

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 : Travaux publics**

**Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art**

**Par : Benali Mohamed & Hobaya Hadjer**

**Sujet**

### **Analyse de l'influence du creusement Des tunnels sur les déformations des pieux**

**Soutenu le /09/2023 , devant le jury composé de :**

HAMZAOUI F.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Président
SMAIL N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Examinatrice
EL HOUARI N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2022 /2023

## **Dédicaces**

Ce travail de mémoire est destiné à nos chers parents pour les remercier du fond du coeur.

Nous tenons à leur exprimer notre profonde gratitude pour tous les sacrifices et les efforts fournis. Vous étiez une véritable inspiration pour nous. Merci

A nos familles et amis qui étaient présents et à qui nous souhaitons beaucoup de succès.

A toute la promotion VOA 2022/2023

A tous ceux que nous aimons, un grand merci

**Hobaya Hadjer & Benali Mohamed**

## Remerciements

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadrante, M<sup>me</sup> El Houari Nesrine, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, pour ses précieux conseils, pour sa patience et sa disponibilité, et surtout pour tout le confort et l'aisance qu'elle nous a apportée durant tous ces mois de travail.

Nous tenons également à remercier vivement M<sup>r</sup> Hamzaoui Fethi, Maître de conférences à l'Université de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur de présider ce jury. Nous remercions respectueusement M<sup>me</sup> Smail Nadia Maître de conférences à l'Université de Tlemcen d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire .

**Merci à tous**

## Résumé

L'effet du creusement des tunnels sur les pieux est un problème crucial dans le domaine de l'ingénierie et de la construction souterraine qu'il faut traiter correctement. En effet, les pieux sont des éléments structuraux profonds utilisés pour soutenir, souvent dans des projets de construction, des ponts, des bâtiments, des infrastructures de transport, etc. Lorsque des tunnels sont creusés à proximité de ces pieux, plusieurs effets indésirables peuvent se produire, notamment des déformations, des mouvements de sol et même des risques potentiels pour la stabilité des pieux et des structures sus-jacentes peuvent surgir. Dans ce mémoire, nous avons abordé l'influence du creusement des tunnels sur les déformations des pieux dans différentes configurations. Les analyses numériques effectuées par le code de calcul Plaxis 2D ont servi à évaluer les effets du creusement de tunnels sur des pieux qui se trouvent à proximité de la zone d'excavation en adoptant comme modèle de base celui de Chen et al. (1999). Plusieurs cas d'étude ont été investis, un terrain vierge (sans pieu), un seul tunnel en interaction avec un pieu puis avec un groupe de pieux, et ensuite le cas de tunnels jumeaux en interaction avec un pieu isolé puis avec un groupe de pieux. Nos analyses ont été déployées autour des réactions verticales et latérales du sol et des pieux. Aussi les moments fléchissant et les Efforts axial qu'ont subit les pieux par l'effet du creusement ont été présentés. Des études comparatives ont été menées et des résultats intéressants ont été trouvés.

**Mots Clés :** Tunnels, Pieux, Plaxis 2D, Réponses axiale et latérale, Moments fléchissant, Efforts axial

## ABSTRACT

The effect of tunneling on piles is a critical issue in underground engineering and construction that must be properly addressed. Indeed, piles are deep structural elements used to support, often in construction projects, bridges, buildings, transport infrastructure, etc. When tunnels are excavated near these piles, several undesirable effects can occur, including deformations, ground movements and even potential risks to the stability of the piles and overlying structures can arise. In this dissertation, we addressed the influence of tunneling on pile deformations in different configurations. The numerical analyzes carried out by the Plaxis 2D calculation code were used to evaluate the effects of tunneling on piles located near the excavation area, adopting as a base model that of Chen et al. (1999). Several study cases were investigated, free-field ground (without a pile), a single tunnel interacting with a pile then a group of piles, and then the case of twin tunnels interacting with an isolated pile then with a group of piles. . Our analyzes were deployed around the vertical and lateral reactions of the soil and the piles. Also the bending moments and axial forces of the piles due to the effect of excavation were presented. Comparative studies have been carried out and interesting results were found.

**Keywords:** Tunnels, Piles, 2D Plaxis, Axial and lateral responses, Bending moments, axial forces

## ملخص

يعد تأثير حفر الأنفاق على الأكوام مشكلة بالغة الأهمية في الهندسة والبناء تحت الأرض ويجب معالجتها بشكل صحيح. في الواقع، الركائز عبارة عن عناصر هيكلية عميقة تستخدم للدعم، غالبًا في مشاريع البناء والجسور والمباني والبنية التحتية للنقل وما إلى ذلك. عندما يتم حفر الأنفاق بالقرب من هذه الركائز، يمكن أن تحدث العديد من التأثيرات غير المرغوب فيها، بما في ذلك التشوهات وحركات الأرض وحتى المخاطر المحتملة على استقرار الركائز والهياكل التي تغطيها. تناولنا في هذه الأطروحة تأثير حفر الأنفاق على تشوهات الركائز بأشكال مختلفة. تم استخدام التحليلات الرقمية التي أجراها كود حساب لتقييم آثار حفر الأنفاق على الركائز الواقعة بالقرب من منطقة الحفر، مع اعتماد نموذج أساسي تمت دراسة عدة حالات، أرض بدون ركائز، نفق واحد متفاعل مع ركيزة ثم مع مجموعة من الركائز، ثم حالة لنموذج نفقين متفاعلين مع ركيزة معزولة ثم مع مجموعة من الركائز. تمت تحليلاتنا حول التفاعلات الأفقية والعمودية للتربة و الركائز. كما تم عرض عزوم الانحناء والقوى المحورية التي تعرضت لها الركائز نتيجة تأثير الحفر. تم إجراء دراسات مقارنة وتم العثور على نتائج مثيرة للاهتمام

الكلمات المفتاحية: الأنفاق، الركائز، بلاكسيس، التفاعلات الأفقية والعمودية، عزوم الانحناء، القوى

المحورية

# Listes des figures et tableaux

## Chapitre 1 : Synthèse Bibliographique Sur Les Tunnels

<b>Figure 1.1</b> Précurseur du tunnelier, inventé en 1825 par Brunel (Molinaro, 2019)	4
<b>Figure 1.2</b> Tunnel circulaire (Zhiqiang , et al., 2022)	8
<b>Figure 1.3</b> Recommandations de (Terzaghi, 1946)	10
<b>Figure 1.4</b> Effondrement provoqué par La rupture d'un tunnel en Corée du Sud (El Houari, 2015)	13
<b>Figure 1.5</b> Irruption d'eau pendant la construction de la section orientale du tunnel ferroviaire de Wienerwald (ÖBA, 2006)	14
<b>Figure 1.6</b> Tassements de surface en 3D (Magnan et Serratrice, 2002)	15

## Chapitre 2 Généralités Sur Les Fondations

<b>Figure 2.1</b> Choix de type de fondation (Michallet, 2019).	19
<b>Figure 2.2</b> Type de fondation superficielle (Bruno& Yvan, 2017)	20
<b>Figure 2.3</b> Type de Fondation profondes (Planète TP, 2007)	21
<b>Figure 2.4</b> Définition du pieu isolé selon son mode de fonctionnement (TSTP, 2008)	23
<b>Figure 2.5</b> Répartition des contraintes pour un pieu isolé et un groupe de pieux (TSTP, 2008)	24
<b>Figure 2.6</b> Travail de groupe de pieux (Agence Qualité, Fondations et infrastructures, 2019)	26
<b>Figure 2.7</b> Paramètres caractéristiques des mouvements subis par la structure (Bloodworth, 2002)	30
<b>Figure 2.8</b> Interaction tunnel structure (Zaid Al Farhan et al ,2022)	32
<b>Figure 2.9</b> Interaction du milieu urbain (Alec et al, 2020)	35

### **Chapitre 3 Réponses Des Pieux Au Creusement Des Tunnels**

<b>Figure 3.1</b> modèle de référence Chen et al. , (1999)	38
<b>Figure 3.2</b> Modèle éléments finis : Tunnel seul- Pieu isolé	39
<b>Figure 3.3.</b> Mouvement verticaux et latéraux (Terrain vierge)	41
<b>Figure 3.4</b> Réponses du pieu isolé au creusement d'un seul tunnel	42
<b>Figure 3.5</b> Modèle éléments finis-Tunnel seul- groupe de pieux (2x2)	43
<b>Figure 3.6</b> Réponses du groupe de pieux (2x2) au creusement d'un seul tunnel	44
<b>Figure 3.7</b> Modèle éléments finis- Tunnel seul- groupe de pieux (3x2)	45
<b>Figure 3.8</b> Réponses du groupe de pieux (3x2) au creusement d'un seul tunnel	45
<b>Figure 3.9</b> Modèle éléments finis : Tunnel jumeaux- Pieu isolé	46
<b>Figure 3.10</b> Comparaison des réponses du pieu isolé au creusement de tunnels jumeaux et tunnel seul	47
<b>Figure 3.11</b> Modèle éléments finis : Tunnel jumeaux- groupe de pieux 2x2	48
<b>Figure 3.12</b> Comparaison des réponses du groupe de pieux (2x2) au creusement de deux tunnels jumeaux avec un seul tunnel	48
<b>Figure 3.13</b> Comparaison de l'effort axial des pieux 1 et 2 au creusement de deux tunnels jumeaux avec un seul tunnel-groupe de pieux (2x2)	49
<b>Figure 3.14</b> Modèle éléments finis : Tunnel jumeaux- groupe de pieux 3x2	49
<b>Figure 3.15</b> Comparaison des réponses du groupe de pieux (3x2) au creusement de deux tunnels jumeaux avec un seul tunnel	50
<b>Figure 3.16</b> Comparaison de l'effort axial des pieux 1, 2 et 3 au creusement de deux tunnels jumeaux et un seul tunnel- -groupe de pieux (2x3)	51

## **Chapitre 1**

<b>Tableau 1.1</b> Classification de Terzaghi pour l'estimation de $H_p$ (Martin, 2012)	10
---	----

## **Chapitre 2**

<b>Tableau 2.1</b> Classification de fondations (Bakour, 2008).	18
---	----

<b>Tableau 2.2</b> Classification des dommages aux constructions courantes (AFTES 1995)	33
---	----

## **Chapitre 3**

<b>Tableau 3.1</b> Paramètres physique et mécanique du sol (Chen et al. 1999)	39
---	----

# TABLE DES MATIERES

Dédicace	I
Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
ملخص	V
Liste des figures et tableaux	VI
Table des matières	IX
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 01 : Synthèse bibliographique sur Les tunnels</b>	
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 HISTORIQUE DES TUNNELS	4
1.3 DEFINITION ET TYPES DES TUNNELS	5
1.3.1 Les tunnels construits en souterrain à faible profondeur	6
1.3.2 Les tunnels construits en souterrain à forte profondeur	6
1.4 LES METHODES DE CALCUL DES TUNNELS	7
1.4.1 Méthodes analytiques	7
1.4.1.1 La méthode de convergence-confinement (MCC)	8
1.4.2 Méthodes empiriques	9
1.4.2.1 Méthode de TERZAGHI	9
1.4.2.2 Méthode de l’AFTES	11
1.4.3 Méthodes numériques	11
1.5 LES RISQUES D’INSTABILITES DES TUNNELS	12

1.5.1	Les Effondrements	13
1.5.2	Les désordres	13
1.6	TASSEMENT DE DEUX TUNNELS	15
1.7	CONCLUSION	16

## **Chapitre 02 : Généralités Sur Les Fondations**

2.1	INTRODUCTION	17
2.2	DEFINITION DES FONDATIONS	18
2.3	FONDATIONS SUPERFICIELLES	19
2.4	FONDATIONS PROFONDES- PIEUX	20
2.5	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PIEUX	22
2.5.1	Comportement d'un groupe de pieux	24
2.5.2	Influence d'un groupe de pieux	26
2.6	DEFORMATIONS DES PIEUX	27
2.6.1	Tassement de pieu isolé	27
2.6.2	Tassement d'un groupe de pieux	28
2.7	INTERACTION SOL- STRUCTURES	28
2.8	INTERACTION CONSTRUCTIONS SOUTERRAINES – STRUCTURES	30
2.8.1	Interaction tunnel-structure	31
2.8.2	Interaction creusement-structure en surface	32
2.8.3	Interaction sol-pieu- tunnel	33
2.5	CONCLUSION	35

## **Chapitre 03 : Réponses des pieux au creusement Des tunnels**

3.1	INTRODUCTION	37
-----	--------------	----

3.2 PRÉSENTATION DU MODELE D'ETUDE	38
3.2.1 Propriétés du terrain	38
3.2.2 Simulation éléments finis	39
3.3 ANALYSES EF ET INTERPRETATIONS - CAS D'UN SEUL TUNNEL	39
3.3.1 Réponse du terrain au creusement de tunnel seul sans la présence du pieu	40
3.3.2 Interaction tunnel seul-Pieu isolé	41
3.3.3 Interaction tunnel seul- groupe de pieux (2X2)	42
3.3.4 Interaction tunnel seul- groupe de pieux (3X2)	44
3.4 ANALYSES ET INTERPRETATIONS- CAS DE TUNNELS JUMEAUX	46
3.4.1 Interaction tunnels jumeaux- pieu isolé	46
3.4.2 Interaction tunnels jumeaux- groupe de pieux (2X2)	47
3.4.3 Interaction tunnels jumeaux- groupe de pieux (3X2)	49
3.6 CONCLUSION	51
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>55</b>

## INTRODUCTION GENERALE

À mesure que la population urbaine croît, les exigences liées à l'expansion des villes augmentent également. Cela implique la création d'une infrastructure capable de répondre aux besoins et d'améliorer la qualité de vie des habitants. Pour répondre à ces défis, les ingénieurs exploitent l'espace souterrain comme une solution alternative pour satisfaire les besoins sociaux sans perturber de manière significative l'activité en surface.

En conséquence, l'utilisation des tunnels devient de plus en plus pratique pour inspecter et moderniser les installations souterraines. Cependant, ces tunnels peuvent entrer en interaction avec d'autres structures telles que les métros, les bâtiments et différents types de fondations, qu'elles soient superficielles ou profondes, comme les pieux.

Ces interactions ont une influence considérable sur les pieux, entraînant des conséquences potentiellement intolérables, telles que des déformations et des efforts supplémentaires, en raison des modifications des contraintes du sol environnant. Il devient donc nécessaire de mener des études afin de prédire ces déformations et d'estimer l'ampleur de ces efforts causés aux pieux afin de ne pas nuire à la stabilité et sécurité des structures.

D'où l'objectif de ce mémoire : évaluer les mouvements et les efforts causés par les excavations des tunnels et leurs effets sur les pieux.

Afin d'aboutir à cet objectif, le mémoire sera structuré en trois chapitres : deux chapitres bibliographiques, suivi d'un dernier chapitre exposant la partie originale de ce mémoire ; il sera question de présenter une étude d'un modèle de référence (Chen et al., 1999) et poursuivre par plusieurs analyses en modifiant ce modèle.

Nous abordons dans le chapitre 1 une étude bibliographique sur les tunnels. Dans le chapitre 2, il sera question de présenter des généralités sur les fondations en mettant l'accent sur les pieux et nous présentons en dernier une synthèse concise sur l'interaction entre les tunnels et les pieux.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'effet de la construction de tunnels sur des pieux déjà existant; le modèle de référence choisi est celui de Chen et al., (1999). Différentes

configurations ont été adoptées. En premier lieu, le modèle de référence a été réétudié en utilisant le code de calcul éléments finis Plaxis2D. Nous avons effectué une série d'analyses pour l'évaluation des déplacements vertical et latéral du sol ainsi que du pieu isolé avant et après l'existence de ce pieu. Les moments fléchissant et les efforts axiaux seront déduits en parallèle. Deux cas d'étude ont été appréhendés : l'étude d'un seul tunnel ensuite de tunnels jumeaux. Dans les deux cas les tunnels ont été en interaction avec un pieu isolé puis avec un groupe de pieux de (2x2) et un groupe de pieux de (3x2). des comparaisons entre ces configurations ainsi que le modèle de Chen et al., (1999) sont présentées au fur et à mesure de l'avancement du chapitre.

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

## Chapitre 1

# ***SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES TUNNELS***

### **1.1 INTRODUCTION**

Les tunnels sont des ouvrages souterrains qui permettent de traverser des obstacles naturels et urbains tels que les montagnes, les fleuves, les rues et les bâtiments. Ils sont utilisés pour une grande variété de raisons, allant du transport routier et ferroviaire aux services publics tels que les conduites d'eau et d'égouts.

La construction de tunnels est une entreprise complexe et exigeante, nécessitant une planification minutieuse, des compétences techniques et une gestion efficace. Les tunnels peuvent être creusés de différentes manières, selon leur type et les conditions géologiques locales.

Cependant, la construction de ce type d'ouvrages présente également des risques, notamment pour la sécurité des travailleurs, l'environnement et les infrastructures

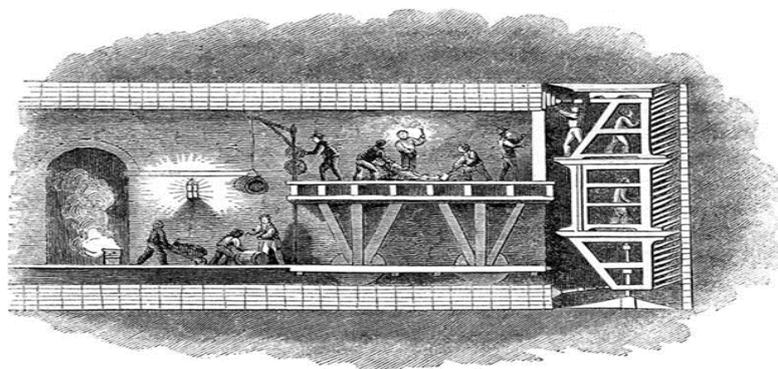
avoisinentes. Des précautions d'emploi appropriées doivent être prises pour minimiser ces risques et garantir la sécurité et la durabilité des tunnels.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail les différents types de tunnels, les méthodes de calcul utilisées pour leur conception et leur construction, ainsi que les risques associés à leur construction et les précautions d'emploi nécessaires pour les minimiser.

## 1.2 HISTORIQUE DES TUNNELS

Les civilisations antiques en 530 avant J.C ont construit des canaux pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau en creusant des aqueducs. Le tunnel construit par Epaliens à Samos est l'un des plus connus, tandis que le tunnel de Pouzzoles construit par les Romains était également remarquable. Les méthodes de creusement comprenaient le chauffage et le refroidissement de la roche (Bouzourine et al., 2021).

Au XIXe siècle, l'industrialisation de l'Occident a entraîné des innovations dans les ouvrages souterrains. Au départ, les tunnels étaient creusés à la main, mais l'invention de la dynamite par Alfred Nobel a permis de limiter l'utilisation de la force humaine et de creuser plus rapidement. Un premier instrument a été inventé en 1825 par Marc Brunel pour le percement d'un tunnel sous la Tamise à Londres, il s'agit d'un bouclier en fonte, permettant de protéger les ouvriers des éboulements, mais où rien n'est mécanisé (Figure 1.1) (Molinaro et al., 2019).



**Figure 1.1** Précurseur du tunnelier, inventé en 1825 par Brunel (Molinaro, 2019)

Deux galeries- témoin de 1,8 kilomètres chacune ont été percées de chaque côté de la Manche avec cette technologie, en vue de construire un tunnel reliant la France et l'Angleterre ; le projet fut abandonné. Les tunneliers continuèrent ensuite à se développer mais leur utilisation resta limitée aux chantiers miniers principalement car ils étaient incapables de creuser dans des roches dures.

Mais c'est en 1952 qu'est inventé le premier tunnelier à roche dure par l'américain James Robbins, qui construit une machine avec une roue de coupe rotative (Molinaro et al., 2019).

### **1.3 DEFINITION ET TYPES DES TUNNELS**

Les tunnels sont des ouvrages d'ingénierie qui permettent de traverser les obstacles naturels et d'offrir des solutions de transport et de service publics efficaces. Ils existent depuis l'Antiquité, mais leur construction et leur utilisation ont évolué avec les progrès technologiques et les besoins de la société.

Un tunnel est un passage souterrain creusé dans le terrain environnant et généralement fermé à l'exception des entrées et sorties à chaque extrémité.

Les différents types de tunnels incluent les tunnels routiers, ferroviaires, piétons et de service publics. Chacun a ses propres caractéristiques et exigences de conception et de construction.

Il existe plusieurs types de tunnels :

- Les tunnels routiers sont destinés au passage de véhicules, tandis que les tunnels ferroviaires sont destinés aux trains.
- Les tunnels piétonniers sont destinés aux piétons et peuvent être équipés d'escaliers ou d'ascenseurs.

- Les tunnels hydrauliques transportent de l'eau ou d'autres liquides, tandis que les tunnels miniers facilitent l'extraction de minerais ou de roches.
- Les tunnels de service facilitent l'accès aux services publics tels que les égouts, les conduites d'eau ou les câbles électriques.

Chaque type de tunnel est conçu en fonction de sa finalité spécifique et présente des caractéristiques uniques.

Il existe autre types des tunnels selon la forme (Circulaire, Elliptique, rectangulaire.....) et/ou en fonction de leur profondeur :

### **1.3.1 Les tunnels construits en souterrain à faible profondeur**

Les tunnels situés à faible profondeur sont caractérisés par un rapport (Flliat, 1981):

$$H/B < 10$$

Avec :

H est la profondeur du terrain de recouvrement.

B est la largeur du tunnel.

### **1.3.2 Les tunnels construits en souterrain à forte profondeur**

Ce sont les tunnels alpins qui ont apporté de nombreuses informations sur la construction à très grande profondeur (hauteur de couverture supérieure à 1km).

Les roches qui semblent très résistantes à la surface ( $R_c > 150\text{MPa}$ ) peuvent avoir un comportement complètement différents lors de leur traversée en profondeur. (Martin, 2012).

Si le diamètre du tunnel (ou le diamètre équivalent lorsque la section transversale n'est pas circulaire) est inférieur à la profondeur de son axe, c'est-à-dire  $H / B > 10$ , le tunnel est dit profond (Flliat, 1981).

## 1.4 LES METHODES DE CALCUL DES TUNNELS

La conception et la construction de tunnels impliquent des calculs complexes pour déterminer les dimensions, les forces et les matériaux nécessaires pour garantir la sécurité et la durabilité de l'ouvrage. Les méthodes de calcul varient en fonction du type de tunnel et des conditions géologiques locales.

Les méthodes de calcul utilisées dans la conception des tunnels sont généralement tridimensionnelles et prennent en compte de l'interaction complexe entre le tunnel, le soutènement et le terrain environnant.

Ces méthodes font appel à des techniques de modélisation et de simulation numériques pour analyser le comportement du tunnel et du sol, et pour optimiser la conception des systèmes de soutènement et de revêtement. Nous distinguons trois catégories principales de méthodes de calculs :

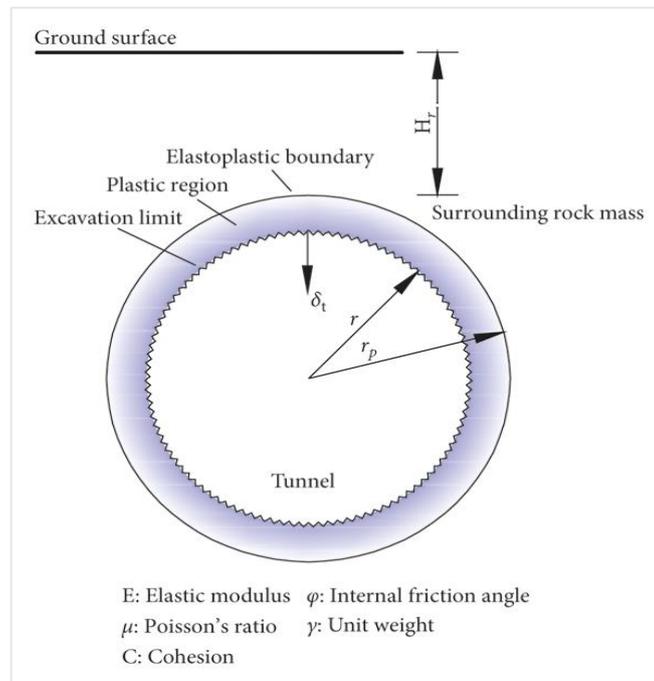
1. Méthodes analytiques
2. Méthodes empiriques
3. Méthodes numériques

### 1.4.1 Méthodes analytiques

Elles sont utilisées pour calculer les déformations et les contraintes dans les tunnels souterrains en utilisant des solutions mathématiques.

Cette méthode est basée sur la théorie de la viscoélasticité linéaire, qui prend en compte les propriétés élastiques et visqueuses du sol environnant. La méthode consiste à modéliser le tunnel comme une cavité circulaire entourée de sol élastique-visqueux.

Les équations de déformation et de contrainte sont résolues en utilisant des techniques mathématiques avancées telles que la transformée de Laplace (Zhiqiang et al., 2022) (Voir figure 1.2).



**Figure 1.2** Tunnel circulaire (Zhiqiang et al., 2022)

#### 1.4.1.1 La méthode de convergence-confinement (MCC)

La méthode convergence-confinement est une méthode de conception de tunnel simple qui prend en compte l'interaction entre l'excavation et le soutènement, contrairement aux anciennes méthodes qui remplaçaient le terrain par un système de charges supposées (El Houari, 2015).

On parle aussi de déconfinement, mais pour le terrain, il s'agit de la décompression causée par la présence du tunnel. Ce déconfinement s'amorce bien en avant du front (à un diamètre environ).

Cette méthode est née suite au succès de la méthode autrichienne (technique pour la réalisation des tunnels en tranches) dans les années 70. Sa conceptualisation complète remonte au tout début des années 80 (Abdi et Berrabeh, 2022).

### 1.4.2 Méthodes empiriques

Elles peuvent être appliquées au creusement de tunnels en utilisant l'observation directe et indirecte ou l'expérience pour acquérir des connaissances sur le comportement des masses rocheuses pendant l'excavation.

Les méthodes empiriques dans le domaine des tunnels impliquent l'utilisation d'observations sur le terrain, d'essais en laboratoire et de modélisation numérique pour développer une compréhension du comportement des sols et concevoir des systèmes de soutènement appropriés.

En utilisant des méthodes empiriques, les ingénieurs peuvent mieux prévoir le comportement des terrains pendant l'excavation des tunnels et concevoir des systèmes de soutènement qui réduisent le risque d'effondrement des tunnels ou d'autres accidents.

Les méthodes empiriques sont largement utilisées en construction souterraine pour l'identification et la caractérisation des sols, ainsi que pour la conception des tunnels et des structures souterraines.

#### 1.4.2.1 Méthode de TERZAGHI

Le système de classification de Terzaghi a amélioré le creusement des tunnels en 1946 en fournissant une méthode de classification des roches sur la base de leurs propriétés techniques.

Le système de classification offrait des valeurs prédites pour la charge des roches qui étaient en bon accord avec les mesures réelles sur le terrain, permettant aux ingénieurs de mieux prévoir le comportement des masses rocheuses pendant l'excavation des tunnels et de concevoir des systèmes de soutènement appropriés ( figure 1.3).

$H_p$  : Hauteur de surcharge de terrain uniformément répartie (Tableau 1.1).

$b$  : Largeur du tunnel.

$H_t$  : Hauteur du tunnel

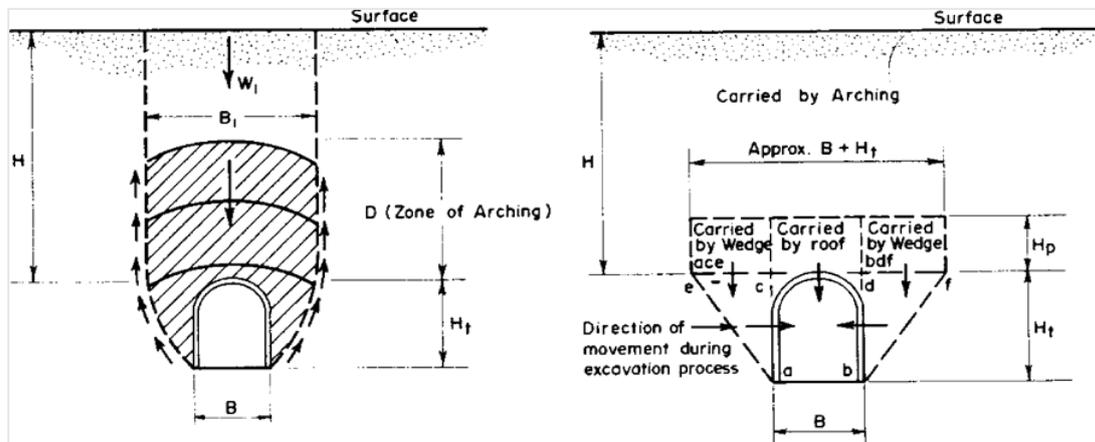


Figure 1.3 Recommendations de (Terzaghi, 1946) (Kavvas, 2005)

Tableau 1.1 Classification de Terzaghi pour l'estimation de  $H_p$  (Martin, 2012)

Nature de la roche	Charge $H_p$	Remarque
1. Dure et intacte	0 à 0,25 B	Quelque ancrage s'il y a chute de pierres
2. Dure et stratifiée	0 à 0,5 B	Soutènement léger
3. Massive avec quelques joints	0 à 0,25 B	La charge peut changer brusquement d'un point à un autre
4. Modérément éboulée	0,25 à 0,35 (B + $H_t$ )	Pas de pression latérale
5. Très éboulée	0,35 à 1,10 (B + $H_t$ )	Peu ou pas de pression latérale
6. Complètement broyée mais chimiquement intacte	1,10 (B + $H_t$ )	Peu ou pas de pression latérale
7. Roche fluente à profondeur modérée	1,10 à 2,50 (B + $H_t$ )	Grande pression latérale cintres circulaires recommandés
8. Roche fluente à grande profondeur	2,10 à 4,50 (B + $H_t$ )	Grande pression latérale cintres circulaires recommandés
9. Roche gonflante	Jusqu'à 75m indépendant de (B + $H_t$ )	Cintres circulaire dans les cas extrêmes utilisé des cintres coulissants

#### **1.4.2.2 Méthode de l'AFTES**

L'AFTES (Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain) est une association française qui regroupe l'ensemble des professions impliquées dans la conception et la construction des ouvrages souterrains et a pour objectif de faire progresser les connaissances et les techniques dans ce domaine.

L'AFTES met à la disposition de ses adhérents un espace où ils peuvent recevoir la revue "Tunnels et Espace souterrain" quatre fois par an, les recommandations des groupes de travail, le téléchargement illimité des revues, participé à des groupes de travail, des journées techniques, des visites de sites, et bien d'autres avantages.

#### **1.4.3 Méthodes numériques**

Les méthodes numériques sont utilisées dans l'ingénierie des tunnels pour simuler le comportement du tunnel et du terrain environnant dans différentes conditions.

La méthode des éléments finis (MEF) est l'une des méthodes numériques les plus couramment utilisées dans l'ingénierie des tunnels.

Le MEF consiste à diviser le tunnel et le massif environnant en éléments finis plus petits et à résoudre les équations du mouvement pour chaque élément. Les équations du mouvement tiennent compte des propriétés des matériaux du massif, de la géométrie du tunnel et des conditions de chargement.

Elle peut être utilisée pour analyser divers aspects du creusement de tunnels, tels que la stabilité des tunnels, la déformation du sol et la performance des systèmes de soutènement. Elle peut également être utilisée pour évaluer l'impact du creusement d'un tunnel sur les structures adjacentes et sur l'environnement.

Parmi les autres méthodes numériques utilisées dans l'ingénierie des tunnels figurent la méthode des différences finies, la méthode des éléments de frontière et la méthode des

éléments discrets. Ces méthodes ont leurs propres avantages et limites, et le choix de la méthode dépend des exigences spécifiques du projet.

### **1.5 LES RISQUES D'INSTABILITES DES TUNNELS**

La construction de tunnels présente des risques importants pour la sécurité des travailleurs, l'environnement et les infrastructures voisines. Des précautions d'emploi doivent être prises pour minimiser ces risques, notamment des évaluations des risques, des mesures de sécurité appropriées, des inspections régulières et des plans de coordination efficaces.

La construction souterraine, en particulier les tunnels urbains, présente des risques spécifiques dans toutes les phases du projet, notamment dans sa construction. Ces risques ont plusieurs sources (Grasso et al., 2004).

1. Risques géotechniques et géologiques : ils sont liés à l'insuffisance des données recueillies lors de l'étude préliminaire et à la capacité d'anticiper la réaction du sol à l'excavation.
  2. Inadéquation des techniques de construction : Les techniques de construction inappropriées peuvent entraîner des problèmes d'instabilité à long terme dans l'ouvrage souterrain.
  3. Mauvaise qualité des matériaux de construction : L'utilisation de matériaux de construction de mauvaise qualité peut compromettre la résistance et la stabilité de l'ouvrage souterrain.
- Faible expertise des travailleurs : Un manque de formation et de compétences chez les travailleurs peut entraîner des erreurs dans la construction, qui peuvent à leur tour causer des problèmes d'instabilité et nuire à la sécurité du système tunnel-sol.

### 1.5.1 Les Effondrements

Les effondrements dans les ouvrages souterrains sont des accidents qui peuvent survenir lors de la construction ou de l'utilisation d'ouvrages souterrains.

Ils se produisent lorsque l'excavation ne peut plus supporter les forces exercées sur elle et s'effondre partiellement ou totalement.

La figure (1.4) présente l'effondrement provoqué par la rupture d'un tunnel en Corée du Sud causé par une mauvaise évaluation des déformations durant la partie étude du projet (El Houari, 2015).



**Figure 1.4** Effondrement provoqué par La rupture d'un tunnel en Corée du Sud (El Houari, 2015)

### 1.5.2 Les désordres

Les désordres sont des altérations qui touchent une structure causées par des facteurs comme l'usure, les dommages structurels, l'instabilité des sols, ou des conditions météorologiques défavorables.

Ces désordres peuvent se présenter sous forme de fissures, d'affaissements, d'infiltrations d'eau (Figure 1.5) ou de mouvements de terrain.

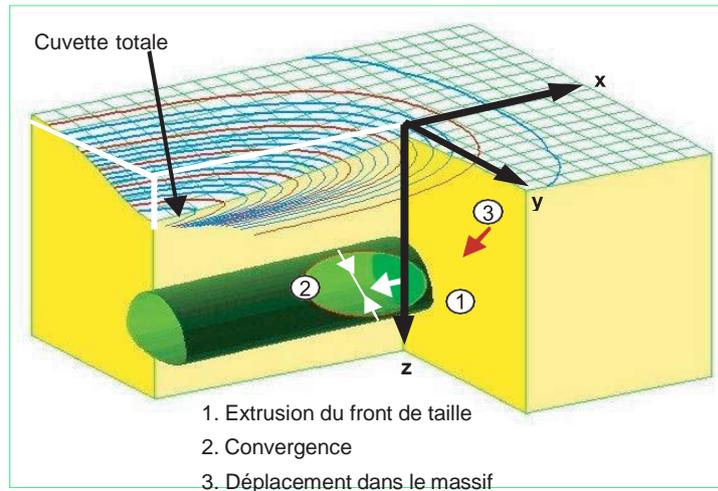


**Figure 1.5** Irruption d'eau pendant la construction de la section orientale du tunnel ferroviaire de Wienerwald (ÖBA, 2006)

Dans le rapport sur l'état actuel des connaissances qu'il présentait au Congrès international de Mécanique des sols et des travaux de fondations de Mexico en 1979, Peck notait « le besoin urgent de disposer de moyens efficaces qui permettent d'estimer l'étendue et la nature des mouvements et des perturbations associées au creusement de tunnels ou de tranchées en site urbain, estimations sans lesquelles on ne dispose pas de base rationnelle de décision » (El Houari, 2015).

En effet, « la conception de tels projets exige d'être capable de juger de la faisabilité de la construction par telle ou telle méthode, d'estimer les tassements ou autres mouvements provoqués dans le massif encaissant et les structures avoisinantes et de doter la structure finale d'une résistance suffisante et d'une rigidité ou d'une flexibilité appropriée ».

Le tassement de surface est causé par l'interaction entre le tunnel et le massif, ainsi que l'interaction entre le massif et le bâtiment environnant. Les déplacements sont tridimensionnels près du front, avec une convergence du terrain dans le plan orthogonal à l'axe du tunnel, une extrusion du terrain vers le front de taille dans la direction de l'axe du tunnel et une direction de déplacement dirigée vers la région active de l'excavation. Cette interaction se traduit par des convergences en paroi, l'extrusion du front et des efforts dans les soutènements. La convergence totale et l'extrusion composent ce que l'on appelle les « pertes de volume » (Figure 1.6) (Magnan et Serratrice , 2002).



**Figure 1.6** Tassements de surface en 3D (Magnan et Serratrice, 2002)

## 1.6 TASSEMENT DE DEUX TUNNELS

Dans la pratique de l'ingénierie, les tunnels jumeaux sont la configuration la plus utilisée dans les projets ferroviaires urbains, en particulier dans une disposition parallèle qui provoque un tassement du sol plus marqué si les deux tunnels étaient séparés par une distance de moins de 1 Diamètre (Chehade et al., 2008).

Yang et al., (2011) ont proposé une méthode stochastique simplifiée pour calculer le tassement du sol des tunnels jumeaux en superposant les tassements induits par deux tunnels identiques. Ils ont obtenu un tassement symétrique par rapport à l'axe médian entre deux tunnels.

Il a été décelé qu'une forme de tassement asymétrique est largement observé dans la pratique du souterrain en cas où les deux tunnels ne sont pas creusés simultanément (Chen et al., 2012).

Selon (Suwansawat, et al., 2007) et (Chen, et al., 2012) la courbe gaussienne décrite par Peck en 1969 peut décrire les tassements de terrain induits par le creusement du premier tunnel ainsi que les tassements supplémentaires induits par le deuxième tunnel.

## 1.7 CONCLUSION

Dans le chapitre présent nous avons mis en exergue l'importance des tunnels dans notre vie quotidienne, leur définition, leur historique et les différents types de tunnels qui pouvaient exister.

Quelques méthodes de calcul utilisées pour la conception et la construction des tunnels, ont été présentées en parallèle ainsi que les risques associés à leur construction.

En somme, les tunnels sont des ouvrages impressionnants qui jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne et qui continuent à évoluer grâce aux avancées technologiques et aux besoins de la société.

D'où la nécessité de faire des études approfondies surtout au stade des études préliminaires en vue de répondre à ces difficultés et complexité surtout en milieu urbain la ou les interactions avec d'autres structures et ouvrages est inévitable...

## Chapitre 2

# ***GENERALITES SUR LES FONDATIONS***

### **2.1 INTRODUCTION**

Le chapitre précédent s'est focalisé sur les tunnels, leur historique ainsi que sur leurs constructions. Dans ce chapitre, il s'agit de présenter des généralités sur les fondations et plus spécialement celles profondes (les pieux), leur comportement et les déformations qu'ils subissent ainsi que le comportement du groupe des pieux et enfin nous terminerons par étaler quelques types d'interactions entre les tunnels et d'autres structures.

## 2.2 DEFINITION DES FONDATIONS

La fondation joue un rôle essentiel dans la structure d'un ouvrage, agissant comme un pilier solide qui empêche son effondrement et garantit sa stabilité. Elle constitue la base qui supporte l'intégralité de la charge de l'ouvrage (El Hadj Said et Bellami, 2021).

Cependant, la qualité de la fondation dépend à la fois du sol qui la soutient et du type d'ouvrage à supporter (Mongho, 2005).

Lorsque les études géotechniques révèlent que le sol ne présente pas les propriétés mécaniques appropriées pour assurer la stabilité de l'ouvrage, il devient nécessaire de rechercher une solution en profondeur. C'est dans ce contexte que les fondations profondes interviennent. Elles désignent le type de fondation réalisé sur une surface présentant des caractéristiques géologiques favorables, située en profondeur (à quelques mètres sous la surface) (Selka & Rahoui, 2022).

Les fondations sont classées selon la profondeur d'encastrement de la fondation par rapport au terrain naturel ( $D$ ) et par  $B$  sa largeur (figure 2.1).

On distingue 3 types de fondations (Tableau 2.1) :

Tableau 2.1 Classification de fondation (Bakour, 2008).

Le rapport $D/B$	Le type de fondation
$D/B < 4$	Des fondations superficielles (semelles filantes ou isolée, radiers)
$4 \leq D/B < 10$	Des fondations semi-profondes (puits)
$D/B \geq 10$	Des fondations profondes (pieux)

Au-delà de  $\frac{D}{B} > 6$ , et  $D > 3$ , nous sommes dans le domaine des fondations profondes.

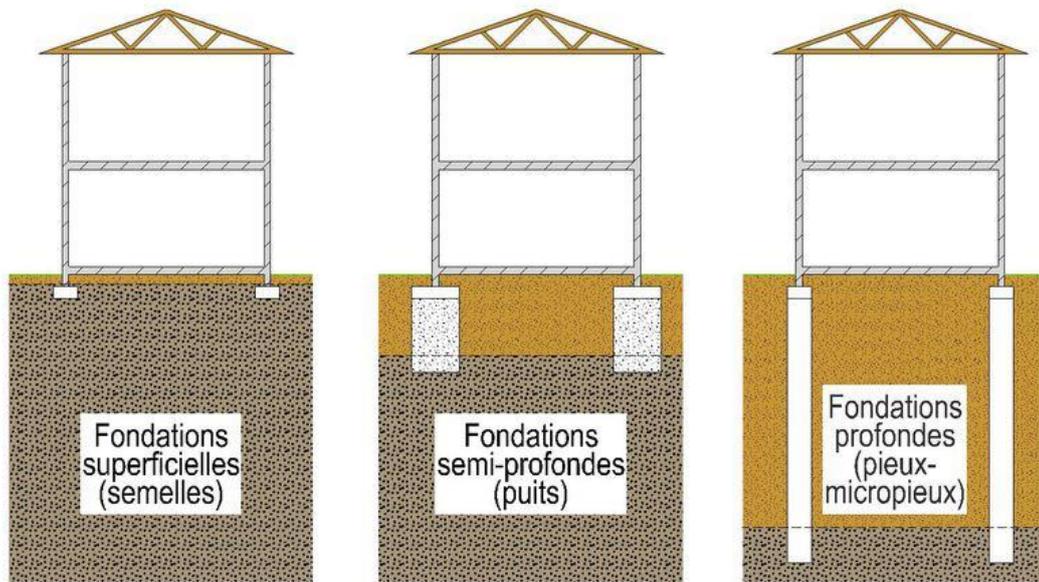


Figure 2.1 Choix de type de fondation (Michallet, 2019).

### 2.3 FONDATIONS SUPERFICILLES

Le concept d'une fondation superficielle peut être employé lorsque les sols présentent une homogénéité suffisante et contiennent des couches porteuses à proximité de la surface. Trois types de semelles sont distingués pour les fondations superficielles (Figure 2.2):

- Les semelles isolées : elles ont une forme carrée ou circulaire et supportent des charges ponctuelles.
- Les semelles filantes (ou continues) : elles sont caractérisées par une longueur considérable par rapport à leur largeur et sont conçues pour soutenir un mur ou une paroi.
- Les radiers (ou dalles) : ce sont des dalles planes qui constituent l'ensemble des fondations d'un bâtiment. Ils sont adaptés lorsque la capacité portante du sol est faible et que sa compression est uniforme (El Hadj & Bellami, 2021).

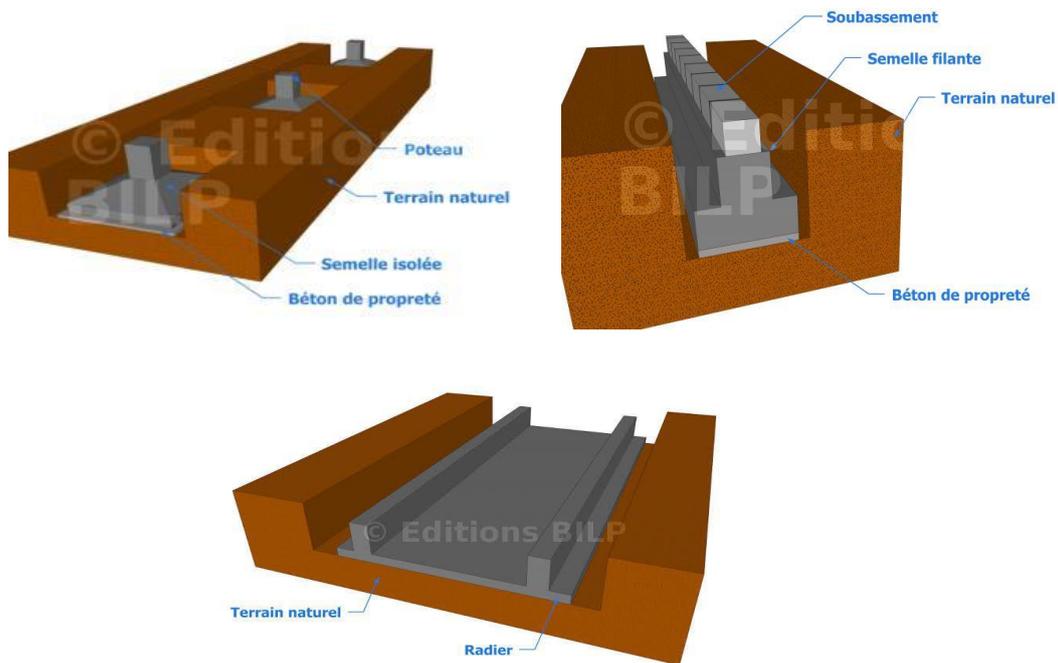


Figure 2.2 Type de fondation superficielle (Bruno et Yvan, 2017)

## 2.4 FONDATIONS PROFONDES- PIEUX

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 « bed rock » ou un sol plus résistant et de mobiliser le frottement latéral des couches transverses.

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.

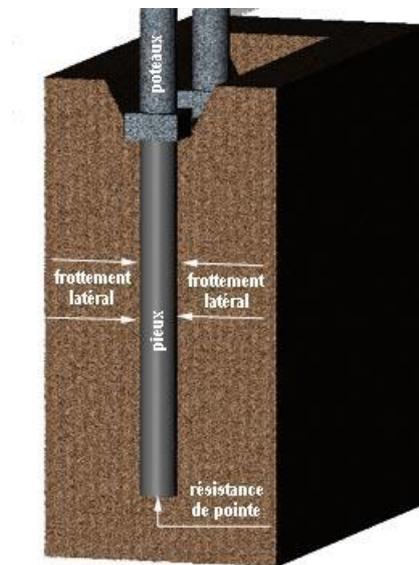
Si la fondation était exécutée directement sur ces couches compressibles, des tassements incompatibles à la stabilité de l'ouvrage se produiraient (Frank, 2003).

Les fondations profondes utilisent différentes méthodes pour transférer la charge au sol :

Lorsqu'elles sont directement posées sur le substratum, elles mobilisent la résistance du sol en fonction de leur section, en appliquant un effort de pointe proportionnel.

Les pieux flottants, qui sont enfoncés dans une couche cohérente telle que les sols argileux, mobilisent uniquement la résistance du sol par frottement latéral.

Lorsqu'il n'est pas possible de descendre sur une couche suffisamment résistante, les fondations profondes mobilisent à la fois la résistance du sol par frottement latéral et par effort de pointe (Forni, 1981).



**Figure 2.3** Type de Fondation profondes  
(Planète TP, 2007)

Dans le cas où le sol possède une couche plus solide en profondeur, les pieux sont disposés de manière à ce que les charges de la structure soient transmises à cette couche.

Lorsque le sol ne dispose d'aucune couche suffisamment solide pour supporter la structure, les pieux transmettent les forces au sol par le biais de frottements le long de leur surface (Mongho, 2005).

Les pieux peuvent être classés selon plusieurs critères :

1. Le matériau utilisé : bois, métal ou béton.
2. Le mode de fabrication et d'installation : pieux battus et pieux forés.

Lors de l'évaluation de la capacité portante, il est essentiel de prendre en compte le type de sollicitation exercé sur le sol lors de la mise en place du pieu. On distingue ainsi :

- Les pieux qui refoulent le sol lors de leur installation.
- Les pieux qui n'entraînent pas de refoulement du sol lors de leur mise en place, nécessitant une excavation du sol (Bakour et Azzedine, 2008).

## **2.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES PIEUX**

Le rôle principal du pieu consiste à transférer les charges vers les couches du sol dotées de bonnes propriétés physiques et mécaniques. Cette transmission de charges s'opère de deux manières principales (Figure 2.4) :

1. Par l'appui de sa base contre le sol porteur (force de pointe notée  $Q_p$ ).
2. Par le frottement latéral entre le pieu et le sol environnant (force de frottement latéral notée  $Q_s$ ).

Il convient de noter que la force de pointe dépend de deux facteurs :

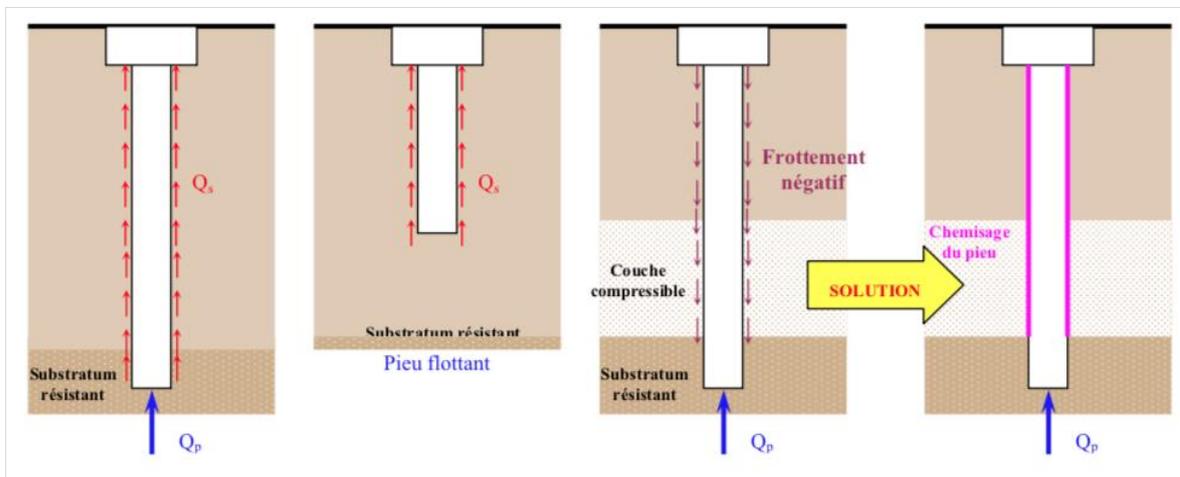
- La surface de la base du pieu.
- La résistance du substratum rocheux.

Quant à la force de frottement latéral, elle est conditionnée par :

- La zone de contact entre le pieu et le sol.
- Le coefficient de frottement entre le pieu et le sol.

De plus, il est important de souligner que le frottement latéral ne se manifeste que lorsqu'il y a un mouvement relatif entre le pieu et le sol environnant. Si le pieu tend à pénétrer dans un sol stable, le frottement entre le sol et le pieu génère une force verticale ascendante, qualifiée de « frottement positif ».

En revanche, lorsque le pieu reste immobile et que le sol a tendance à se compacter, le frottement généré est dit « frottement négatif ». Dans ce dernier cas, le pieu est chemisé avec un tubage afin de réduire l'effet du frottement négatif, ce qui évite une surcharge du pieu (Chekroune, 2013).

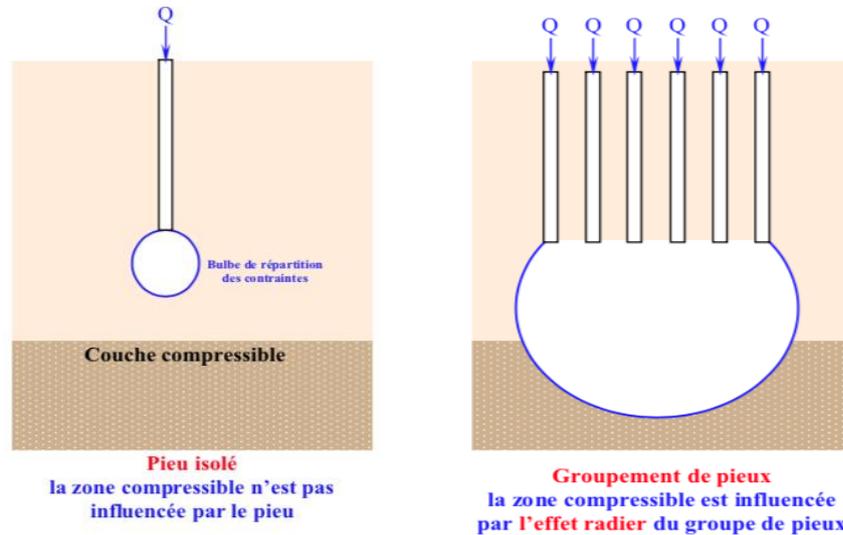


**Figure 2.4** Définition du pieu isolé selon son mode de fonctionnement (TSTP, 2008)

Lorsque les pieux sont disposés en groupe avec des espacements plus ou moins importants, il est essentiel de vérifier la résistance globale du groupe, car la capacité portante du groupe de pieux ( $Q_{gu}$ ) peut être inférieure à la somme des capacités portantes individuelles de chaque pieu ( $Q_{iu}$ ).

### 2.5.1 Comportement d'un groupe de pieux

Cette situation résulte principalement de la diffusion des contraintes en profondeur, ce qui crée des conditions nettement différentes pour un groupe de pieux par rapport à un pieu isolé. Ce phénomène est couramment appelé « Effet radier ».



**Figure 2.5** Répartition des contraintes pour un pieu isolé et un groupe de pieux (TSTP, 2008)

Si les pieux sont flottants, Terzaghi a montré que la répartition des contraintes en profondeur peut être estimée en assimilant le groupe à un radier fictif situé au tiers inférieur de la longueur des pieux.

Si les pieux travaillent essentiellement en pointe, le radier fictif doit être situé au niveau de la pointe pour estimer ce risque.

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 concernant : la force portante, les sollicitations axiales, le tassement, les réactions latérales et les poussées latérales du sol, le frottement négatif.

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

- 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 du pieu, est modifiée.
- La charge appliquée sur un pieu a une influence, en termes d'efforts et de déplacements, sur le comportement des pieux voisins.

Pour dimensionner un groupe de pieux chargé latéralement de nombreux paramètres devraient être considérés concernant la structure :

- Position des pieux par rapport à la direction du chargement,
- Nombre de pieux,
- Espacement entre les pieux,
- Conditions de liaison en tête,
- Mode de mise en place (avec ou sans refoulement) et ordre de mise en place, ou concernant le massif de sol contenant le groupe de pieux :
- Nature (cohérent ou pulvérulent) et caractéristiques mécaniques,
- Densité.

En fonction de ces critères, les études précédemment analysées permettent d'établir des recommandations quant au comportement du groupe chargé latéralement :

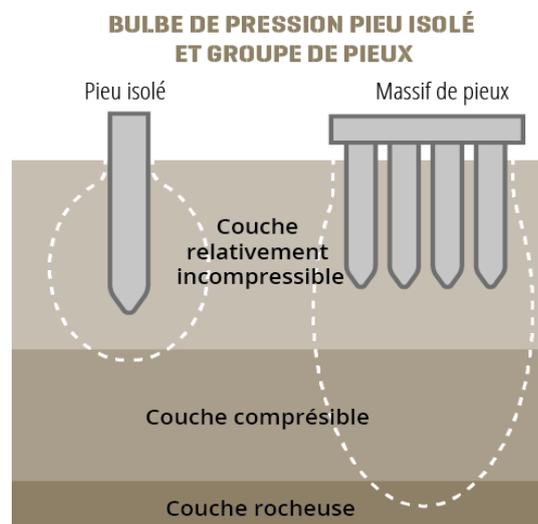
- Les pieux disposés en rangée perpendiculaire au sens du chargement (pieux en rang) sont très peu affectés par l'effet de groupe. Pour les pieux disposés en rangée parallèle au sens du chargement (pieux en ligne), l'effet d'ombre du pieu avant modifie le comportement des pieux situés derrière ;

- A espacement identique, plus les pieux sont nombreux dans le groupe, plus l'effet de groupe est important. Dans un couple de pieu, le pieu avant à un comportement proche de celui du pieu isolé. Pour un nombre d'éléments supérieurs, son comportement est par contre distinct du pieu isolé. Les pieux qui suivent ont un comportement proche voire identique.

### 2.5.2 Influence d'un groupe de pieux

De manière similaire aux fondations superficielles, les pieux engendrent un bulbe de pressions sous eux (figure 2.6).

Par conséquent, il est essentiel de s'assurer que les couches sous-jacentes sont capables de supporter ces pressions transmises. En effet, lorsque les pieux sont regroupés, le bulbe de pressions résultant descend beaucoup plus profondément que celui d'un pieu isolé. C'est pourquoi l'espacement entre deux pieux doit être d'au moins 2 à 2,5 fois le diamètre des pieux afin de garantir une répartition adéquate des charges.



**Figure 2.6** Travail de groupe de pieux  
(Agence Qualité, Fondations et infrastructures, 2019)

L'influence du groupe apporte des avantages considérables, notamment pour les pieux flottants mis en œuvre dans des sols granulaires sujets à la compression lors de l'installation.

L'influence des autres pieux (l'effet de groupe) est négligeable à partir d'un espacement entre axes de  $6B$  ( $B$  : diamètre du pieu).

L'effet de groupe est plus important dans les sables que dans les argiles. Dans les sables, il augmente avec la densité relative (Frank, 2019).

## **2.6 DEFORMATIONS DES PIEUX**

### **2.6.1 Tassement de pieu isolé**

La déformation d'un pieu isolé sous des charges typiques est généralement minime et n'a pas une importance cruciale dans la conception de la plupart des structures. Cependant, il existe des situations spécifiques impliquant des pieux isolés où il est impératif de considérer la déformation (cas des ouvrages souterrains).

Les observations expérimentales montrent que la déformation observée au sommet des pieux est généralement d'environ 1 cm, lorsqu'ils sont soumis à une charge de référence équivalente à 0,7 fois la charge portante maximale ( $Q_p$ ). Cela est valide pour diverses longueurs de pieux, allant de 6 à 45 m, ainsi que pour des diamètres de fût ( $B$ ) variant entre 0,30 et 1,5 m.

On établit une limite de déformation appelée  $S_{ref}$  pour le tassement sous la charge de référence (Montgho, 2005):

- Pour les pieux de type foré :  $S_{ref} = 0,006 B$  (avec des variations allant de  $0,003 B$  à  $0,010 B$ ).

- Pour les pieux de type battu :  $S_{ref} = 0,009 B$  (avec des variations allant de  $0,003 B$  à  $0,010 B$ ).

### **2.6.2 Tassement d'un groupe de pieux**

Les déformations constatées au sein d'un groupe de pieux ( $S_c$ ) sont plus significatives comparées à celles d'un pieu individuel, pour une charge par pieu identique. Ceci s'explique par la zone d'influence mobilisée par le groupe, qui diffère de celle d'un pieu isolé.

En effet, les dimensions globales du groupe de pieux jouent un rôle crucial dans les déformations observées.

Les pressions transmises par le groupe de pieux revêtent une grande importance et induisent des déplacements considérables au niveau de la pointe des pieux (Chekroune, 2013).

## **2.7 INTERACTION SOL- STRUCTURES**

L'interaction entre le sol et la structure est un aspect important à prendre en compte lors de la conception et de la réalisation des ouvrages. En général, la structure est composée de matériaux tels que le béton, l'acier ou le bois, qui ont une rigidité bien supérieure à celle du sol environnant. Le comportement de ces matériaux peut être modélisé de manière simplifiée à l'aide de modèles élastiques ou élasto-plastiques (Bakri, 2016).

L'interaction sol-structure entraîne des déformations du sol et de la fondation, ainsi qu'une redistribution des contraintes dans le sol. Cette redistribution dépend de la rigidité du sol et de la fondation.

Il est essentiel de comprendre l'état de contrainte au niveau de l'interface sol-fondation pour dimensionner de manière réaliste les structures, en prenant en compte la capacité portante du sol.

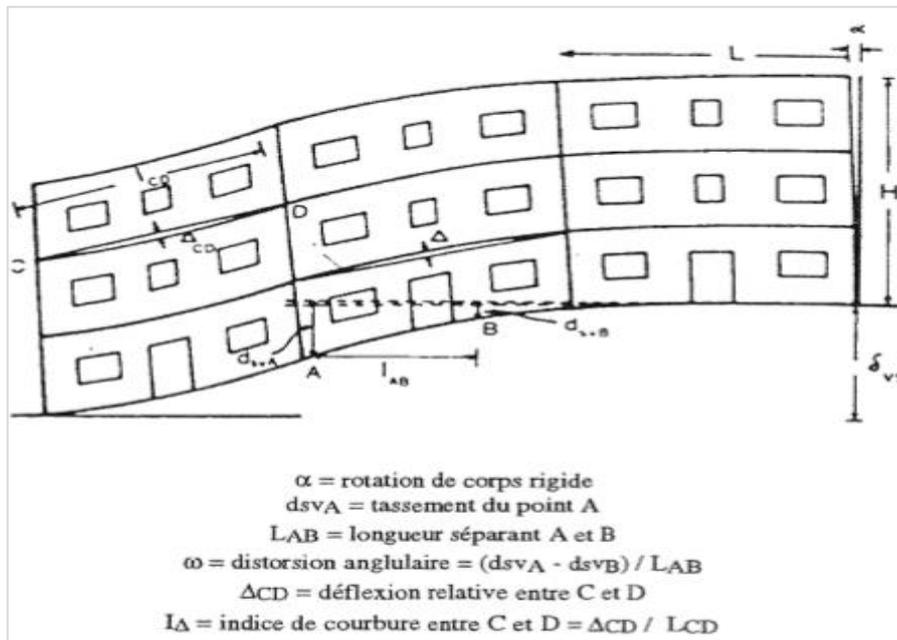
Cet état de contrainte peut être considérablement modifié lorsque le terrain subit des mouvements tels que le retrait-gonflement des sols ou *l'excavation d'un tunnel*.

Différents paramètres peuvent être utilisés pour évaluer les sollicitations subies par la structure, tels que (figure 2.7) :

- Le tassement uniforme ou le soulèvement uniforme.
- Le tassement différentiel, qui correspond à des déformations inégales sur différentes parties de la structure.
- Le déplacement horizontal global de la structure.
- La déflexion relative entre deux points de la structure.
- La rotation globale ou l'inclinaison de la structure.
- La distorsion angulaire de la structure.
- L'indice de courbure de la structure.

L'analyse de ces paramètres permet de quantifier les sollicitations et les déformations auxquelles la structure est soumise, ce qui est essentiel pour assurer sa stabilité et sa durabilité.

L'observation des dommages montre qu'ils sont essentiellement liés à la combinaison de la distorsion angulaire (proportionnelle à la pente de la cuvette de tassement) et à la déformation horizontale (qui peut endommager des constructions qui ne sont pas latéralement liées ensemble ou des réseaux enterrés) (Abderrahmane & Bensaleh, 2016).



**Figure 2.7** Paramètres caractéristiques des mouvements subis par la structure (Bloodworth, 2002)

## 2.8 INTERACTION CONSTRUCTIONS SOUTERRAINES – STRUCTURES

Un des aspects importants de tous les projets de Génie civil entre les différentes constructions (que ce soit, dans les fondations des bâtiments, des ouvrages d'art, des soutènements ou des tunnels), les interactions entre ces différents types d'ouvrages et les terrains environnants.

Cette interaction est complexe, notamment dans le cas des ouvrages souterrains, car le comportement du massif environnant joue un rôle clé où il entoure tout l'ouvrage. Elle dépend de la rigidité du sol, du soutènement et des structures avoisinantes.

On distingue quatre modes d'interaction selon (Bourgeois, 2006) :

1. Les effets des mouvements du sol sur le comportement des structures : les mouvements du sol, tels que les tassements différentiels ou les mouvements sismiques, peuvent avoir un impact sur la stabilité et le comportement des structures.
2. L'action des structures sur le sol environnant : les charges exercées par les structures peuvent induire des contraintes et des déformations dans le sol environnant, ce qui peut influencer sa stabilité et son comportement.
3. L'interaction entre structures voisines par l'intermédiaire du sol : dans certains cas, des ouvrages souterrains tels que des tunnels peu profonds ou des intersections de galeries peuvent interagir les uns avec les autres à travers le sol, ce qui peut avoir des conséquences sur leur stabilité et leur intégrité.
4. L'effet du renforcement des sols : l'utilisation de techniques de renforcement du sol, telles que des pieux, des géo-synthétiques ou des ancrages, peut modifier les caractéristiques mécaniques du sol, ce qui peut avoir un impact sur l'interaction entre les ouvrages et le sol environnant.

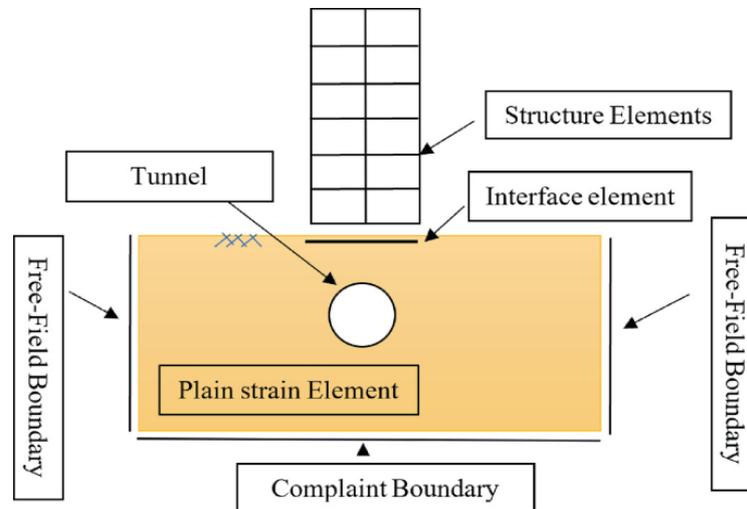
Il est essentiel de prendre en compte ces différents modes d'interaction lors de la conception et de la réalisation des ouvrages souterrains, afin de garantir leur stabilité, leur durabilité et leur intégrité structurelle (Moureh, 1998).

### **2.8.1 Interaction tunnel-structure**

Lors du creusement d'un tunnel dans un sol meuble, des mouvements se produisent inévitablement dans le massif environnant, à la fois verticalement et latéralement, ce qui peut avoir un impact sur les structures existantes (figure 2.8).

Dans de telles situations, les ingénieurs sont confrontés à un défi délicat : assurer la stabilité du sol et des ouvrages environnants et l'ouvrage lui-même. Ce défi est lié à deux facteurs tels que : la nature hétérogène et meuble des sols rencontrés en milieu urbain,

ainsi que la faible profondeur de ces tunnels, ce qui entraîne une interaction importante entre les travaux de creusement et les ouvrages existants (Zaid Al Farhan et al, 2022).



**Figure 2.8** Interaction tunnel structure (Zaid Al Farhan et al., 2022)

### 2.8.2 Interaction creusement-structure en surface

L'interaction du creusement de tunnels avec des structures en surface pose des problèmes majeurs en site urbain, car cette interaction peut être à l'origine d'importants dommages au niveau des structures.

Une structure peut être soumise à des efforts variés et complexes en fonction de sa position sur la cuvette des tassements.

L'AFTES (1995) précise qu'une évaluation acceptable en première analyse consiste à calculer les déformations et les efforts du bâti en imposant sur ses fondations les mouvements du terrain induits par le creusement dans le massif en négligeant la présence de la structure.

L'interaction dépend sensiblement de la localisation du bâti en surface dans le plan transversal au creusement (Liu, 1997).

Il est impératif de rester critique et vigilant sur les résultats obtenus, en raison de la difficulté de mesurer cette extension, et qu'une analyse à posteriori des résultats des observations sur site reste indispensable (AFTES, 1995).

AFTES (1995) donne des recommandations en forme de classifications des différents dommages des constructions selon le pourcentage de déformations (Tableau 2.2).

**Tableau 2.2** Classification des dommages aux constructions courantes (AFTES 1995)

$\varepsilon_{crit}(\%)$	Classe de dommages	Degré de dommage	Description
$\varepsilon_{crit} \leq 0,5$	0	Négligeable	Microfissures
$0,5 \leq \varepsilon_{crit} \leq 0,75$	1	Très léger	Esthétiques
$0,75 \leq \varepsilon_{crit} \leq 1,5$	2	Léger	Esthétiques à traiter
$1,5 \leq \varepsilon_{crit} \leq 3$	3	Modéré	Fonctionnels
$3 < \varepsilon_{crit}$	4 et 5	Sérieux	Structurels

### 2.8.3 Interaction sol-pieu-tunnel

Alors que les tunnels sont utilisés dans de nombreuses zones urbaines, l'évolution de la ville en général exigent des fondations profondes pour la construction d'immeubles de grande hauteur. Cela conduit à une interaction évidente entre les tunnels et ce type de fondations.

Lorsqu'un creusement est effectué à proximité de fondations profondes, cela peut entraîner une réduction du sol autour des fondations, ce qui peut compromettre leur stabilité.

Les risques potentiels incluent le tassement excessif des fondations, le renversement des pieux, ou même l'effondrement des tranchées de creusement sur les fondations.

La plupart des études de cas ont montré des dégâts limités sur les structures supportées par des fondations profondes. Cependant, ces constructions portent une grande incertitude qui fait que le mécanisme de l'interaction tunnel- fondations profondes ne soit pas complètement compris (Dias & Bezuijen, 2014).

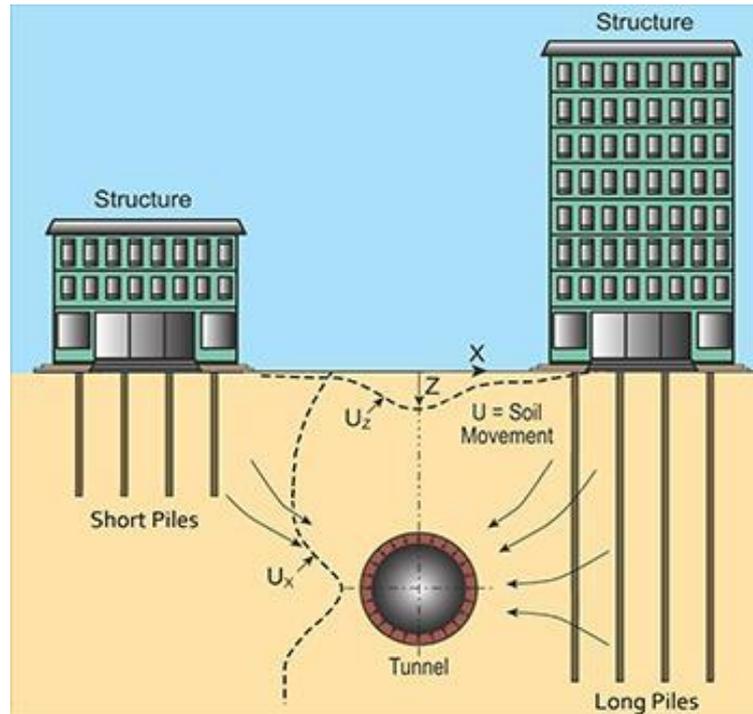
En outre, les contraintes autour des pieux sont généralement plus importantes que celles des fondations superficielles.

Plusieurs auteurs ont étudié les effets de tunnel sur les déformations du sol et du pieu en effectuant des essais sur modèle de centrifugeuse, des expérimentations en laboratoire et des modélisations numériques pour estimer les mouvements de sol qui en résultent et décrire les modifications engendrées (figure 2.9).

La majorité de ces études ont adopté une série de modèles en déformations planes dans des couches d'argile et de sable.

Ces mouvements peuvent entraîner des déformations et des charges supplémentaires aux pieux.

La précision anticipée de ces mouvements ainsi que l'évaluation des forces axiales et des déformations additionnelles induites au sein de ces pieux préexistants à cause de l'excavation deviennent des aspects essentiels de l'interaction tunnel-pieu. Ceci constitue un défi majeur dans le domaine de la conception et de la construction en génie civil, avec une attention particulière portée à cette prédiction.



**Figure 2.9** Interaction du milieu urbain (Alec et al, 2020)

## 2.9 CONCLUSION

L'interaction creusement-fondation profonde est un domaine complexe de l'ingénierie civile qui nécessite une planification minutieuse, des mesures de sécurité adéquates et une surveillance constante pour garantir la stabilité des fondations existantes lors de travaux de creusement à proximité.

Dans ce chapitre on a présenté une synthèse sur les fondations plus précisément les pieux suivie d'une revue sur l'interaction du sol avec les différentes structures qui est un phénomène très important à considérer.

Afin de compléter cette partie bibliographique, le chapitre suivant sera basé sur une série de modélisations numériques en utilisant le code de calcul éléments finis Plaxis 2D pour

traiter l'influence du creusement des tunnels sur les fondations profondes -Cas d'un pieu isolée et un groupe de pieux.

## Chapitre 3

# ***Réponses des pieux au creusement des tunnels***

## **3.1 INTRODUCTION**

Dans les chapitres précédents, nous avons étalé des études bibliographiques sur le creusement des tunnels et sur les fondations pour mieux comprendre ces phénomènes.

Ce chapitre vise à compléter ces synthèses en se concentrant sur l'application de ces connaissances à l'analyse de l'impact du creusement des tunnels sur un pieu, ensuite sur un groupe de pieux.

Le modèle choisi est celui de Chen et al. traité en 1999 et depuis développé par d'autres auteurs.

Les cas suivants ont été traités et seront comparés entre eux ainsi qu'avec les résultats de l'étude de Chen et al, (1999) :

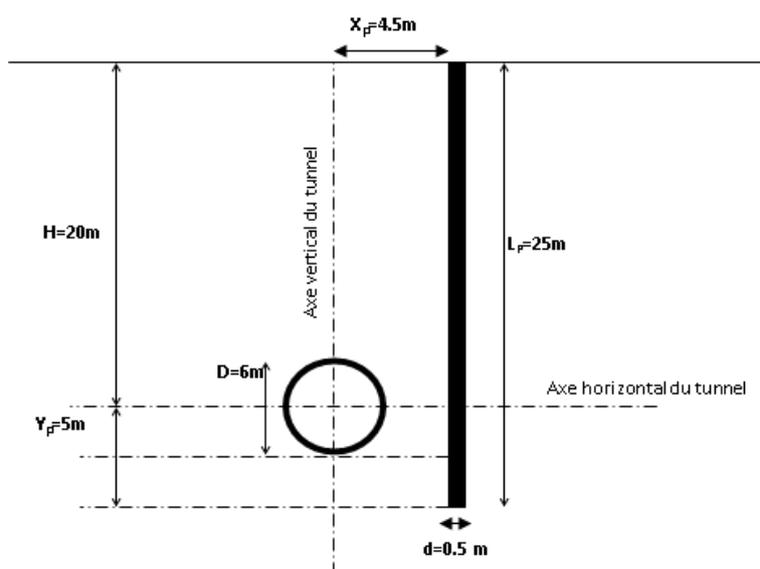
1. Cas de l'interaction tunnel seul- pieu isolé.
2. Cas de l'interaction tunnel seul- groupe de pieux.
3. Cas de l'interaction tunnel jumeaux- pieu isolé.
4. Cas de l'interaction tunnel jumeaux- groupe de pieux.

Les résultats trouvés seront analysés et discutés au fur et à mesure de l'avancement du chapitre.

### 3.2 PRÉSENTATION DU MODELE D'ETUDE

Nous avons adopté un modèle de base et nous lui avons apporté des modifications. Le modèle est celui d'un certain auteur appelé Chen, il l'a traité en 1999 avec des co-auteurs, il s'agit de l'étude de l'interaction entre un tunnel creusé dans un sol argileux homogène (modélisé en utilisant le critère de Mohr-Coulomb) et un pieu isolé de diamètre 50cm et de longueur de 25m. Le tunnel est de forme circulaire de diamètre 6m creusé à une profondeur de 20m. Les données du modèle sont figurées sur la figure (3.1).

Et depuis ce jour, ce même modèle a été réutilisé et modifié pour faire des dizaines d'études très bénéfiques pour ce type de phénomènes.



**Figure 3.1** Modèle de référence Chen et al. (1999)

Toutes les simulations sont faites par le code de calcul éléments finis Plaxis 2D.

#### 3.2.1 Propriétés du terrain

Les propriétés géotechnique et physique du terrain sont regroupées sur le tableau (3.1) :

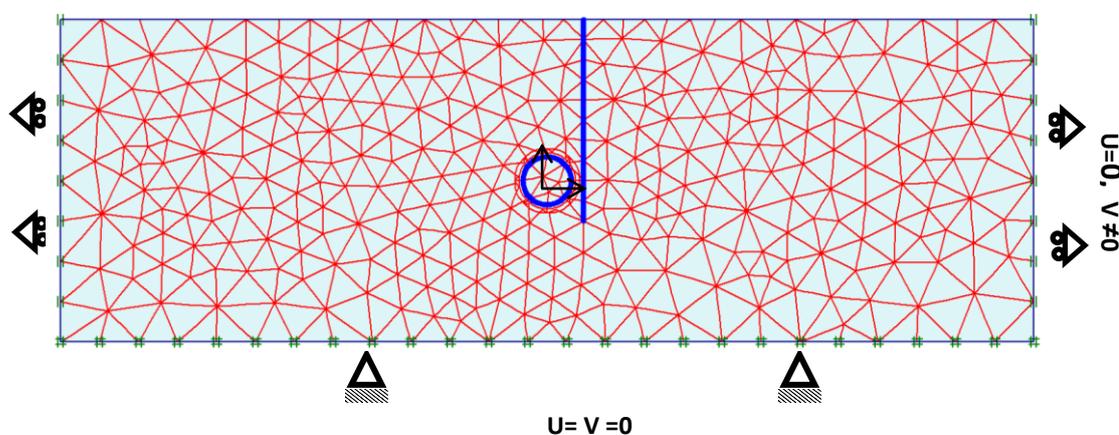
**Tableau 3.1** Paramètres physique et mécanique du sol (Chen et al. 1999)

Paramètres du modèle	Terrain
Modèle	Mohr-Coulomb
Poids volumique humide (KN/m <sup>3</sup> )	18
Module d'élasticité longitudinal (KN/m <sup>2</sup> )	24000
Coefficient de poisson	0.35
Cohésion (KN/m <sup>2</sup> )	10
Angle de frottement (degrés)	25

Nous avons adopté un soutènement avec une épaisseur de 35cm en béton armé, dont les rigidités normale et flexionnelle sont égales respectivement à  $EA=1,4.10^7$  KN/ml et  $EI=1,43.10^5$  kN.m<sup>2</sup>/ml.

### 3.2.2 Simulation éléments finis

Le code de calcul éléments finis Plaxis 2D a été utilisé pour modéliser le cas d'étude. La taille et les conditions aux limites sont présentées sur la figure (3.2), le maillage retenu se compose de 647 éléments triangulaires de 15 nœuds et 5359 nœuds.

**Figure 3.2** Modèle éléments finis : Tunnel seul- Pieu isolé

### 3.3 ANALYSES EF ET INTERPRETATIONS - CAS D'UN SEUL TUNNEL

Dans cette partie, nous avons traité le premier cas, il s'agit de l'interaction d'un seul tunnel avec un pieu isolé.

1. Nous débuterons en premier lieu, par la présentation des déplacements latéraux et verticaux du terrain sans la présence du pieu (situation appelée free-field),
2. Ensuite, nous exposerons la réponse du pieu isolé au creusement de ce tunnel : Les résultats seront en termes de déplacements latéral et axial, moments fléchissant et effort axial causé au pieu suite à la construction du tunnel isolé.

Une étude paramétrique se suivra, il s'agit d'analyser l'interaction :

1. Tunnel seul- groupe de pieux de (2x2)
2. Tunnel seul- groupe de pieux de (3x2)

### **3.3.1 Réponse du terrain au creusement de tunnel seul sans la présence du pieu**

Dans ce cas, nous avons analysé la réaction du sol au creusement d'un seul tunnel en cas d'absence du pieu.

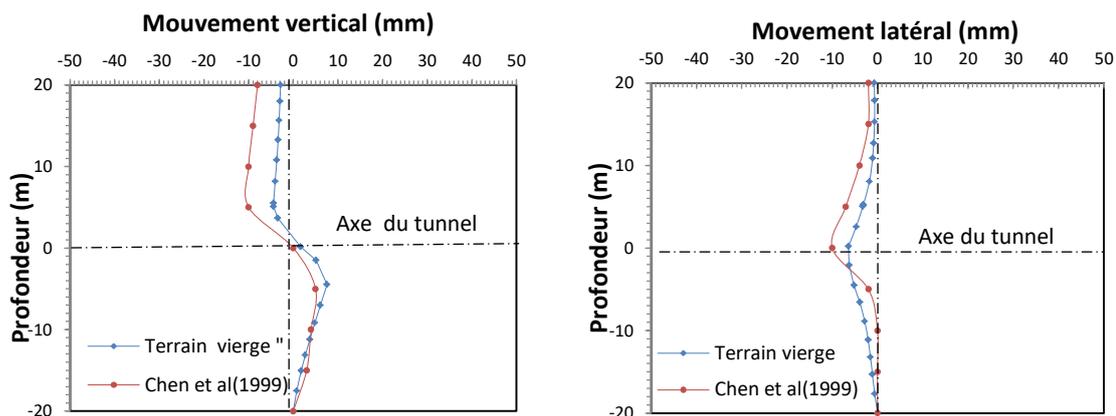
Nous présenterons la répartition des déplacements verticaux et latéraux à une distance  $x_p$  de 4,5m. Les résultats seront comparés avec ceux de Chen et al. (1999) (figure 3.3).

Nous remarquons à travers la figure (3.3) que les profils des courbes s'apparentent avec une différence entre les valeurs.

Les déplacements verticaux augmentent avec la profondeur, ils s'annulent à l'axe du tunnel. Ils augmentent de nouveau et chutent à partir du radier (le sol n'est plus perturbé par le creusement du tunnel).

Nous soulignons qu'au-dessus de la clé du tunnel, il y a un mouvement vertical élevé qui correspond à la zone d'influence.

Les déplacements horizontaux sont insignifiants à partir de la surface, mais augmentent progressivement en se rapprochant de la clé du tunnel. Ils atteignent une valeur maximale au niveau du centre du tunnel avant de s'annuler progressivement.



**Figure 3.3** Mouvements verticaux et latéraux (terrain vierge)

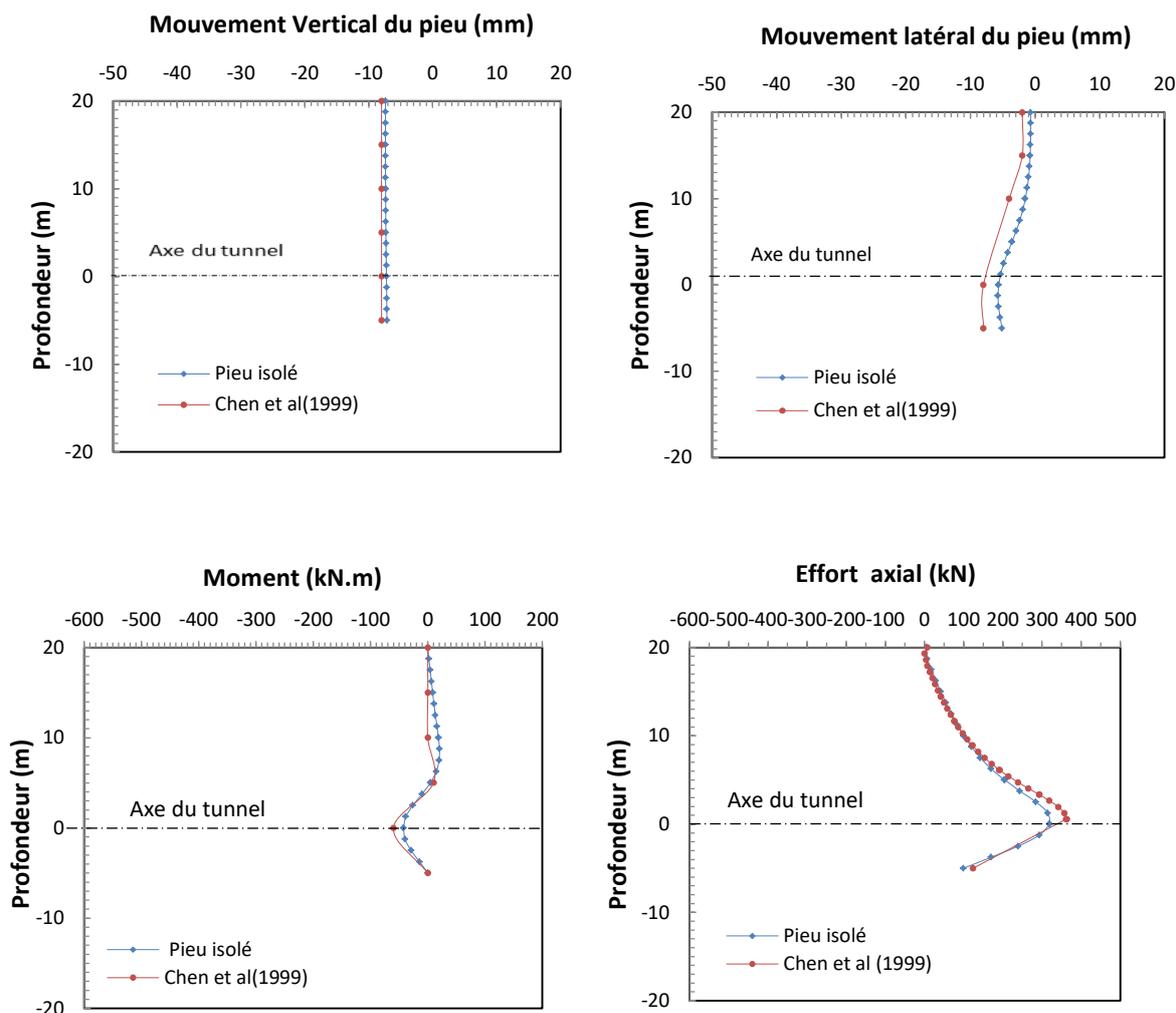
Il est à noter aussi que les mouvements obtenus grâce au code de calcul EF Plaxis 2D présentent une excellente concordance avec les résultats de Chen et al., (1999).

### 3.3.2 Interaction tunnel seul-Pieu isolé

En complément au cas précédent, dans cette section, le but était d'étudier les réponses verticales et latérales du pieu situé à 4,5m de l'axe vertical du tunnel (Voir figure 3.1) et d'estimer les moments fléchissant et les efforts axiaux qu'a subit ce pieu suite à l'effet du creusement du tunnel.

L'ensemble des mouvements verticaux, latéraux, les moments fléchissant et les efforts axiaux du pieu causé par le creusement du tunnel sont exposés sur la figure (3.4) et sont comparés aux résultats de l'étude de Chen et al., (1999) :

Tous les profils de courbes obtenus apparaissent uniformes et présentent une excellente concordance avec les résultats de Chen et al., (1999). Excepté les déplacements latéraux où il y a une certaine différence lisible. Ils augmentent progressivement jusqu'à atteindre le centre du tunnel pour atteindre un déplacement latéral maximal de l'ordre de 6mm et environ 8mm pour notre étude et celle de Chen respectivement.



**Figure 3.4** Réponses du pieu isolé au creusement d'un seul tunnel

Quant aux moments fléchissant et efforts axiaux, nous avons remarqué que les profils dans notre étude et celle de Chen s'apparentent parfaitement et augmentent avec la profondeur pour atteindre le maximum à l'axe horizontal du tunnel à la profondeur 20m.

Les différentes courbes trouvées correspondent parfaitement aux profils cités dans la littérature et concordent parfaitement.

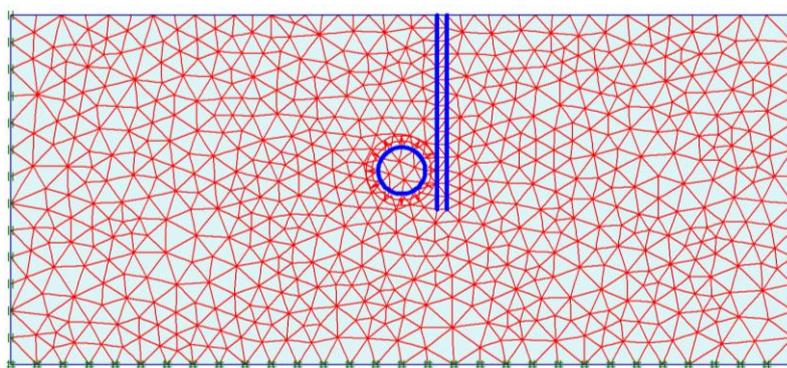
### 3.3.3 Interaction tunnel seul- groupe de pieux (2x2)

Dans le même enchainement, cette partie est consacrée à l'analyse de l'ensemble des mouvements verticaux, latéraux, les moments fléchissant et les efforts axiaux mais pour un cas de l'interaction du tunnel seul avec un groupe de pieux de (2x2) espacés de 1,25m (figure 3.5).

Nous avons voulu voir l'influence du creusement du tunnel sur un groupe de pieux et la différence avec un pieu isolé.

Nos résultats concernent le pieu devant (appelé pieu 1) et celui d'arrière (appelé pieu 2).

Le modèle éléments finis retenu est présenté sur la figure (3.5), le modèle comprend 1354 éléments triangulaires de 15 nœuds et 11077 nœuds. Les mêmes conditions aux limites ont été utilisées.



**Figure 3.5** Modèle éléments finis-Tunnel seul- groupe de pieux (2x2)

La figure (3.6) illustre les réponses des deux pieux à la distance de  $x_p=4,5\text{m}$  (emplacement du pieu devant) et  $x_p=5,75\text{m}$  (emplacement du pieu arrière).

A travers cette figure, nous notons que les trois courbes (pieu isolé, pieu 1 et pieu 2) ont le même profil: le pieu isolé est en parfait accord avec le pieu 1 dans le groupe (2x2) et répond de la même manière.

Concernant les moments fléchissant, aucune différence entre les résultats n'est obtenue.

Ce qui nous permet de conclure que l'étude d'un pieu isolé peut être avantageuse et donner des résultats intéressants sans avoir recours aux études d'un groupe de pieux qui sont plus fastidieuses.

Quant aux forces axiales, nous pouvons conclure que le pieu arrière (pieu 2) est le moins sollicité par les travaux d'excavation vu son emplacement assez loin (1D environ).

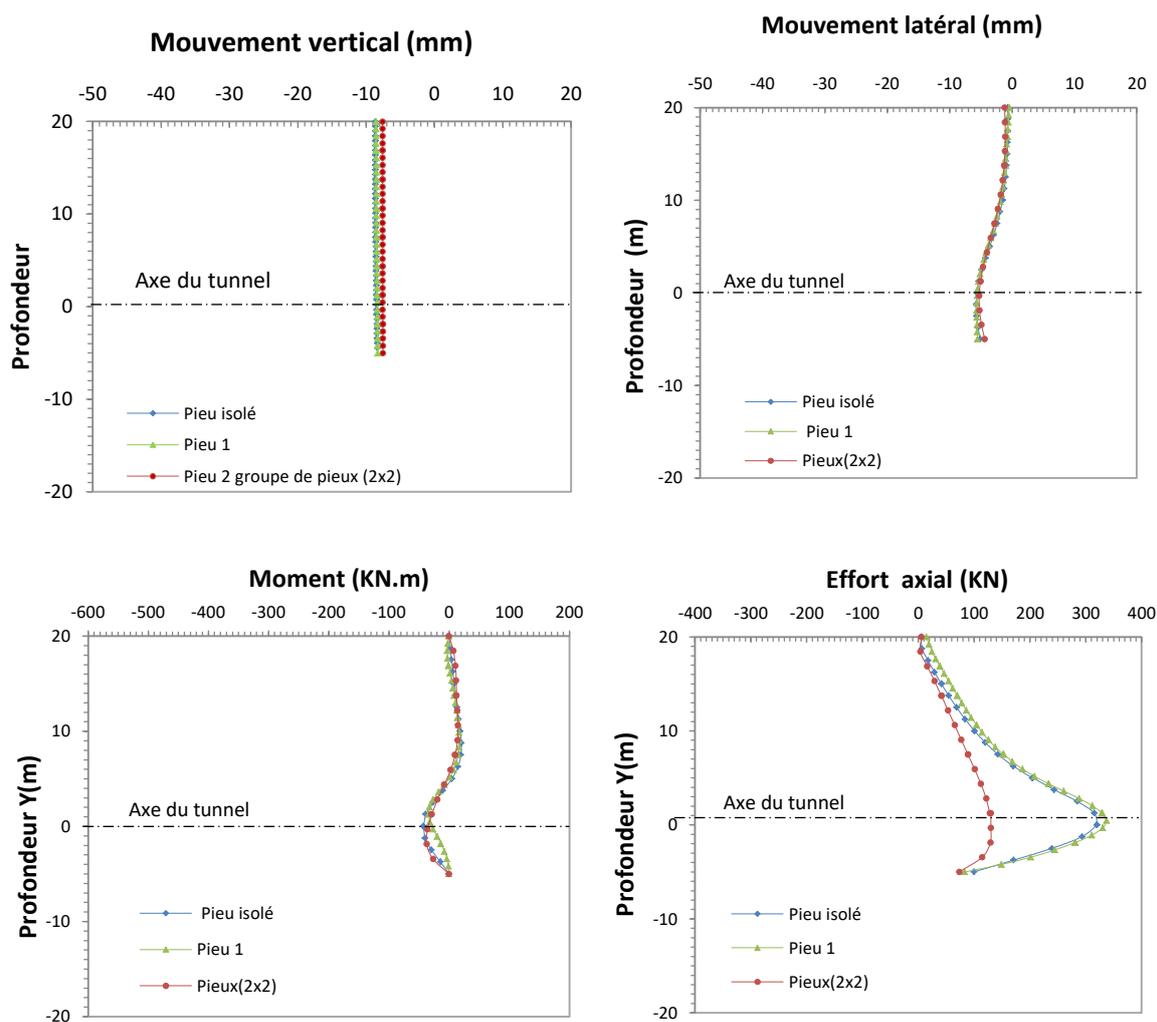


Figure 3.6 Réponses du groupe de pieux (2x2) au creusement d'un seul tunnel

### 3.3.4 Interaction tunnel seul- groupe de pieux (3x2)

Les déplacements verticaux et latéraux, les moments fléchissant et les efforts axiaux qui résultent de l'interaction entre le tunnel seul et un groupe de pieux disposés en 3x2 sont analysés et présentés dans ce qui suit.

Le modèle comprend 716 éléments triangulaires de 15 nœuds et 5905 nœuds (figure 3.7).

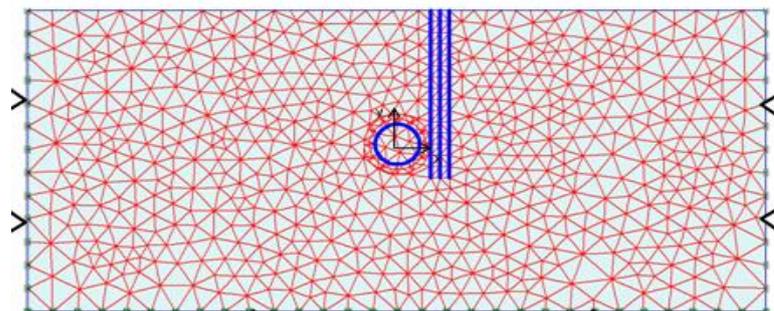


Figure 3.7 Modèle éléments finis- Tunnel seul- groupe de pieux (3x2)

La figure (3.8) illustre les comparaisons entre les réponses des trois pieux à la distance de  $x_p=4,5m$  (emplacement du pieu devant) et  $x_p=5,75m$  (emplacement du pieu intermédiaire) et  $x_p=7m$  (emplacement du pieu arrière).

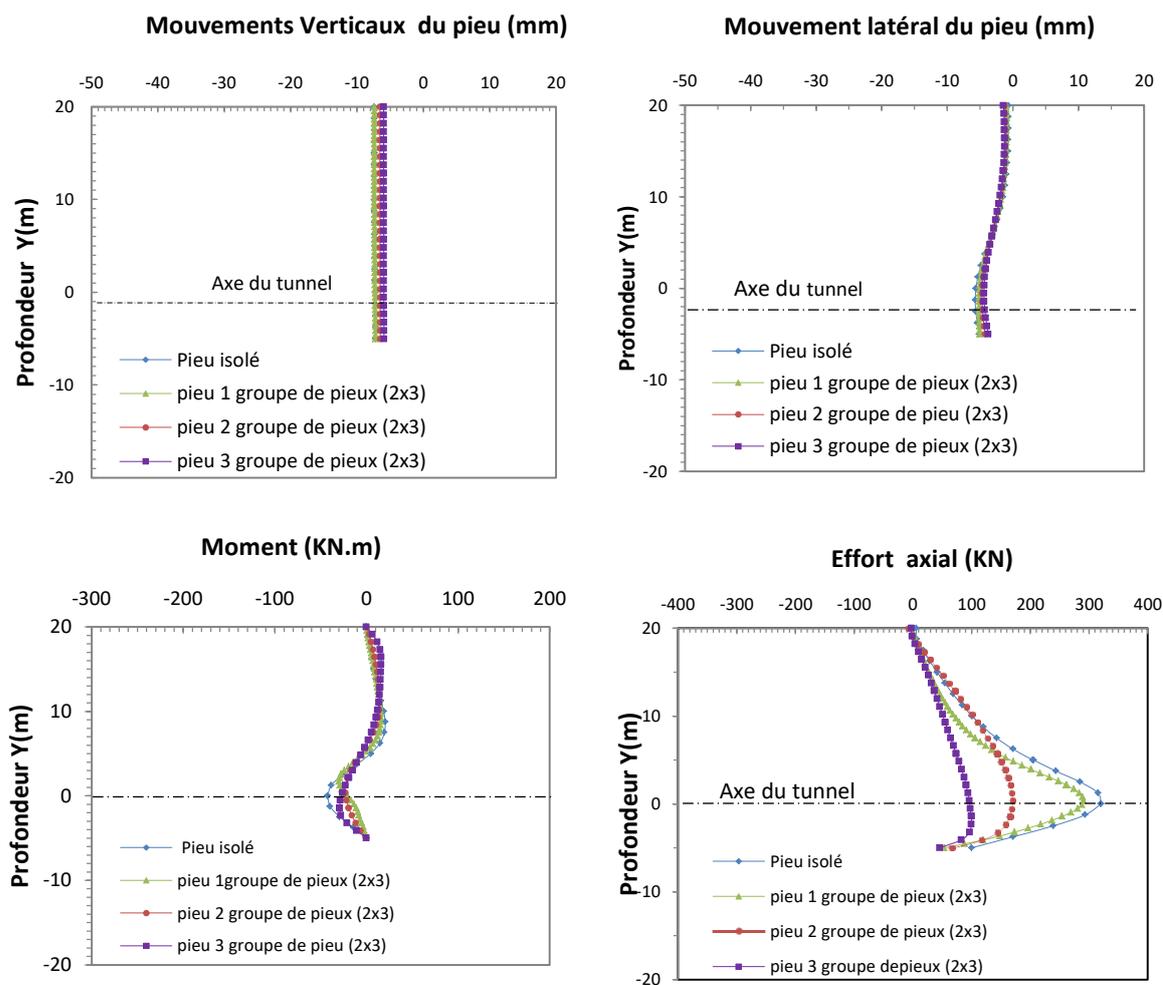


Figure 3.8 Réponses du groupe de pieux (3x2) au creusement d'un seul tunnel

Les mêmes constatations sont déduites pour les mouvements et le moment.

Aussi, il est à signaler qu'en s'éloignant des travaux du tunnel, les forces axiales appliquées au pieu diminuent.

Ce résultat pour le groupe de pieux (3x2) renforce nos conclusions citées plus haut : les analyses pour un pieu isolé sont largement suffisantes pour une première approximation excepté pour l'effort axial.

### 3.4 ANALYSES ET INTERPRETATIONS- CAS DE TUNNELS JUMEAUX

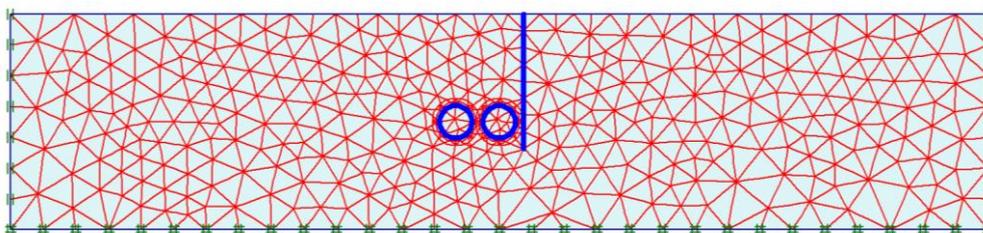
Les résultats obtenus dans cette partie d'étude sont en complément avec la partie précédente et concernent l'effet du creusement de tunnels jumeaux creusés parallèlement sur les réponses latérales et axiales du pieu isolé et du groupe de pieux traités préalablement.

Le but était de comparer l'influence du creusement de deux tunnels par rapport à un seul sur le comportement des pieux vu l'évolution de la construction des tunnels rapprochés (twin tunnels) dans le milieu urbain.

La même procédure sera utilisée.

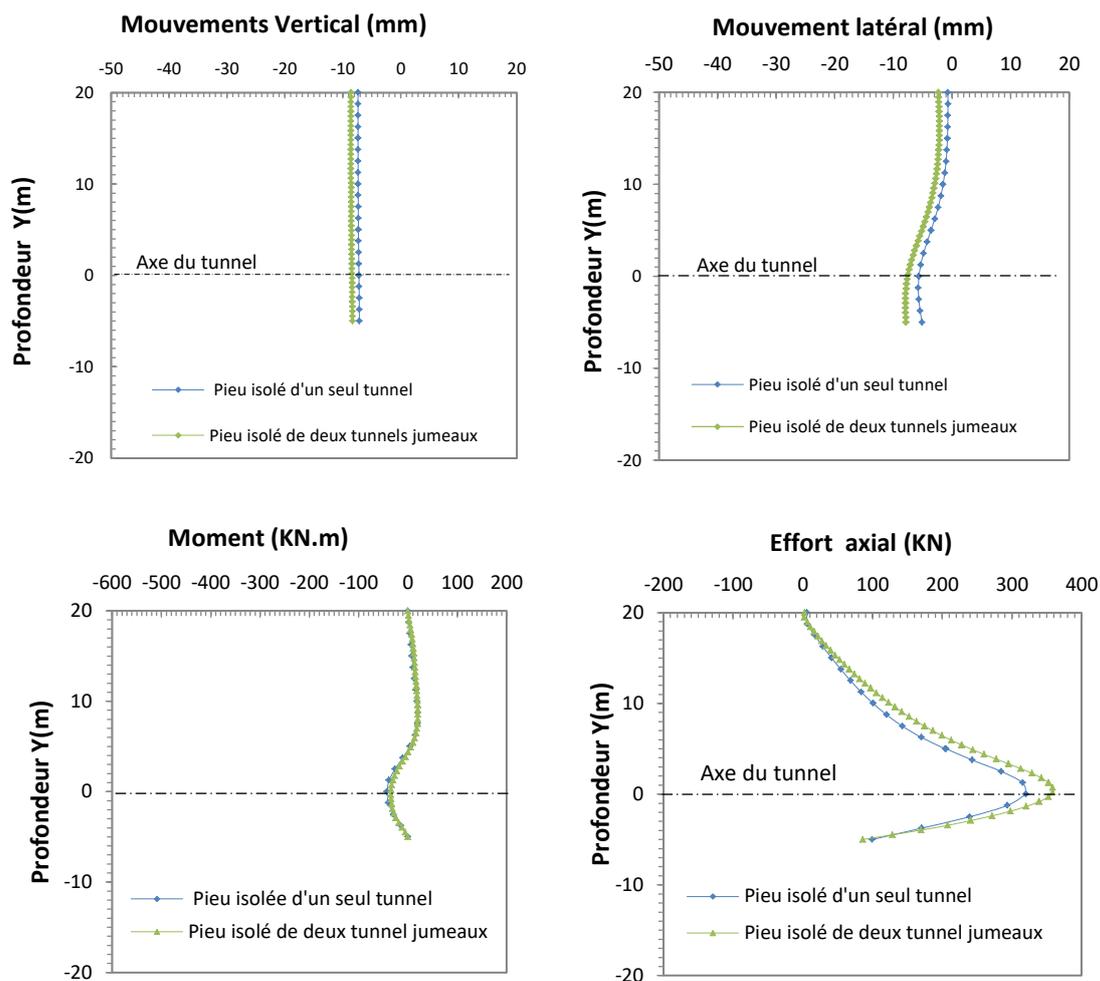
#### 3.4.1 Interaction tunnels jumeaux- pieu isolé

Le modèle comprend 176 éléments triangulaires de 15 nœuds et 1541 nœuds.



**Figure 3.9** Modèle éléments finis : Tunnel jumeaux- Pieu isolé

L'ensemble des mouvements verticaux, latéraux, les moments fléchissant et les efforts axiaux sont exposés sur la figure (3.10).



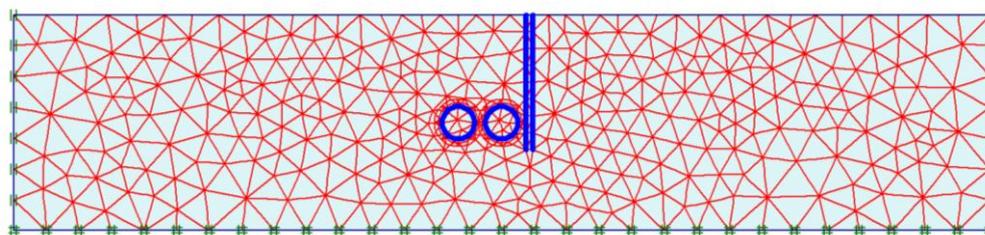
**Figure 3.10** Comparaison des réponses du pieu isolé au creusement de tunnels jumeaux et tunnel seul

Nous remarquons à travers la figure (3.10) que l'effet du creusement de deux tunnels est fortement similaire dans la forme des profils à celui d'un seul tunnel. Néanmoins, des différences légères d'environ 20% ont été obtenues.

Aussi, le creusement de tunnels jumeaux reste le plus influençant vu l'ampleur de l'excavation.

### 3.4.2 Interaction tunnels jumeaux- groupe de pieux (2X2)

Le modèle comprend 343 éléments triangulaires de 15 nœuds et 4116 nœuds.

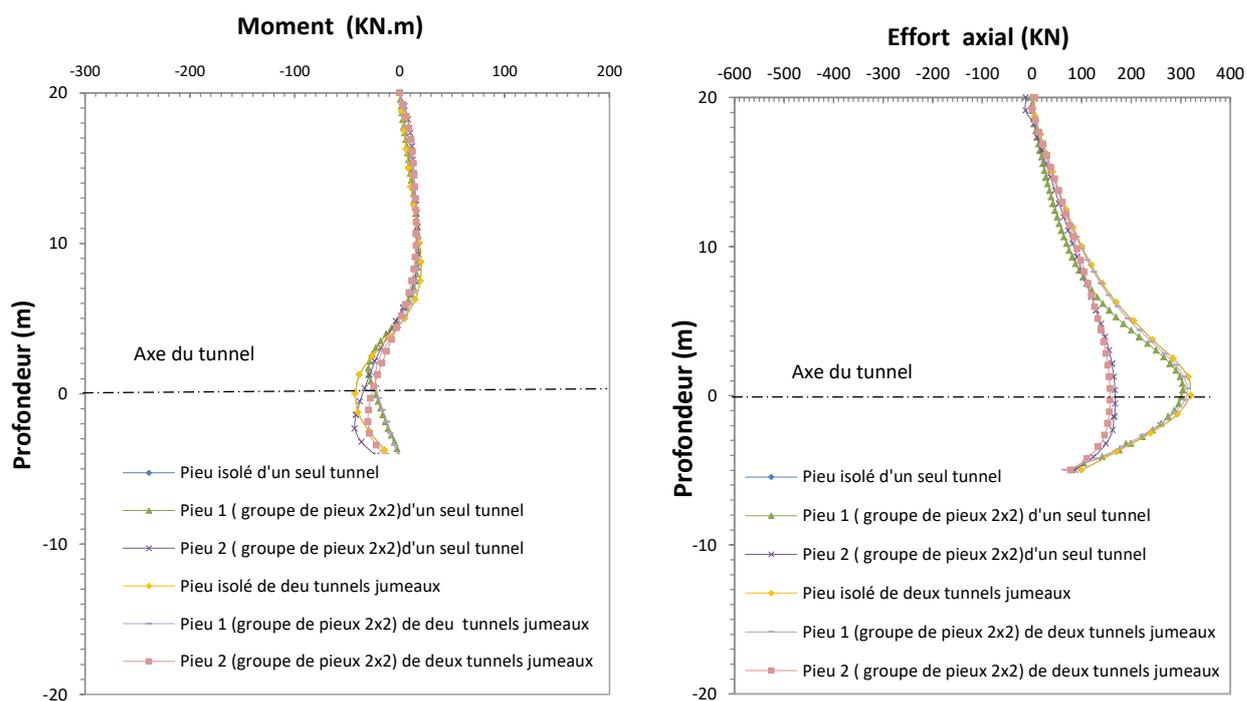


**Figure 3.11** Modèle éléments finis : Tunnel jumeaux- groupe de pieux 2x2

L'ensemble des moments fléchissant et les efforts axiaux sont exposés sur la figure (3.12).

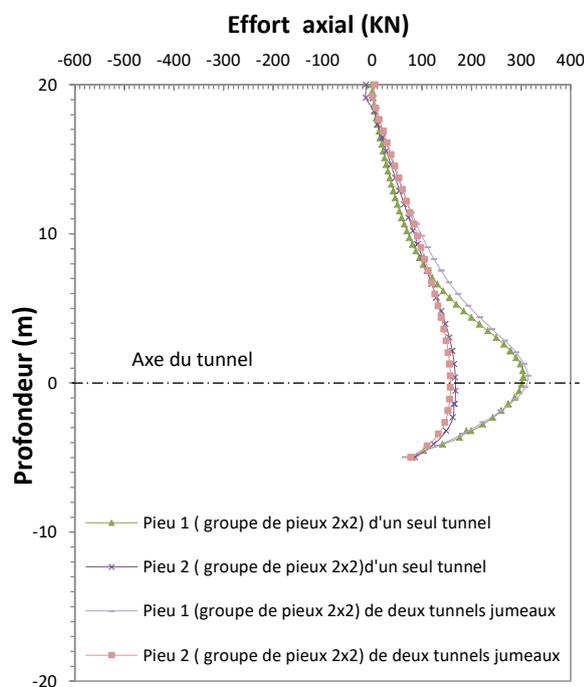
En analysant les courbes des moments, nous remarquons que les pieux subissent les mêmes moments avec des différences légères.

Notons aussi que ce sont les forces axiales qui présentent des différences.



**Figure 3.12** Comparaison des réponses du groupe de pieux (2x2) au creusement de deux tunnels jumeaux avec un seul tunnel

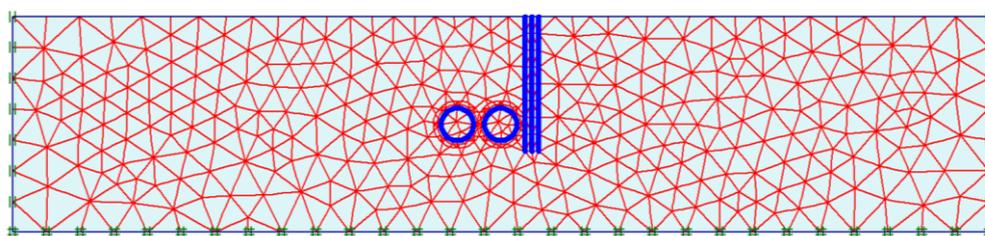
Afin d'alléger les courbes, nous avons groupé les courbes du pieu 1 avec celles du pieu 2 ensemble (Voir figure 3.13) : que ce soit pour un creusement d'un tunnel ou de tunnels jumeaux, c'est toujours le pieu le plus proche qui subit plus d'efforts axiaux.



**Figure 3.13** Comparaison de l'effort axial des pieux 1 et 2 au creusement de deux tunnels jumeaux avec un seul tunnel-groupe de pieux (2x2)

### 3.4.3 Interaction tunnels jumeaux- groupe de pieux (3X2)

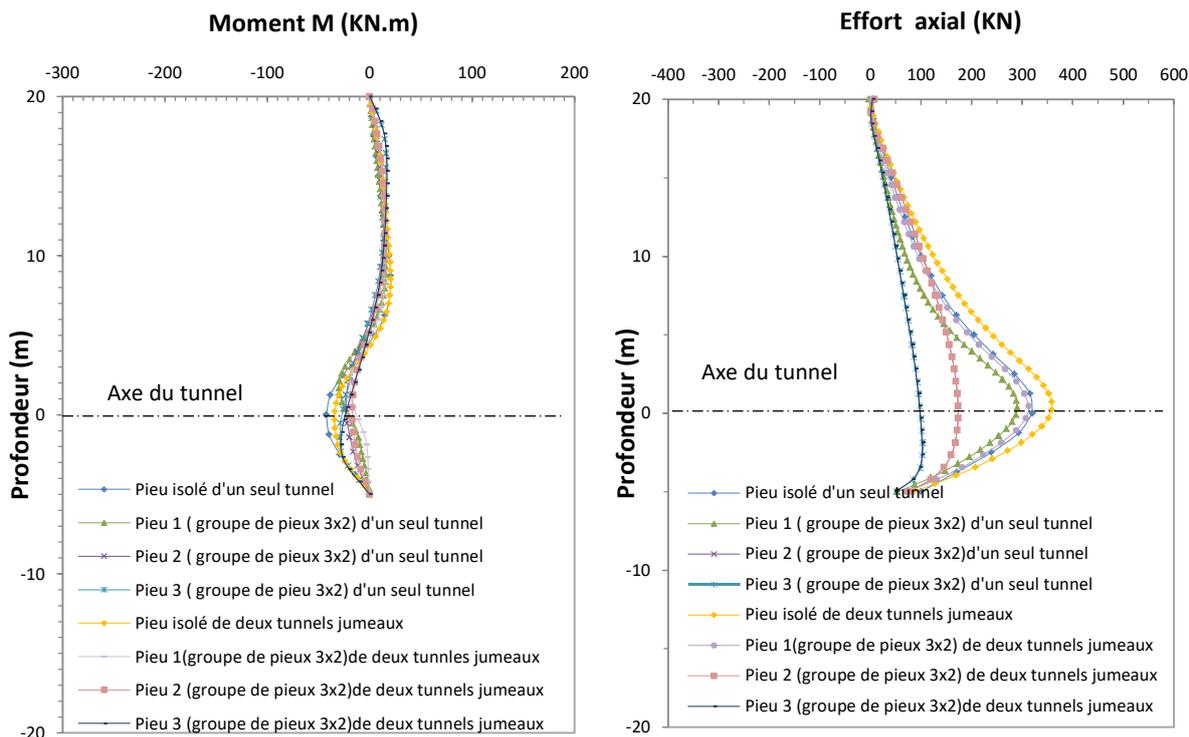
Le modèle comprend 707 éléments triangulaires de 15 nœuds et 5891 nœuds (figure 3.14).



**Figure 3.14** Modèle éléments finis : Tunnel jumeaux- groupe de pieux 3x2

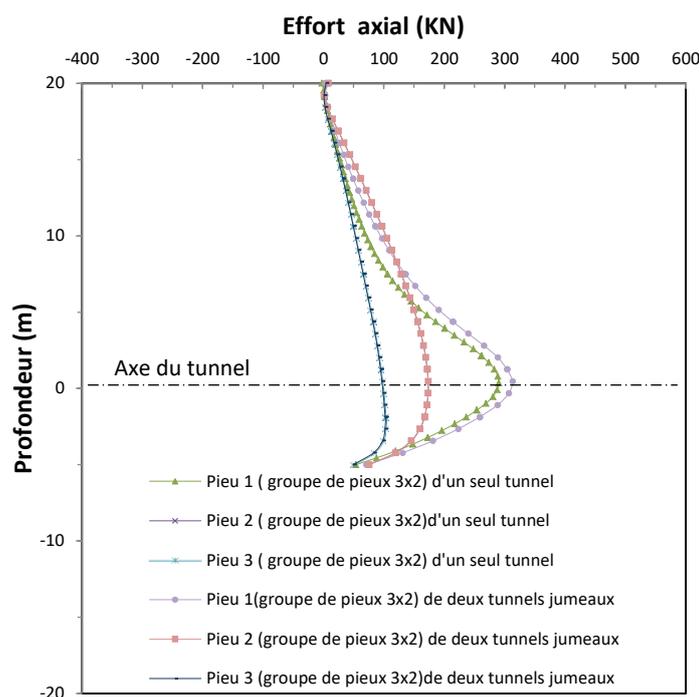
La figure (3.15) montre la comparaison des résultats en terme de moment et d'effort axial qui indique toujours des moments similaires et des forces axiales différentes.

En comparant les courbes d'effort axial des trois pieux et du troisième pieu, on observe des différences significatives : Le premier pieu subit une augmentation graduelle de l'effort axial avec la profondeur, atteignant le maximum à l'axe des tunnels. Néanmoins pour les autres courbes (pieux 2 et 3), elles tendent à devenir uniformes et moins courbées en s'éloignant de l'excavation : l'effet de la zone d'influence des tunnels se dissipe normalement à un diamètre en avant du front (AFTES, 2000).



**Figure 3.15** Comparaison des réponses du groupe de pieux (3x2) au creusement de deux tunnels jumeaux avec un seul tunnel

La figure (3.16) groupe les courbes du pieu 1 avec celles du pieu 2 et le pieu 3 ensemble: Il est clair à travers cette figure que le pieu le plus éloigné est le moins sollicité (conclusion déjà mentionné plus haut). Néanmoins, nous avons remarqué que les tunnels jumeaux ont plus d'effet qu'un seul tunnel sur le pieu lorsque ce dernier est plus près des excavations (pieu 1), mais pour les pieux 2 et 3 les tunnels jumeaux ont le même effet que le seul tunnel : nous précisons que le « pieu 2 » se trouve à une distance de  $1 \text{ Diamètre}$  du centre du tunnel : c'est la zone d'influence.



**Figure 3.16** Comparaison de l'effort axial des pieux 1, 2 et 3 au creusement de deux tunnels jumeaux et un seul tunnel- -groupe de pieux (2x3)

### 3.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le code de calcul Plaxis 2D pour réaliser une série de simulations numériques basées sur un modèle précédemment publié dans la littérature (Chen et al., 1999) et réutilisé depuis des années vue son succès.

Deux cas d'étude ont été présentés : il s'agit de prédire les mouvements engendrés par le creusement d'un seul tunnel ensuite de tunnels jumeaux creusés parallèlement.

Les réponses verticales, latérales, les moments fléchissant et les efforts axiaux ont été étudiés en utilisant trois configurations.

Dans le premier, il s'agit de prédire les mouvements engendrés par le creusement sur un pieu isolé, puis sur un groupe de pieux de (2x2) et à la fin sur un groupe de pieux de (3x2).

Notre objectif principal était d'évaluer l'incidence de l'excavation du tunnel sur ce groupe de pieux par rapport à un pieu isolé. Et de faire des comparaisons quant à l'influence du creusement de tunnels jumeaux par rapport à un seul tunnel.

Les résultats obtenus semblent être intéressants et peuvent être pris en considération :

1. Les résultats obtenus montraient l'efficacité absolue du logiciel Plaxis 2D et qu'il pouvait donner des résultats très convaincants en les comparant à d'autres trouvés dans la littérature.
2. Le pieu le plus proche de tunnel est le plus déformable dans le cas d'un seul tunnel ou de tunnels jumeaux.
3. Nous avons remarqué que les tunnels jumeaux ont plus d'effet qu'un seul tunnel sur le pieu lorsque ce dernier est plus près des excavations, mais à partir du « pieu 2 » (placé à environ 1 diamètre du centre du tunnel), les tunnels jumeaux ont le même effet que le seul tunnel : c'est l'effet la *zone d'influence*.
4. Ces analyses nous ont permis de conclure que l'étude d'un pieu isolé peut être avantageuse et donner des résultats intéressants sans avoir recours aux études d'un groupe de pieux qui sont plus fastidieuses excepté pour l'effort axial où des études plus prononcées devraient être lancées.
5. Aussi, il est à signaler qu'en s'éloignant du tunnel, les forces axiales appliquées au pieu diminuent. Ceci n'est pas valable aux moments ou aux différents mouvements vertical et latéral.

## CONCLUSION GENERALE

Notre pays connaît un essor assez évolué dans le contexte des travaux souterrains, d'où un intérêt majeur doit être porté aux études menées sur cette thématique.

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'interaction entre le creusement des tunnels et les pieux. L'étude a comporté une partie bibliographique et une autre numérique en utilisant le code de calcul éléments finis Plaxis 2D.

Nous avons analysé les mouvements verticaux et latéraux du sol et des pieux, ainsi que les moments fléchissant et les efforts axiaux causés aux pieux.

Deux parties ont spécifié ce travail de mémoire : la première partie se focalisée sur l'analyse de l'effet d'un seul tunnel sur la réaction d'un pieu isolé en premier et sur un groupe de pieux ensuite. Dans la deuxième partie, il s'agissait de prédire l'effet du creusement de tunnels jumeaux sur successivement un pieu isolé et sur un groupe de pieux. Le but était de comparer nos résultats. Nous avons également effectué une comparaison avec le modèle de base proposé par Chen et al. (1999).

Les résultats étaient satisfaisants et pouvaient être pris en considération pour des études ultérieures :

L'étude a montré que les analyses sur un pieu isolé peuvent être concluantes et suffisantes pour prédire correctement les mouvements subits par le pieu sans avoir recours aux simulations d'un groupe de pieux qui restent fastidieuses sauf pour les efforts axiaux qui pouvaient varier largement.

Il est important de noter que les mouvements mesurés sont de l'ordre de quelques millimètres, ce qui indique une réponse relativement faible du sol aux charges. Cela peut être attribué à des conditions de sol favorables et à la conception appropriée des pieux.

Il a été montré aussi que Les mouvements horizontaux augmentent progressivement à mesure que la profondeur augmente jusqu'à atteindre une valeur majeure à l'axe du tunnel. Les mouvements sont négatifs, ce qui indique une déformation vers la gauche par rapport à la position initiale

Les tunnels jumeaux ont plus d'effet qu'un seul tunnel sur le pieu lorsque ce dernier est plus près des excavations, mais à partir d'un diamètre (emplacement du pieu 2), les tunnels jumeaux ont le même effet que le tunnel seul : c'est l'effet de la zone d'influence.

Aussi, il est à signaler qu'en s'éloignant du tunnel, les forces axiales appliquées au pieu diminuent et deviennent uniformes. Ceci n'est pas valable aux moments ou aux différents mouvements vertical et latéral qui restent similaires

Un dernier résultat sur les moments fléchissant obtenus et qui nous paraît très intéressant montrait que les pieux sont soumis à des moments fléchissant négatifs au niveau du tunnel qui débutent à partir de sa clé. Ces informations nous paraissent très essentielles pour évaluer la capacité de résistance et la stabilité des pieux mais nous n'avons pas pu malheureusement les expliquer....

Enfin, cette étude souligne l'importance de prendre en compte l'interaction entre les tunnels et les pieux lors des phases d'analyses et d'études. Nous espérons que ces résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour évaluer les déformations des pieux dans des situations réelles et contribuent à une meilleure compréhension du comportement du sol et des pieux lors de la construction de tunnels.

A la fin, nous proposons comme perspectives à ce mémoire :

1. Etudier l'effet des tunnels jumeaux mais creusés verticalement.
2. Etudier l'effet du creusement sous des piles de pont.

## Bibliographie

1. **Abderrahmane A., Bensalah A. (2016).** Influence du creusement d'un tunnel sur le comportement du sol sous les fondations d'une construction en surface. Mémoire de Master en Génie Civil . Université de Tlemcen.
2. **Abdi B. et Berrabah I. (2022).** Analyse numérique de l'interaction entre deux tunnels dans un milieu urbain. Mémoire de Master en Génie Civil . Université de Tlemcen.
3. **AFTES. (1995).** Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain .Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains,vol.132,pp.373-395.
4. **Agence Qualité (2019).** Désordres des fondations profondes par pieux,France Paris.
5. **Alec et al., (2020).** A Review on Tunnel–Pile Interaction Applied by Physical Modeling,38, pages 3341–3362.
6. **Bakour et Azzedine (2008).** Comportement aspects Structuraux et Géotechnique. Ecole de Technologie Supérieure université de Québec Montréal 2008 .
7. **Bakri B. (2016).** Développement d'un modèle analytique d'interaction sol-structure pour l'étude du comportement mécanique des structures soumises à un mouvement de terrain : influence des déformations de cisaillement et de la plasticité.Thèse de doctorat université de LORRA.
8. **Basile, F. (2014).** Effects of tunnelling on pile foundations. Soils Found. 54 (3), 280–295.
9. **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.
10. **Benchida A., Bekhti N. (2022).** Pré-dimensionnement et modélisation des fondations profondes d'un ouvrage d'art application à GHAZAOUET-TLEMEN. Mémoire de Master en Génie Civil . Université de Tlemcen.
11. **Benhammou F., Zirar A. (2019).** Simulation numérique de l'influence du creusement des ouvrages souterrains en milieu urbain. Mémoire de Master en Génie Civil. Université de Tlemcen.
12. **Berredane A., El Houari N., Hamzaoui F. (2023).** Simulation numériques de deux tunnels-structure en surface. The Third National Conference On Applied Physics And Chemistry Ensl Laghouat. 12, 13 march 2023. NCAPC23

- 13. Bloodworth A. G. (2002).** Three-dimensional analysis of tunnelling effects on structures to develop design methods: Thèse de doctorat : Université d'Oxford, Grande Bretagne.
- 14. Bourgeois E. (2006).** Procédures automatiques de calcul de charges limites et de facteurs de sécurité par éléments finis, ELU-ULS 2006, 233-240.
- 15. Bruno et Yvan. (2017).** Les guides de la MAÇONNERIE ,2017.
- 16. Bouzourine. A et Ait Saadi M. (2021).** Calcul et modélisation du tunnel Ramdhane-Linge SNTF Affroun-Khemis. Mémoire de Master, Université Saad Dahleb. Algérie
- 17. Chehade F. et Shahrour I. (2008).** Numerical Analysis of the Interaction between Twin-Tunnels: Influence of the Relative Position and Construction Procedure. Tunneling and Underground Space Technology. 2008, Vol. 23.
- 18. Chen L. T., Poulos H. G., Loganathan N. (1999).** Pile responses caused by tunneling. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 125 (2-3), 207-215.
- 19. Chen S. L., Gui M. W. et Yang M. C. (2012).** Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin- and quadruple-tube tunnels. 2012.
- 20. Chekroun L. H. (2013).** Contribution à l'étude d'interaction sol-structure. Magister en Génie Civil, Université de Tlemcen.
- 21. Combarieu O. (1988).** Calcul d'une fondation mixte semelle-pieux sous charge verticale centrée Note d'information technique, Labo. Cent. des P. et Ch., Paris 1988, 16p.
- 22. Dias et Bezuijen., 2014.** Pile Tunnel Interaction. Literature Review and Data Analysis. page 10.
- 23. EL Hadj Said K., Bellami M. (2022).** Etude de l'effet des constructions souterraines sur les fondations. Mémoire de Master en Génie Civil. Université Tlemcen.
- 24. EL Houari N. (2015).** Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration tridimensionnelle ,thèse de doctorat ,Université Aboubekr Belkaid-Tlemcen, Algérie.
- 25. EL Houari N. (2022).** Soil responses caused by tunneling nearby of piles foundations. 8th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference June 4-6, 2022 / Mardin, Turkey.
- 26. EL Houari N., Taleb O., Hamzaoui F., Bachir E. (2022).** Analysis of pile tunnel interaction». International Journal Of Advanced Studies In Computer Science & Engineering IJASCSE. Volume 11. Issue 11, 2022.
- 27. Fliat G. (1981).** La Pratique des sols et fondation. Edition de Moniteur Paris, 1981, p. Paris.

- 28.Forni M. (1981).** Fondations Speciales et reprises en sous -oeuvre,France. Paris : Imprimerie Louis-Jean . 3613.
- 29.Grasso P., Chiriotti E. et Xu S. (2004).** Risk control, an essential approach in the development of tunnel studies in difficult terrain.French Review of Geotechnics. 2004. pp. 3-21. Vol. 109.
- 30.Hamdid T. (2019).** Étude de comportement d’une fondation sur un groupe de pieux. Mémoire de fin d’étude. Université de Tizi Ouzou. Algérie.
- 31.Liu G. (1997).** Numerical modelling of damage to masonry buildings to tunnelling. Thèse de Doctorat. Université d'Oxford. Grande Bretagne.
- 32.Martin F. (2012).** CENTRE DES ETUDES DES TUNNELS (C.E.TU) . Mécanique des Roches et Travaux Souterrains Cours et exercices corrigés. , F., Centre d’Études des Tunnels. Saïtta, A. Laboratoire Régional des Ponts-et-Chaussées d’Aix-en-Provence.
- 33. Magnan et Serratrice., (2002).** Analyse et prevision des tassements de surface pendant le creusement du tunnel nord de la traversee souterraine de Toulon.
- 34. Molinaro X. Jourdain et Klaeyle T. (2019).** Le Grand Paris Express : technique de creusement des tunnels . Colture Siences de l injenieur, pp. 4-5.
- 35.Montcho G. C. (2005).** Fondations Profondes Dimensionnement et conception d’un programme de calcul. Mémoire de fin d’étude . Ecole superieure polytechnique. Centre de THIES.
- 36.Mroueh H. (1998).** Tunnels en site urbain: Modélisation numérique et interaction creusement ouvrages existants. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille,France
- 37. Mechallet . (2019).** Le choix de type de fondation ,21 Févier2019. [En ligne]
- 38.Peck R B. (1969).** Deep excavation and tunneling in soft ground. State of the art report. In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation. Engineering, Mexico City. 1969, 225–290.
- 39. Planète TP (2007).** Les techniques de Fondations profondes,publié le 7 décembre 2007.
- 40.Roger F. (2003).** Calcul ds fondations superficilles t profondes édition 5.
- 41.Roger F. et al . (2019).** Fondation profondes ,technique de l’ingénieur 10 decembr 2019.
- 42.Suwansawat, S., Einstein, H.H. (2007).** Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 133 (4), 445–468.

- 43. Selka K., Rahoui F. (2022).** Impact de présence de cavités sur la capacité portante des fondations profondes, Université Aboubekr Belkaid– Tlemcen –Faculté de TECHNOLOGIE, Département de Génie Civil, Mémoire d'obtention du Diplôme de Master en Travaux Publics. .
- 44. TSTP. (2008).** "Techniciens Supérieurs Travaux Publics".
- 45. Yang X. L. et Wang J. M. (2011).** Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. Tunn. Undergr. Space Technol. 2011, Vol. 26, 462–471.
- 46. Zaid AL Farhan et al. (2022).** Geotechnical Engineering and Sustainable Construction sustainable Geotechnical Engineering, Iraq( Mosul).page 93.
- 47. Zhiqiang Z., Fangfang C. et Mingming H., Wang H. ( 2022).** An Analytical Calculation Method for Displacement Criterion on Tunnel Surrounding Rock Mass Stability. s.l. : Advances in Civil Engineering, 2022.