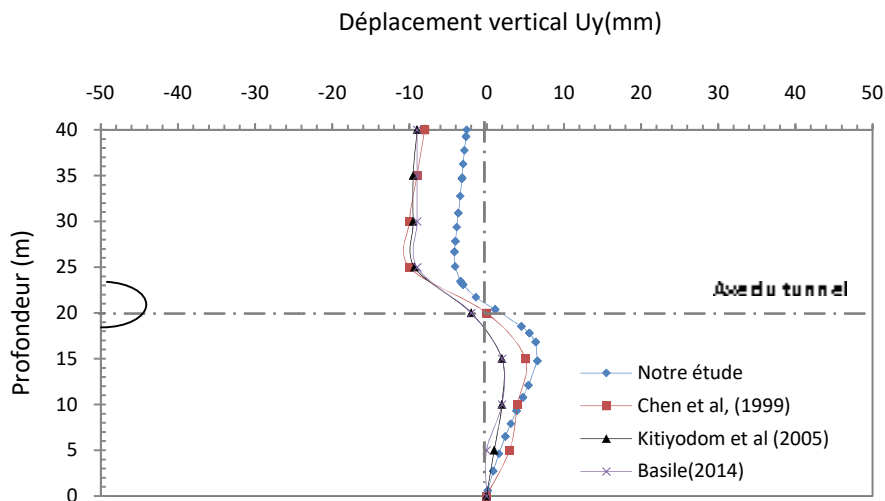


Figure 3.3 Déplacements verticaux du sol à $x=4,5m$

Par rapport à nos résultats d'étude trouvés par Plaxis 2D, la forme du déplacement vertical est identique aux autres résultats avec une légère réduction.

Il s'agit d'un déplacement vertical élevé au-dessus de la clé du tunnel (Zone d'influence) et moins important au-dessous du radier : ce qui augmentera la possibilité que le pieu soit par la suite sollicité dans sa partie supérieure jusqu'à peu près 20m de son fût à partir de sa tête.

3.4.1.2 Déplacements latéraux

Dans cette partie, nous présentons la distribution des déplacements latéraux toujours du pieu à $x_p=4,5m$ en comparaison avec les résultats de Chen et al., (1999), Kitiyodom et al., (2005) et Basile (2014) (figure 3.4).

La forme des déplacements latéraux est identique et on obtient les mêmes constatations par rapport aux déplacements verticaux.

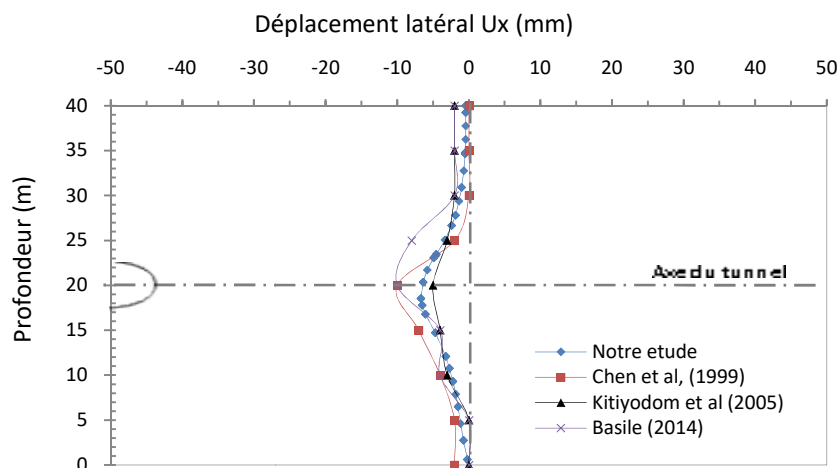


Figure 3.4 Déplacement latéral du sol à $x=4,5m$

Les déplacements horizontaux sont négligeables à partir de la surface, et augmentent en s'approchant du centre du tunnel avec des valeurs maximales (pour les quatre études) puis ils s'annulent.

3.4.2 2^{ème} Cas d'étude- En présence du pieu

Dans cette partie, nous supposons que le pieu existait avant le creusement du tunnel.

3.4.2.1 Déplacements verticaux

Nous présentons dans la figure (3.5) la réponse verticale du pieu (U_y) à $x_p=4,5m$ en comparaison avec les résultats des quatre études (Chen et al., 1999, Kitiyodom et al., 2005, Xu et Poulos, 2001 et Basile, 2014).

Nous remarquons qu'un excellent accord est constaté entre les différents résultats de Kitiyodom et al., (2005), Xu et Poulos (2001) et Basile (2014), nous pouvons expliquer ce résultat de rigidité.

La forme des résultats trouvés par le code de calcul Plaxis 2D (notre étude) concorde parfaitement avec les autres profils avec une légère différence. Nous remarquons en parallèle que les déplacements verticaux sont uniformes.

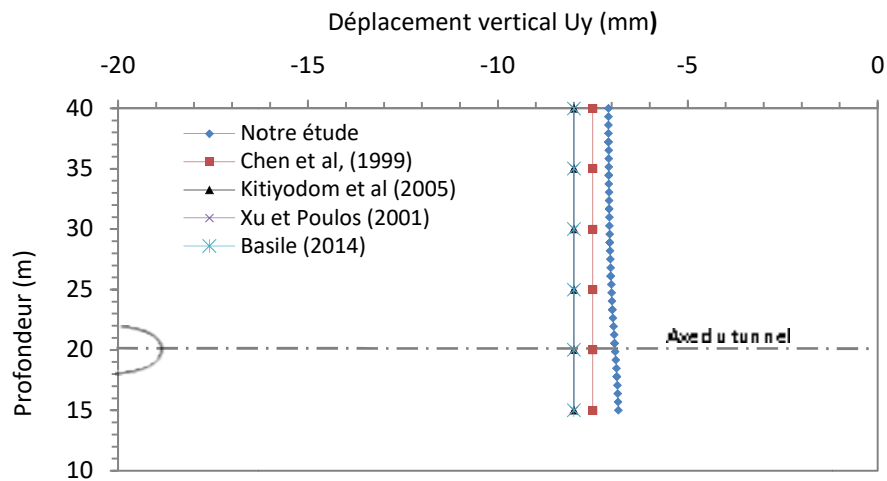


Figure 3.5 Déplacement vertical du pieu

3.4.2.2 Déplacements latéraux

La Figure (3.6) montre la distribution des déplacements latéraux du pieu à $x_p=4,5m$, en comparaison avec les résultats de Chen et al., (1999), Kitiyodom et al., (2005), Xu et Poulos (2001) et Basile (2014).

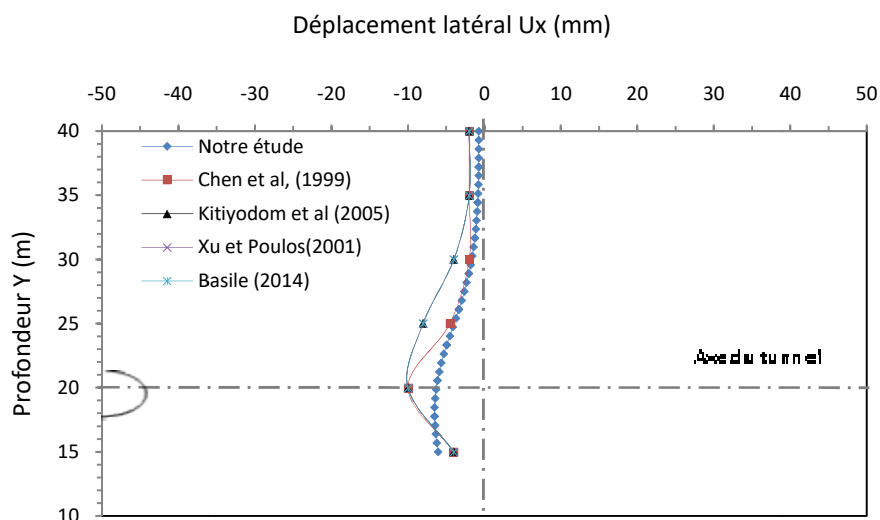


Figure 3.6 Déplacement latéral du pieu

Pour notre étude, le profil des déplacements latéraux concorde avec celui de Chen et al., (1999) jusqu'à la clé du tunnel.

A partir de ce point, une petite différence de se manifeste d'environ 50% au niveau du flanc du tunnel.

Nous remarquons aussi que les déplacements latéraux (U_x) sont négligeables jusqu'à atteindre le centre du tunnel pour atteindre un déplacement latéral maximal pour les quatre études et la notre en plus.

En général, les déplacements latéraux (U_x) causés au pieu sont similaires à ceux du sol avec une légère différence.

3.4.2.3 Moment fléchissant du pieu

La figure (3.7) montre la distribution des moments fléchissant du pieu à $x_p=4,5m$, en comparaison avec les résultats de Chen et al., (1999), Kitiyodom et al., (2005), Xu et Poulos (2001) et Basile (2014).

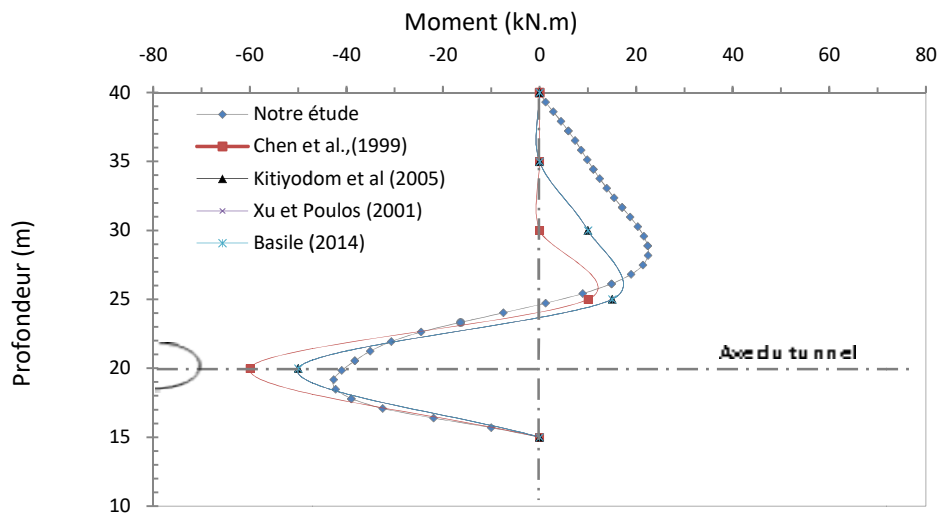


Figure 3.7 Moment fléchissant du pieu

Nous remarquons que par rapport à notre étude où les moments fléchissant s'annulent en surface et augmentent avec la profondeur, ceux des autres auteurs s'annulent à une profondeur d'environ 10m par rapport à la surface dans le cas de l'étude de Chen et al., (1999) et à une profondeur de 5m dans le cas de ceux de Kitiyodom et al., (2005), Xu et Poulos (2001) et Basile (2014).

En parallèle, nous apercevons que ces moments maximums se produisent au niveau de l'axe horizontal du tunnel pour tous les cas.

3.4.2.4 Effort axial du pieu

La figure (3.8) montre la distribution de la force axiale au niveau de l'axe vertical du pieu à $x_p=4,5m$, en comparaison avec les résultats de Chen et al., (1999), Kitiyodom et al., (2005), Xu et Poulos (2001) et Basile (2014).

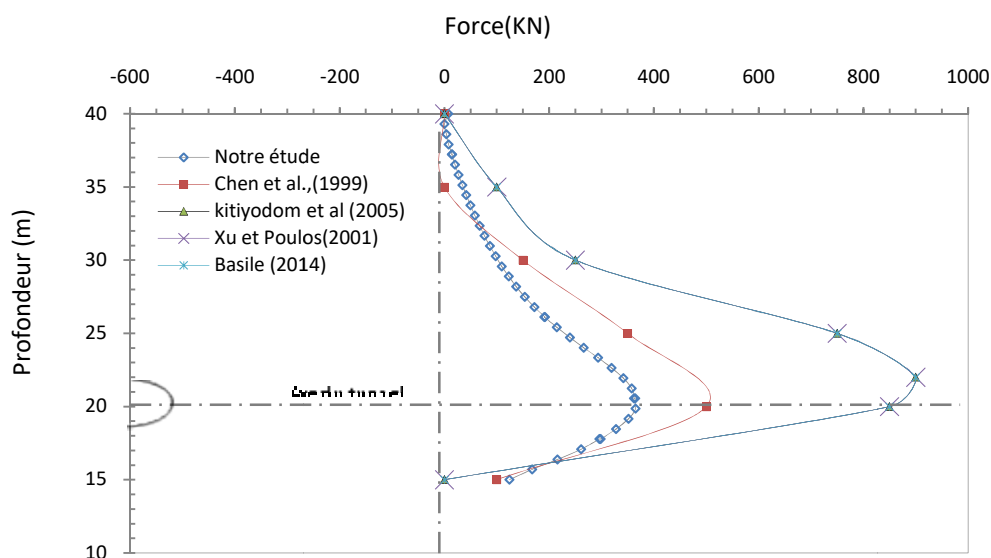


Figure 3.8 Effort axial du pieu

Nous apercevons que l'effort axial s'annule en surface et augmente avec la profondeur pour atteindre une valeur maximale au niveau de l'axe horizontal du tunnel pour les cinq études et la notre y compris avec quelques différences. La valeur la plus importante de cette force est atteinte dont les études Kitiyodom et al., (2005), Xu et Poulos (2001) et Basile (2014).

3.5 Influence de la distance horizontale du pieu (x_p)

La figure (3.9) présente les déplacements verticaux à différentes positions (x_p) du pieu par rapports à l'axe vertical du tunnel, il s'agit de $x_p=4,5m$ (réf.) ; $7,5m$ et $10,5m$.

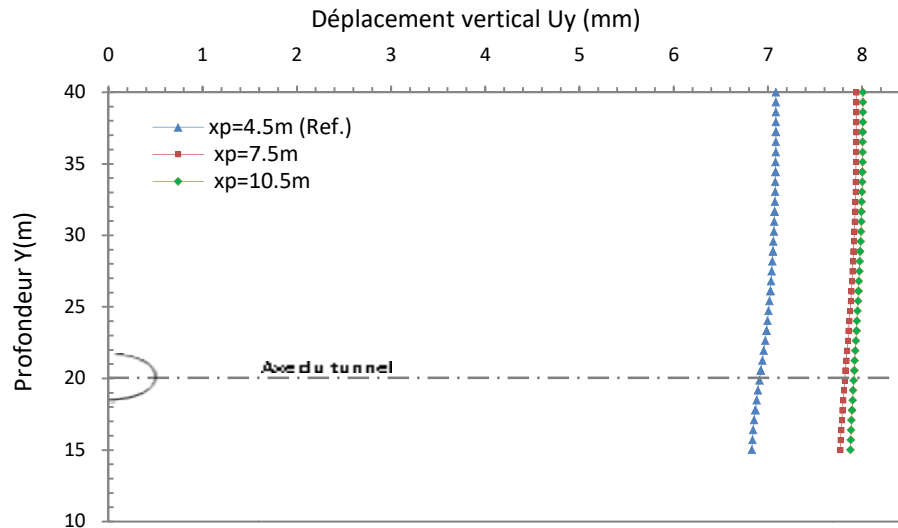


Figure 3.9 Déplacements verticaux

Nous remarquons que pour la position du pieu $x_p=4,5m$, le déplacement vertical est égal à $7mm$ et à environ $8mm$ pour les deux positions $x_p=7,5m$ et $x_p=10,5m$.

On conclut alors que le pieu le plus proche du tunnel subit le plus de déformations, à partir de $2,5R$ le pieu n'est plus sollicité.

3.6 Influence de la longueur du pieu (L_p)

La figure (3.10) montre l'influence de la longueur du pieu (L_p) sur les déplacements verticaux, nous avons opté pour les longueurs suivantes : $20m$ et $15m$. (À savoir $L_p=25m$ dans le modèle de référence).

Nous remarquons que le déplacement vertical augmente lorsque la longueur du pieu diminue et que le pieu s'avère sollicité par l'emplacement de sa pointe : si la pointe du pieu se trouve au-dessus de la clé du tunnel, on obtient des déplacements verticaux plus élevés par rapport si elle est positionnée au-dessous ou au centre, ceci est causé par la zone d'influence.

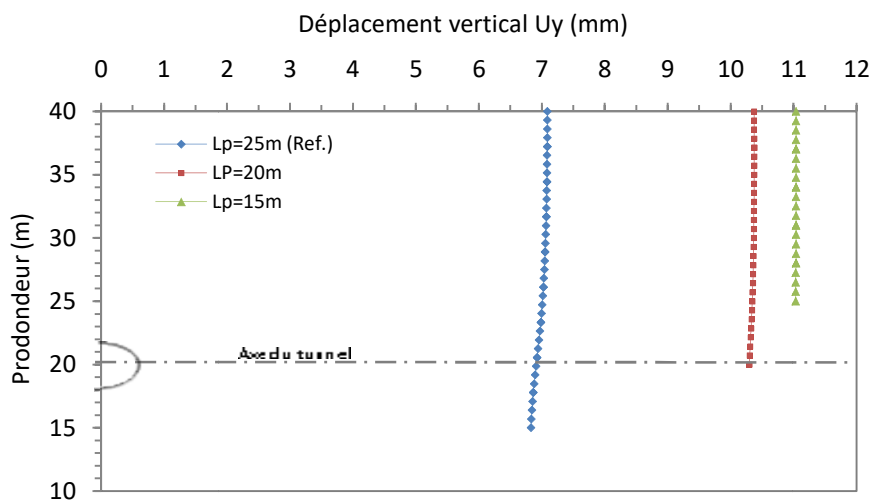


Figure 3.10 Déplacement vertical

3.7 Influence de la profondeur du tunnel par rapport à la pointe du pieu (Y_p)

La figure (3.11) montre l'influence de la distance de l'axe horizontal du tunnel par rapport à la pointe du pieu (notée Y_p) sur les déplacements verticaux du pieu. A savoir, dans le modèle de référence $Y_p=5m$ et $L_p=25m$.

Nous remarquons que les déplacements augmentent lorsqu'on modifie la profondeur du tunnel : en augmentant la profondeur du tunnel, le tassement du pieu augmente.

Si l'axe horizontal du tunnel se trouve au-dessous du niveau de la pointe du pieu, on obtient des déplacements verticaux plus élevés par rapport s'il est positionné au-dessus, ceci est induit par la **zone d'influence** causée par l'excavation du tunnel. Nos résultats corroborent ceux d'autres auteurs (Figure 3.12).

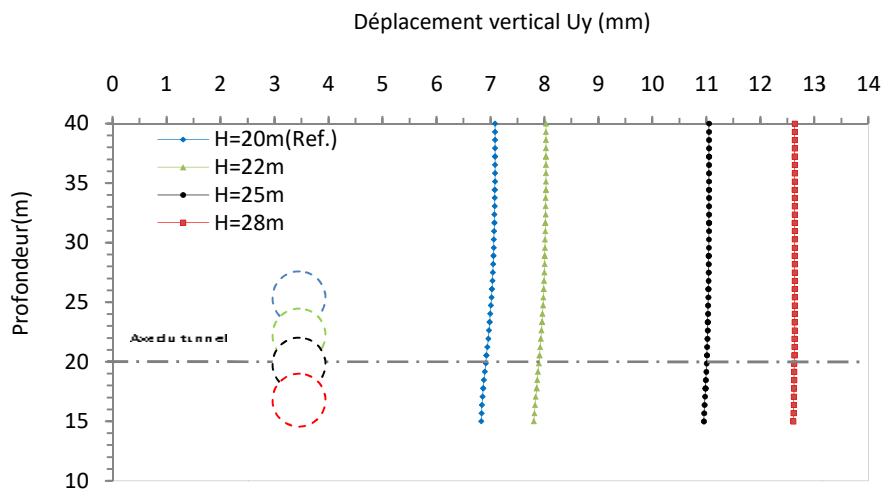


Figure 3.11 Déplacement vertical

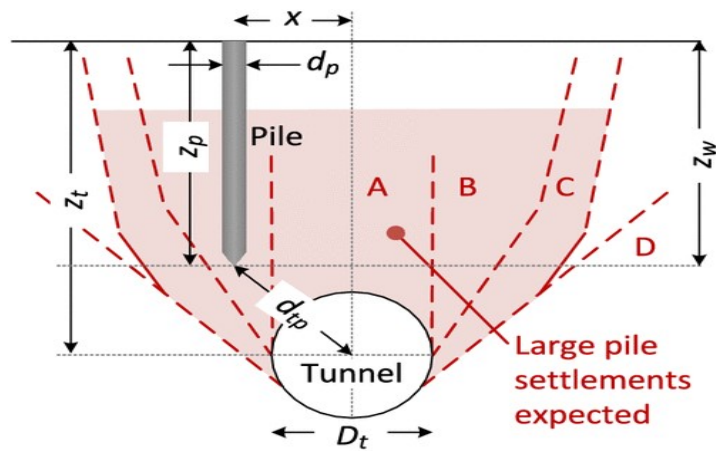


Figure 3.12 Zone d'influence (Marshall et al, 2020)

3.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé numériquement à l'aide du code de calcul Plaxis 2D un modèle tiré de la littérature (Chen et al., 1999).

L'effet du creusement d'un tunnel seul sur un pieu isolé a été analysé et les réponses latérales et axiales ont été étudiées en utilisant deux cas d'étude. Dans le premier, il s'agit de

calculer les déplacements verticaux et latéraux du sol causés par le creusement d'un seul tunnel et les comparer à d'autres études sans la présence du pieu. Quant au deuxième cas d'étude, nous avons modélisé l'effet du creusement du tunnel sur le pieu ce qui a permis de prédire les déplacements et les efforts appliqués à ce dernier.

Les résultats obtenus ont été comparés aux résultats d'autres auteurs pour les valider, ils concordent.

Nos analyses ont montré que le creusement de tunnel cause au pieu des efforts et des moments fléchissant ainsi que des mouvements verticaux et horizontaux.

Une étude paramétrique a accompagné ces résultats et ceci en modifiant trois paramètres : la distance horizontale séparant l'axe du pieu de l'axe vertical du tunnel (notée x_p), la longueur du pieu (notée L_p) et la distance verticale séparant la pointe du pieu de l'axe horizontal du tunnel (Y_p); Les remarques suivantes ont été décelées :

- Le pieu le plus loin est le moins sollicité par l'excavation du tunnel (loin de la zone d'influence).
- Le pieu le plus long est le moins déformable si sa pointe se trouve au-dessous du tunnel.
- La distance Y_p a une incidence directe sur les déformations du pieu : Si la pointe du pieu se trouve au-dessus du tunnel et de son axe horizontal, le pieu subit plus des déformations.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les résultats présentés dans ce mémoire mettent en lumière l'intérêt des études consacrées à l'analyse de l'effet du creusement des tunnels sur les fondations profondes, l'étude a comporté une partie bibliographique et une autre numérique effectuée à l'aide du code de calcul Plaxis 2D.

Nous avons traité dans ce mémoire un cas d'étude tiré de la littérature (modèle de Chen et al., 1999) qui a subi d'autres analyses par d'autres auteurs (tels que Kitiyodom et al., 2005, Xu et Poulos, 2001 et Basile, 2014...etc.) afin d'analyser l'effet du creusement d'un tunnel seul sur un pieu isolé et les réponses latérales et axiales ont été étudiées en utilisant deux cas d'étude. Dans le premier, il s'agit de calculer les mouvements verticaux et latéraux du sol causés par le creusement d'un seul tunnel et les comparer à d'autres études sans la présence du pieu. Quant au deuxième cas d'étude, nous avons modélisé l'effet du creusement du tunnel sur le pieu ce qui a permis de prédire les déplacements et les efforts appliqués à ce dernier.

Une étude paramétrique a accompagné ces résultats et ceci en modifiant trois paramètres : la distance horizontale séparant l'axe du pieu de l'axe vertical du tunnel (notée x_p), la longueur du pieu (notée L_p) et la distance verticale séparant la pointe du pieu de l'axe horizontal du tunnel (Y_p). Nous avons arrivé aux conclusions : qu'en s'éloignant de la zone d'influence engendrée par le creusement du tunnel, le pieu est moins sollicité et les déformations se réduisent. Aussi, que l'emplacement du tunnel par rapport à la pointe du pieu est très important et différents mouvements sont engendrés.

Enfin, nos analyses ont mis en évidence que le creusement d'un tunnel peut entraîner sûrement le développement d'un moment de flexion critique lorsque le centre du tunnel coïncide avec le niveau de la pointe du pieu, des efforts axiaux et un tassement d'où l'emplacement du futur tunnel est très influençant.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons:

1. D'étudier l'effet de cette interaction en présence d'une nappe phréatique.
2. D'analyser l'effet d'un groupe pieux en complément au pieu isolé.

Bibliographie

1. Abderrahmane A. et Bensalah A. (2016). Influence du creusement d'un tunnel sur le comportement du sol sous les fondations d'une construction en surface. Mémoire de fin d'étude. Université de Tlemcen. Algérie.
2. Amara I. (2018). Etude de comportement d'un tronçon du tunnel d'Ait Yahia Moussa. Mémoire de fin d'étude. Université de Tizi Ouzou. Algérie.
3. Atahan C. (1995). Modélisation numérique du creusement d'un tunnel à l'aide d'un bouclier à pression de boue. Thèse de doctorat : Ecole Nationale des ponts et chaussées. France.
4. Basile, F. (2014). Effects of tunnelling on pile foundations. *Soils Found.* 54 (3), 280–295
5. Bernat S. (1996). Modélisation du creusement d'un tunnel en terrain meuble. Qualification sur chantier expérimental. Lyon, ingénieur de l'école centrale de Lyon. France.
6. Berthoz N., Banque E. D., Wong H., Subrin D. (2010). Evolution des champs de contraintes et déplacements autour d'un tunnelier à front pressurisé. Actes des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Grenoble, France, pp. 779-786.
7. Berthoz N. (2012). Modélisation physique et théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. France.
8. Boubou, R. (2010). Prise en compte du mode de pressurisation du front et de la géologie dans l'étude de l'impact du creusement de tunnels. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. France.
9. Chen L.T., Poulos H.G., Loganathan N. (1999). Pile responses caused by tunneling. *J.Geotech. Geoenviron. Eng.* 125 (2–3), 207 215.

10. Dolzhenko N. (2002). Etudes expérimentale et numériques de modelé rendit bidimensionnel du creusement d'un tunnel. Développement d'une loi de comportement spécifique. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. France.
11. DTU 13.2 (1992), Fondations profondes pour le bâtiment, Norme AFNOR.
12. El Houari N. Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration 3D. Thèse de doctorat. Université de Tlemcen. Algérie.
13. DTU 13.2. Fondations profondes pour le bâtiment, Par la commission de normalisation Française, Edition AFNOR, (Septembre 1992 – 72 pages).
14. Hamdidi T. (2019). Étude de comportement d'une fondation sur un groupe de pieux Mémoire de fin d'étude. Université de Tizi Ouzou. Algérie.
15. Hassini I. 2016 Thème : Evaluation des tassements pour une fondation profonde Mémoire de fin d'étude. Université de Tizi Ouzou. Algérie.
16. Kitcher F. (2012) Etude numérique de la stabilité d'une section du tunnel t4 de l'autoroute est -ouest .pour obtention diplôme magister génie civil UNV Batna. Algérie.
17. Kitiyodom, P., Matsumoto, T., Kawaguchi, K., 2005. A simplified analysis method for piled raft foundations subjected to ground movements induced by tunnelling. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 29 (15), 1485–1507.
18. MCIF, 2006 : Manuel Canadien d'ingénierie des Fondations.
19. Melbouci Bachir Méthodes de calcul de stabilité des fondations, des talus et des ouvrages de soutènements 1954-2009.
20. Montcho G. C. (2005). Fondations Profondes Dimensionnement et conception d'un programme de calcul. Mémoire de fin d'étude . Ecole supérieure polytechnique. Centre de THIES.
21. Plumelle C. (2004) Etude du comportement mécanique de micropieux sous chargements monotones et cycliques verticaux. Application aux effets de groupe, fondation profondes
22. Roger F. (2003), calcul des fondations superficielles et profondes édition 5.
23. Sagaseta C. et Gonzales C. (2001). Patterns of soil deformations around tunnels. Application to the extension of Madrid Metro. *Computers and Geotechnics* 28.445–468.
24. Schmidt (1974) Mouvements de sol lors du creusement d'un tunnel. docinsa.insa-lyon.fr

- 25.** Trompille V. (2003). Etude expérimentale et théorique du comportement d'un tunnel renforcé par boulonnage frontal. Thèse de Doctorat. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 219 p. France.
- 26.** Xu K.J. et Poulos H.G. (2001). 3-D Elastic analysis of vertical piles subjected to passive loadings. *Comput. Geotech.* 28, 349–375.

Webographie

27. Site : <http://www.planete-tp.com/souterrains-de-l-antiquite-a967.html>
28. Site : <https://www.techno-science.net/definition/4496.html>
29. Site : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Tunnel-page-3.html>
30. Site: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tunnel#:~:text=La%20plus%20ancienne%20mention%20d,%2DC>