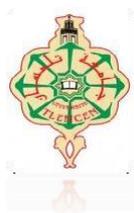


MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCCEN



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil

Master en Travaux Publics

Spécialité :

Voies et ouvrages d'art

Thème :

Simulation de l'interaction de plusieurs ouvrages souterrains par la méthode des éléments finis à l'aide du code de calcul Plaxis 2D

Présenté par :

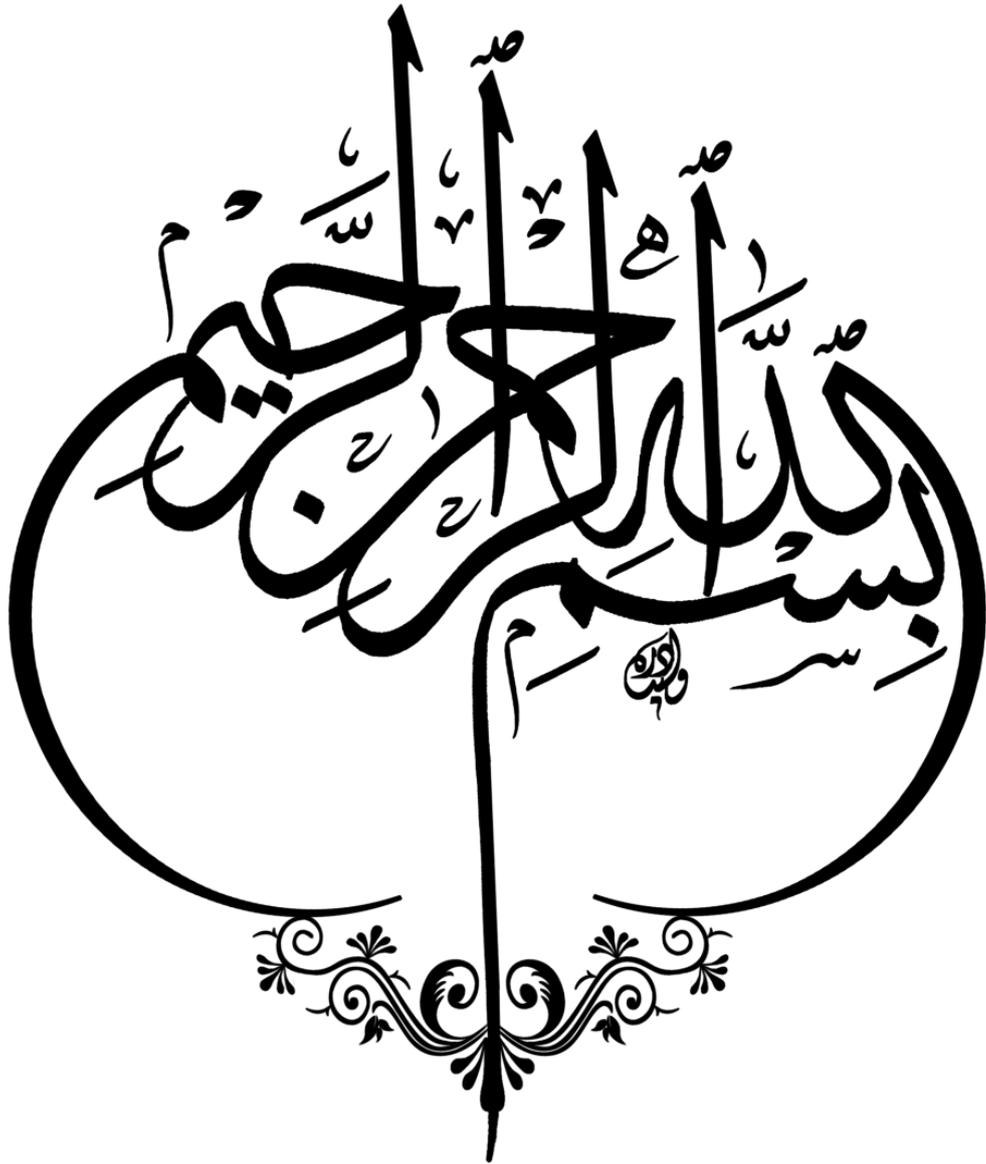
Mr KHELIF Ahmed & Mr SALHI Mousaab

Soutenu en Juillet 2021 devant le Jury composé de :

Président	Mr BEDJAOUI M.C.	Maitre-assistant	(Université Tlemcen)
Encadrant	M ^{me} EL HOUARI N.	Maitre de Conférences	(Université Tlemcen)
CO-Encadrant	Mr ALLAL M. A.	Professeur	(Université Tlemcen)
Examineur	Mr BENYELLES Z.	Maitre de Conférences	(Université Tlemcen)

**« Ne suffisent pas l'art et la science,
il faut à l'ouvrage la patience »**

Proverbe français



REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier vivement notre encadrant
M^r. ALLAL M. A. Professeur à l'université de Tlemcen
pour la qualité de son encadrement, ses conseils.

Nos sincères gratitudee à Mme EL HOUARI N. Maitre de
conférences à l'université de Tlemcen qui nous a consacré
son temps pour nous perfectionner, orienter, conseiller et
soutenir dans notre travail.

Nous adressons nos remerciements à Mr BEDJAOUI M.C
Maitre-Assistant à l'Université Tlemcen pour avoir bien
voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

Nous remercions chaleureusement, Mr BENYELLES Z.
Maitre de conférences à l'Université de Tlemcen qui a
aimablement accepté d'examiner ce travail.

On remercie nos parents pour leurs soutiens et on
remercie aussi nos frères et toutes nos familles. Et
finalement tous nos chères amis, nos collègues.

DEDICACE

Les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut...
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance...

À mes chers parents aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnerait toujours. Puisse dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mes chers et adorables frères. Wassim, le généreux, Mehdi mon grand frère que j'adore, je vous aime profondément. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que dieu, vous protège et vous garde.

À mon cher neveu Iyad Sadek, puisse dieu le garde, éclaire sa route.

À l'épouse de mon frère. Je te suis très reconnaissant, et je te remercie fort pour ton amabilité, ta générosité, ton aide précieuse.

À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses et à mes chers cousins et cousines. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À mes chers collègues

À mon cher ami Noureddine Saidi. En souvenir de notre sincère et profonde amitié et les moments agréables que nous passons ensemble.

Khelif Ahmed

Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU tout puissant qui m'a donné la santé, le courage et la force pour arriver à ce jour.

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents que j'aime par-dessus tous, et pour l'éducation qu'ils ont su me donner.

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.

Salhi Mousaab

La prise en compte de l'interaction entre ouvrages souterrains constitue un élément très important dans le dimensionnement et la vérification de ces ouvrages et la stabilité des structures adjacentes. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail présenté dans ce mémoire, il s'agit de l'étude de l'interaction de plusieurs ouvrages. Les modélisations numériques ont été effectuées par le code de calcul Plaxis 2D basé sur la méthode des éléments finis. Le projet comprend une tranchée, des structures en surface, ainsi que deux tunnels de différents diamètres. En premier lieu, les analyses en matière de tassements, de déplacements au niveau du radier et des parois de la tranchée ont été investies ainsi qu'en clef du tunnel. De même, les forces et les moments fléchissant dans les parois ont été calculés. Par la suite, l'influence de la profondeur d'un des deux tunnels a été étudiée. Les résultats ont montré l'importance de telles études pour la bonne compréhension de ce type de phénomène.

Mots clé : Tassement, Déplacement, Interaction, Tunnel, tranchée, Plaxis 2D, Structures en surface.

ABSTRACT

Taking into account the interaction between underground structures is a very important element in the sizing and verification of these structures and the stability of adjacent structures. It is within this framework that the work presented in this dissertation, it is about the study of the interaction of some structures. Numerical models were carried out by the Plaxis 2D calculation code based on the finite element method. The project actually includes a trench, surface structures as well as two tunnels of different diameters have been added. Analyzes in terms of settlements, displacements at the level of the invert and the walls of the trench were investigated as well as in key of the tunnel. Likewise, forces and bending moments in the walls were calculated. Subsequently, the influence of tunnel depth was studied. The results showed the importance of such studies for the proper understanding of this type of phenomenon.

Keywords: Settlement, Displacement, Interaction, Tunnel, Trench, Plaxis 2D, Surface structures.

يعتبر أخذ التفاعل بين الهياكل تحت الأرض في الاعتبار عنصرًا مهمًا للغاية في تحديد ابعاد هذه الهياكل والتحقق منها واستقرار الهياكل المجاورة. في هذا الإطار يقع العمل المقدم في هذه الرسالة حول دراسة تفاعل نموذج محدد. النمذجة الرقمية تمت بكود حساب Plaxis 2D على أساس طريقة العناصر المحدودة. يتضمن المشروع خندقًا بالإضافة إلى هياكل سطحية ، وقد تم إضافة نفقين بأقطار مختلفة إلى المشروع. اولاً قمنا بتحليلات انخفاض التربة ، الحركات على مستوى ارضية وجدران الخندق وكذلك في مفتح النفق . وبالمثل، تم حساب القوى في الجدران. بعد ذلك تمت دراسة تأثير عمق النفق وأظهرت النتائج أهمية مثل هذه الدراسات من أجل الفهم الصحيح لهذا النوع من الظاهرة.

الكلمات المفتاحية: انخفاض التربة ، الإزاحة ، التفاعل ، النفق ، الخندق ، Plaxis 2D ، الهياكل السطحية.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Tassement uniformément réparti	5
Figure 1.2 Tassement différentiel.....	6
Figure 1.3 Principal composantes de la déformation du sol :Tunnelier pressurisé. (Mair & Taylor, 1997. Cité par EL Houari & Allal, (2015)	8
Figure 1.4 Evolution qualitative des tassements en fonction de l'avancement et orientation des axes (Skiker & Chambon.1995)	9
Figure 1.5 Profil gaussien de la cuvette de tassement (Dolzhenko, 2002)	10
Figure 1.6 (a) Déformées inclinométriques de Lyon (Ollier, 1997). (b) Inclinomètres de Bordeaux (Bernat, 1996). (Janin, 2012)	10
Figure 1.7 Comparaison entre les différentes méthodes de prévisions des tassements et les mesure in situ (Karakus ,2006).....	14
Figure 1.8 les 3 types de modélisation.....	16
Figure 2.1 Tranchées ouverte en site urbain soutenu par des parois moulées et ancrages précontraints (Lahmadi, 2006)	27
Figure 2.2 Espace souterrain	28
Figure 2.3 Classification globale des tunnels(J.Idris.2007).....	30
Figure 2.4 Tunnels construits entre 1999 et 2004 dans le monde (Atkinsetal et al, 2006)	31
Figure 2.5 Contexte du phénomène d'interaction (Mroueh, 2003)	32
Figure 2.6 Analyse du comportement d'un écran de soutènement (Bousbia, 2016)	34
Figure 2.7 L'interaction Tunnel- Fondations profondes (Bousbia, 2016)	35
Figure 2.8 L'interaction Tunnel-Tunnel (Bousbia, 2016)	36
Figure 2.9 Configuration d'interaction Tunnel-Tunnel (Chehade et Shahrour, 2008)	36
Figure 2.10 capacité portante observée	38
Figure 3.1 Modèle géométrique du projet choisi	43

Figure 3.2 Maillage éléments finis	46
Figure 3.3 déplacements verticaux	47
Figure 3.3 Courbe de tassement en surface	47
Figure 3.4 Déplacements verticaux au niveau du radier	49
Figure 3.5 Déplacements verticaux en clef du tunnel	50
Figure 3.6 Déplacements horizontaux.....	50
Figure 3.7 déplacements horizontal en surface	51
Figure 3.8 Déplacement horizontal des parois gauche et droite	52
Figure 3.9 Diagrammes de déformations des parois moulée	53
Figure 3.11 Courbe de tassement pour différentes profondeurs	54
Figure 3.12 Courbe déplacement au radier pour différentes profondeurs	55
Figure 3.13 Courbe de tassement à la clef pour différentes profondeurs	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Classification des ouvrages souterrains (Barton et al., 1974), d'après Bouvard et al. (1992)	29
Tableau 3.1 Caractéristiques du sol du modèle de calcul (manuel Plaxis)	43
Tableau 3.2 Caractéristiques du revêtement des tunnels (manuel Plaxis)	44
Tableau 3.3 Caractéristiques des parois moulées (manuel Plaxis)	44
Tableau 3.4 Caractéristique des tirants d'ancrages (manuel Plaxis)	44

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS DEDICACE

RESUME	V
ABSTRACT	VI
ملخص.....	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	IX
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE 01 : MOUVEMENTS CAUSES PAR LE CREUSEMENT DES TUNNELS

1.1	INTRODUCTION.....	4
1.2	DEFINITION GENERALE DU TASSEMENT.....	4
1.3	TYPE DE TASSEMENT	4
1.3.1	<i>Tassements uniformes</i>	5
1.3.2	<i>Tassements différentiels</i>	5
1.4	LES CAUSES DU TASSEMENT.....	6
1.5	TASSEMENT SPECIFIQUE AUX TUNNELS.....	7
1.5.1	<i>Tassement dans le profil en long</i>	8
1.5.2	<i>Tassement dans le profil en travers</i>	9
1.6	DEPLACEMENTS HORIZONTAUX	10
1.7	LES METHODES DE CALCUL DES OUVRAGES SOUTERRAINS	11
1.7.1	<i>Méthodes analytiques</i>	11
1.7.2	<i>Méthodes empiriques</i>	12
1.7.3	<i>Méthodes numériques</i>	12
1.8	MODELISATION DU CREUSEMENT D'UN TUNNEL (APPROCHE 2D ET 3D)	13
1.8.1	<i>La modélisation bidimensionnelle</i>	15
1.8.2	<i>La modélisation tridimensionnelle</i>	16
1.9	LA METHODE DES ELEMENTS FINIS	17
1.9.1	<i>Historique de la MEF</i>	18
1.9.2	<i>Concepts de base</i>	18
1.9.3	<i>Calculs par la méthode des éléments finis</i>	19
1.9.4	<i>La méthode des éléments finis et les ouvrages souterrains</i>	20
1.10	CONCLUSION.....	21

CHAPITRE 02 : Phénomène de l'interaction entre les ouvrages souterrains

2.1	INTRODUCTION.....	24
2.2	GENERALITES SUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS.....	24
2.2.1	LES OUVRAGES A FAIBLE PROFONDEUR	25
2.2.2	LES OUVRAGES A GRANDE PROFONDEUR	27
2.3	IMPORTANCE DES OUVRAGES SOUTERRAINS	28
2.4	CLASSIFICATION DES OUVRAGES SOUTERRAINS.....	30
2.5	CROISSANCE DE LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS ET TUNNELS	31
2.6	PHENOMENES DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURES	32
2.6.1	<i>Interaction sol-structures</i>	33
2.6.2	<i>Interaction sol-soutènement</i>	34
2.6.3	<i>Interaction entre les ouvrages souterrains</i>	35
2.6.4	<i>Interaction Tunnels- Ouvrages existants</i>	38
2.7	CONCLUSION.....	39

CHAPITRE 03 : Modélisation numérique de l'interaction d'ouvrages souterrains

3.1	INTRODUCTION.....	40
3.2	OUTIL DE CALCUL PLAXIS 2D	40
3.3	PRESENTATION DU MODELE DE CALCUL	42
3.3.1	LA GEOMETRIE DU MODELE	42
3.3.2	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	43
3.3.3	PROCEDURE DE CALCULS.....	44
3.4	RESULTATS DES CALCULS DU MODELE DE REFERENCE	46
3.4.1	<i>Maillage éléments finis.....</i>	46
3.4.2	<i>Déplacements Verticaux.....</i>	47
3.4.3	<i>Tassement en surface</i>	47
3.4.4	<i>Déplacement vertical au niveau du radier de la trémie.....</i>	48
3.4.5	<i>Déplacement à la clef du tunnel ferroviaire.....</i>	49
3.4.6	<i>Déplacements Horizontaux en surface, au niveau des deux parois</i>	50
3.4.7	<i>Diagrammes de déformations des parois moulées.....</i>	52
3.5	INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU TUNNEL	54
3.5.1	<i>Tassements pour différentes profondeurs</i>	54
3.5.2	<i>Déplacement vertical au niveau de radier</i>	55
3.5.3	<i>Déplacement à la clef de tunnel.....</i>	55
3.5.4	<i>Interprétations des résultats.....</i>	56
3.6	CONCLUSION.....	56
	CONCLUSION GENERALE	58
	BIBLIOGRAPHIE	61

INTRODUCTION GENERALE

En milieu urbain, les ouvrages souterrains ont des caractéristiques spécifiques liées à leur fonction et à la nature des milieux traversés. Ils sont en effet, habituellement situés à faible profondeur dans des zones saturées par divers infrastructures pour des raisons à la fois techniques et économiques. Leur construction ne peut pas être effectuée sans avoir un impact sur le sol environnant créant ainsi différentes interactions pouvant engendrer des perturbations dans l'équilibre interne du massif environnant et en conséquence sur les structures avoisinantes, il en résulte des tassements plus ou moins significatifs et des déplacements du sol en surface et en profondeur qui peuvent affecter la stabilité de l'ensemble et engendrer des risques spécifiques pendant les différents stades de construction.

Plusieurs méthodes existent pour estimer et prévenir ces risques, parmi, la méthode des éléments finis qui est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie, elle connaît, depuis 1970 environ, une importante extension qui va de pair avec le développement et l'accroissement de puissance des ordinateurs. Elle est devenue un outil de travail, calcul et de conception quotidien, voire familier, de l'ingénieur dans des domaines aussi variés que l'analyse des structures, la mécanique des fluides, les écoulements souterrains... etc.

Ce développement s'est accompagné de la mise au point de programmes de calcul capables de résoudre des problèmes d'une étonnante complexité. Ainsi, il est aujourd'hui courant de réaliser, pour des grands projets, des analyses par éléments finis afin de vérifier la stabilité d'un ouvrage en interaction avec son environnement, de contrôler les valeurs de déplacements admissibles et d'aider au dimensionnement des différentes structures à l'aide de ces logiciels conviviaux et simples d'emploi comme le cas du code éléments finis utilisé dans ce mémoire : Plaxis.

Ainsi, le mémoire présent intitulé « Simulation de l'interaction de plusieurs ouvrages souterrains par la méthode des éléments finis à l'aide du code de calcul Plaxis 2D » s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'effet de l'interaction entre plusieurs ouvrages :

structures en surface, tranchée, deux tunnels. Cet effet est concrétisé par des résultats en termes de tassements et des déplacements à différents niveaux (en surface, en clé du tunnel, en radier et dans les parois de la trémie) ainsi que des efforts et des moments fléchissant dans les parois.

Pour se faire un exemple de référence est traité en premier lieu, il s'agit un cas d'étude, ensuite l'influence de la profondeur du tunnel avec le plus grand diamètre est investie.

Ainsi la structuration de ce mémoire en deux parties est en adéquation avec ces objectifs : après deux chapitres bibliographiques, les modélisations numériques d'un modèle de référence à l'aide du code de calcul éléments finis Plaxis 2D seront présentées :

Le chapitre 1 sera consacré à la thématique liée aux mouvements causés par le creusement des tunnels (tassements, déplacement horizontaux), les différentes approches possibles pour étudier et prévoir l'évolution de mouvements dans le massif lors du creusement d'un tunnel seront exposées en parallèle.

Le chapitre 2 exposera des notions de base sur les ouvrages souterrains et un aperçu général sur la phénoménologie de l'interaction entre différents ouvrages.

Dans le 3^{ème} chapitre, il serait question de présenter, par un bref aperçu, le logiciel Plaxis 2D, ensuite l'influence de l'interaction entre plusieurs ouvrages (Tranchée, deux tunnels de différents diamètres : un ferroviaire et l'autre d'assainissement, deux structures en surface) est analysée numériquement en configuration bidimensionnelle à l'aide du code de calcul éléments finis Plaxis 2D. Les résultats seront investis en termes de tassements et déplacements à différents niveaux (en surface, en clé du tunnel, en radier et dans les parois de la trémie).

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

CHAPITRE 01

**Mouvements causés par le
creusement des tunnels**

Table de matières

1.1	INTRODUCTION.....	4
1.2	DEFINITION GENERALE DU TASSEMENT.....	4
1.3	TYPE DE TASSEMENT.....	5
1.3.1	<i>Tassements uniformes</i>	5
1.3.2	<i>Tassements différentiels</i>	6
1.4	LES CAUSES DU TASSEMENT.....	6
1.5	TASSEMENT SPECIFIQUE AUX TUNNELS.....	7
1.5.1	<i>Tassement dans le profil en long</i>	8
1.5.2	<i>Tassement dans le profil en travers</i>	9
1.6	DEPLACEMENTS HORIZONTAUX.....	10
1.7	LES METHODES DE CALCUL DES OUVRAGES SOUTERRAINS.....	11
1.7.1	<i>Méthodes analytiques</i>	11
1.7.2	<i>Méthodes empiriques</i>	12
1.7.3	<i>Méthodes numériques</i>	12
1.8	MODELISATION DU CREUSEMENT D'UN TUNNEL (APPROCHE 2D ET 3D).....	13
1.8.1	<i>La modélisation bidimensionnelle</i>	15
1.8.2	<i>La modélisation tridimensionnelle</i>	16
1.9	LA METHODE DES ELEMENTS FINIS (MEF).....	17
1.9.1	<i>Historique de la MEF</i>	18
1.9.2	<i>Concepts de base</i>	18
1.9.3	<i>Calculs par la méthode des éléments finis</i>	19
1.9.4	<i>La méthode des éléments finis et les ouvrages souterrains</i>	20
1.10	CONCLUSION.....	21

1.1 INTRODUCTION

Le creusement des tunnels engendre des perturbations plus ou moins importantes dans l'équilibre interne du massif environnant, créant ainsi des tassements et des déplacements horizontaux dans le sol.

En zones urbaines, des tassements résultants peuvent affecter la stabilité des ouvrages avoisinants. Ces désordres peuvent avoir des catastrophes humaines et économiques non négligeables.

Plusieurs approches sont ainsi utilisées pour chercher à étudier et prévoir l'évolution de ces mouvements dans le massif.

Le chapitre présent exposera la thématique liée à ces phénomènes. Nous parlerons ainsi en premier lieu, des déformations en général, puis après nous passerons aux mouvements engendrés par le creusement des tunnels.

1.2 DEFINITION GENERALE DU TASSEMENT

Le tassement du sol est sa déformation verticale appliquée en surface due à l'application des contraintes extérieures telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Il ne faut pas le confondre avec la compaction du sol (appelée aussi tassement du sol) qui peut apparaître à l'occasion de phénomènes naturels (pluies intenses en sols battants), ou être d'origine anthropique (sur-piétinement, passages d'engins agricoles).

Tel est le cas des ouvrages souterrains, spécifiquement les tunnels où les tassement peuvent engendrés des conséquence néfastes à l'ouvrage lui-même ainsi qu'à la structure en surface ou en profondeur.

1.3 TYPE DE TASSEMENT

Les tassements peuvent être uniformes ou différentiels d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés les tassements sont presque instantanés mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables. Pour vérifier la conformité des structures vis-à-vis des conditions de sécurité et de service on doit faire un calcul de tassement au préalable pour prévenir tous problèmes.

1.3.1 Tassements uniformes

Les tassements uniformément repartis affectent peu la structure les mouvements qui en résultent peuvent cependant endommager les services et accessoires tels les conduites d'eau et les passages souterrains.

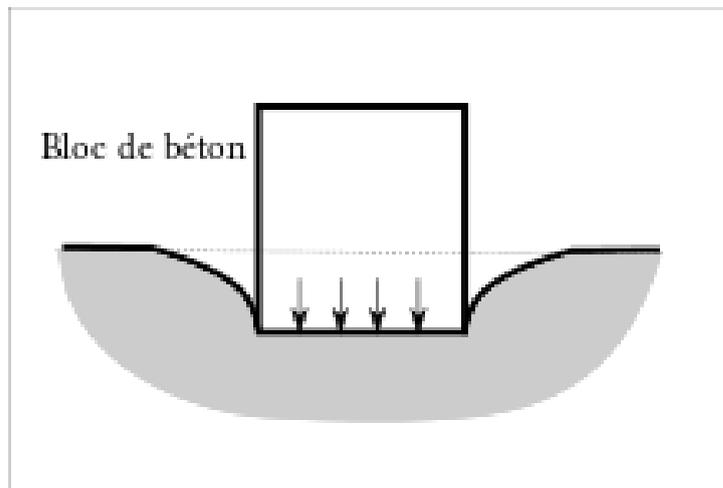


Figure 1.1 Tassement uniformément réparti

1.3.2 Tassements différentiels

Un tassement différentiel est un mouvement d'enfoncement du sol qui n'est pas uniforme. Il peut de ce fait provoquer des dislocations des maçonneries comme l'apparition de fissures. C'est un grave facteur de désordre qui est la plupart du temps irrémédiable.

Même lorsque le sous-sol est assez uniforme, les charges unitaires différentes sur les fondations peuvent provoquer un tassement différentiel très important.

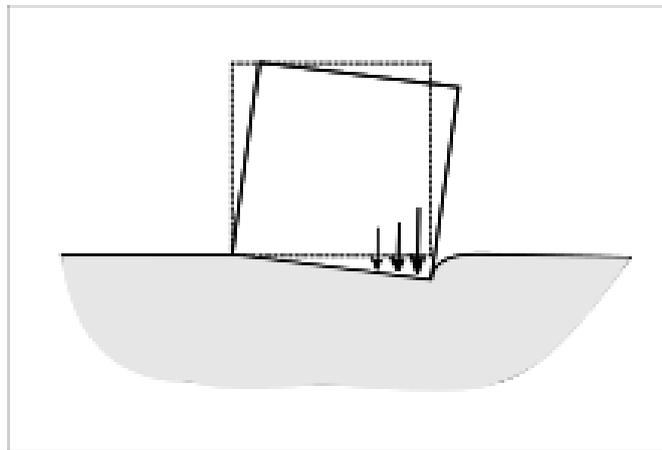


Figure 1.2 Tassement différentiel

1.4 LES CAUSES DU TASSEMENT

Souvent, une association de plusieurs causes est également à l'origine de tassements ces causes doivent être déterminées avec précision et être résolues dans la mesure du possible.

Parmi les causes des tassements il y a :

- Dessiccation des couches superficielles du terrain (sécheresse)
- Présence d'arbres au voisinage immédiat dont les racines pompent l'eau jusque sous les fondations.
- Excès d'eau (par exemple ruissellement, fuites, mauvais raccordements d'eaux pluviales etc.)
- Abaissement de la nappe phréatique, changement hydrologique.

- Différences de dimension et de profondeur de la fondation dans différentes zones du bâtiment.
- Décompression ou éboulement de sol suite à des travaux d'excavation.
- Trafic lourd/trafic ferroviaire, des chantiers ou des tremblements de terre.
- Ouvrages souterrains

1.5 TASSEMENT SPECIFIQUE AUX TUNNELS

L'origine des tassements est complexe et, comme le précise Leblais (1995) dans une recommandation du groupe de travail n°16 de l'AFTES (Association Française des Travaux En Souterrain) ; la relation entre les tassements générés en surface et la profondeur de l'ouvrage n'est pas simple à déterminer.

En effet, les tassements de surface résultent d'un double mécanisme d'interaction sol structure : l'interaction entre le tunnel et le massif, d'une part, et l'interaction entre le massif et le bâti environnant d'autre part (Magnan & Serratrice, 2002), ces tassements peuvent constituer des risques pour la construction et mêmes aux personnels y travaillant.

Mair & Taylor (1997) regroupent les composantes des déformations du sol associées à la technique du bouclier en quatre familles (cité par El Houari & Allal, 2015) (figure 1.3) :

1. Mouvement vers le front.
2. Mouvement radial vers le bouclier.
3. Mouvement radial dans le vide de queue, dû à un espace entre le bouclier et le revêtement.
4. Mouvement radial vers le revêtement, dû à la déformation du revêtement.

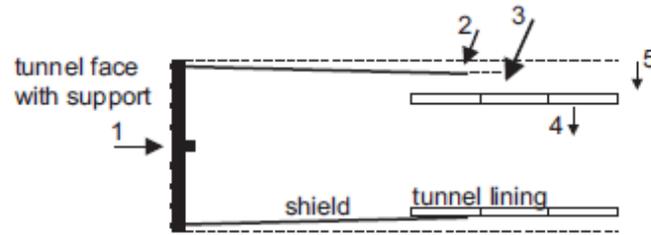


Figure 1.3 Principales composantes de la déformation du sol : Tunnelier pressurisé.
(Mair & Taylor, 1997. Cité par EL Houari & Allal, (2015))

1.5.1 Tassement dans le profil en long

Les méthodes traditionnelles de prévision des tassements de surface se fondent historiquement sur la forme de la cuvette dans un profil en travers. En réalité, la déformation en surface s'exprime en trois dimensions. Ainsi, il s'avère être très utile de réussir à prévoir, dans le cadre d'une méthode observationnelle sur chantier, le tassement en se basant sur les tassements observés en avant du front de taille.

En un point de la surface du sol au droit du profil en long d'un chantier, le tassement évolue avec l'avancement du front de taille. Il s'amorce à l'approche du front, augmente rapidement à son passage et se stabilise progressivement comme l'illustre.

Pour rendre compte de l'influence de la proximité du front sur la cuvette de tassements du point de vue de l'approche numérique, on utilise couramment la notion de taux de déconfinement selon laquelle dans une coupe $y = \text{constante}$, le tassement résulte de l'application sur les parois de la galerie d'une fraction des vecteurs contraintes calculés à l'état géostatique avant creusement (Voir figure 1.4).

1. Début du tassement antérieur.
2. Arrivée du bouclier.
3. Passage de la queue du tunnelier.
4. Fin des tassements différés.

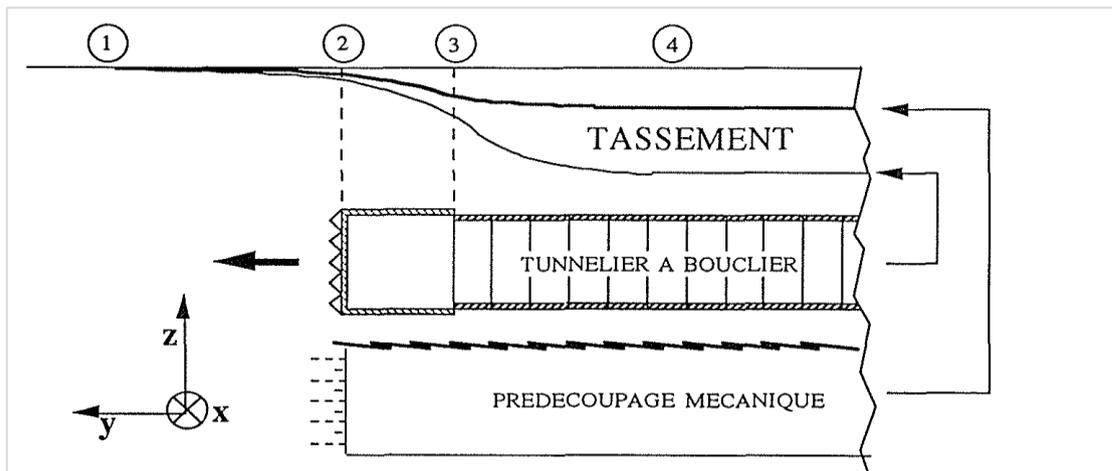


Figure 1.4 Evolution qualitative des tassements en fonction de l'avancement et orientation des axes (Skiker & Chambon.1995)

1.5.2 Tassement dans le profil en travers

Une base de données importante de mesures de tassements a montré que la distribution transversale des tassements en surface de tunnel peut bien être modélisée par une courbe de Gauss (Voir figure 1.5).

La formulation analytique du tassement est celle de Peck :

$$S(x) = S_{max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right)$$

Dans cette expression :

x représente la distance du point considéré à l'axe du creusement,

S_{max} est le tassement maximal et i est l'abscisse du point d'inflexion de la cuvette.

La cuvette de tassement est également caractérisée par sa demi largeur $L_c = 2.5i$ et son volume total $V_s = 2.5 i S_{max}$.

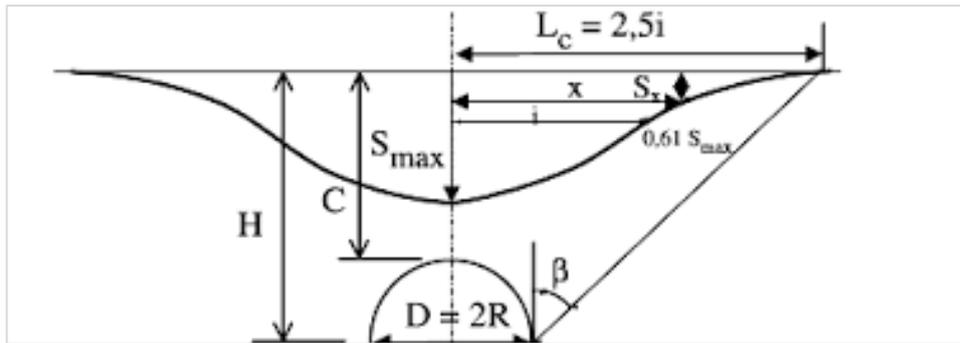


Figure 1.5 Profil gaussien de la cuvette de tassement (Dolzhenko, 2002)

1.6 DEPLACEMENTS HORIZONTAUX

Les déplacements horizontaux dans le massif sont mesurés, dans les directions longitudinale et transversale, à l'aide d'inclinomètres. Les déformées inclinométriques transversales (figure 1.6a), issues des mesures présentées par Bernat (1996), montrent que le terrain situé en surface a tendance à converger vers le centre de la cuvette ; en outre un « ventre » apparaît à la hauteur de l'excavation vers le vide créé. Dans le cas du tunnelier à front pressurisé (Ollier, 1997) ce ventre se manifeste, en revanche, dans la direction opposée (figure 1.6 b). L'effet de cette méthode de creusement est également visible dans la déformée inclinométrique longitudinale où le terrain se trouve entraîné vers l'avant au cours du creusement.

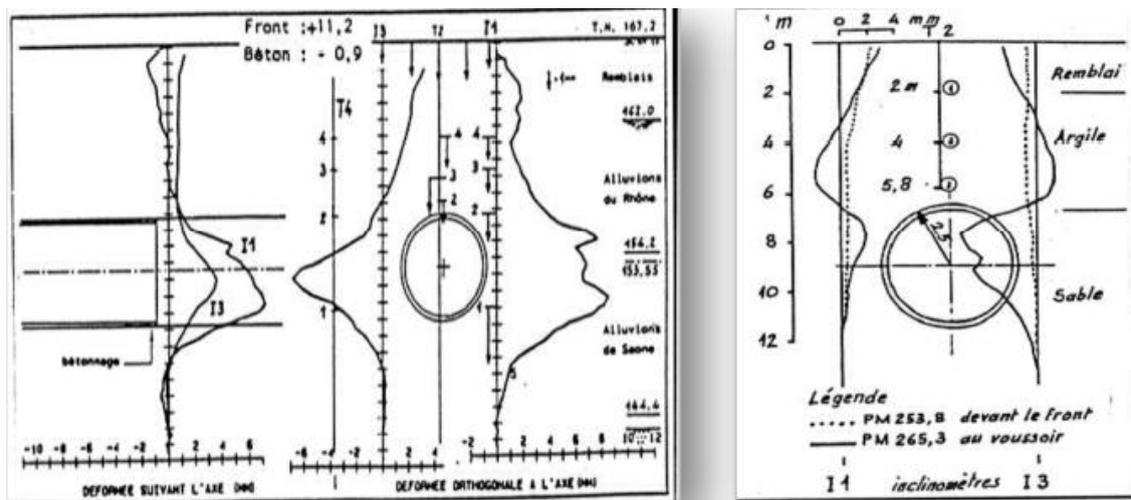


Figure 1.6 (a) Déformées inclinométriques de Lyon (Ollier, 1997)
 . (b) Inclinomètres de Bordeaux (Bernat, 1996). (Janin, 2012)

1.7 LES METHODES DE CALCUL DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Il existe trois approches permettent d'estimer les mouvements lors du creusement d'un tunnel :

1. Empirique : en se basant sur des résultats de mesures obtenus lors de la construction d'ouvrages comparables, divers auteurs ont tenté d'établir des relations entre les déplacements, les caractéristiques géométriques et géotechniques et le phasage de creusement.
2. Analytique : diverses méthodes d'estimation des mouvements ont été mises au point en se fondant sur les principes généraux de la mécanique. Ces approches nécessitent généralement de nombreuses hypothèses simplificatrices.
3. Numérique : cette approche permet entre autres de calculer le champ de déplacements et de contraintes dans le massif en autorisant la simulation des phases de creusement et la prise en compte de lois de comportement de sol élaborées et de conditions aux limites complexes.

1.7.1 Méthodes analytiques

Dans la littérature, de nombreuses formulations analytiques sont fournies. Dans la majorité des cas, les auteurs se sont intéressés à l'étude de la modification du champ de contraintes engendré par le creusement d'un tunnel. Cependant, des formulations ont été également proposées pour l'évaluation des déplacements dans le massif. Celles-ci reposent sur les principes généraux de la mécanique ainsi que sur des hypothèses fortes, concernant la géométrie du problème (tunnel circulaire d'axe horizontal à grande profondeur), la stratigraphie (une couche homogène), la loi de comportement (Mohr-Coulomb) et l'état initial de contraintes (sol non pesant, isotrope et homogène).

Par ailleurs, les formules sont exprimées dans le plan et dans le cadre d'analyses en

petites déformations. Ces hypothèses représentent une des faiblesses majeures de ces méthodes mais reste un outil de comparaison.

La méthode, généralement, la plus utilisée est celle de convergence-confinement dont le principe est le suivant : le champ des contraintes initiales dans le massif est dans une première étape réduite d'un certain taux de déconfinement λ , qui, dans une deuxième phase, est complètement relâché au moment de la mise en place du soutènement. La validité des résultats de cette méthode se base ainsi sur le choix de la valeur de λ .

1.7.2 Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques sont fondées sur des corrélations entre, d'une part, l'identification physique et la classification des roches et, d'autre part, des caractéristiques de soutènement. Ces méthodes sont utilisées dans les études préliminaires et ne concernent que les ouvrages creusés dans les roches. Elles présentent l'avantage d'être simples et rapides, donc peu coûteuses, Néanmoins, leur emploi et l'interprétation des résultats nécessitent une certaine habileté de la part de l'ingénieur d'études et les méthodes les plus répandues sont : (Purwodihardjo, 2004).

Ces méthodes, en général, visent à estimer principalement les tassements en surface à partir d'un faible nombre de paramètres, tels que la profondeur du tunnel, son diamètre, la nature du massif et la perte de volume ou la convergence engendrée par l'excavation.

La formule la plus répandue est celle de Peck (1969) (voir paragraphe 1.5.2).

1.7.3 Méthodes numériques

Dans le cas d'ouvrages souterrains, l'objectif est de modéliser le déconfinement provoqué par le creusement des tunnels afin de déterminer les champs de déplacements et de contraintes au sein du massif.

En considérant un type d'approximation numérique, ces méthodes font appel aux

modèles de comportement du sol pour la simulation des chemins de sollicitation que l'on rencontre dans le cas d'un problème réel.

Les codes de calculs numériques sont construits sur la base des éléments finis, des différences finies ou encore des éléments distincts. Ils présentent l'avantage incontestable de pouvoir aborder les problèmes théoriques analytiquement insolubles en les remplaçant par une solution numérique approchée.

1.8 MODELISATION DU CREUSEMENT D'UN TUNNEL (Approche 2D et 3D)

L'observation des ouvrages en place et des modèles physiques en laboratoire conduit à deux approches pour la description des mouvements de sol induits par le creusement d'un tunnel : une description bidimensionnelle dans un plan perpendiculaire à l'axe du tunnel loin en arrière du front et une description tridimensionnelle à proximité du front de taille.

Le creusement d'un tunnel est clairement un problème tridimensionnel, spécialement dans la zone du front de taille. Ceci a été bien mis en évidence par (Barla, 2004) sur la base de l'analyse de la distribution des contraintes et des déplacements ainsi que de l'allure du chemin des efforts autour du front de taille.

Une modélisation numérique en trois dimensions est donc nécessaire pour étudier ce phénomène dans toute sa complexité. Avec cette approche, la géométrie tridimensionnelle du projet, l'état des contraintes initiales (même anisotrope), la méthode de creusement, le phasage des travaux, les charges de surface etc. peuvent en effet être prises en compte.

Le progrès constant des outils informatiques et des codes numériques rend aujourd'hui possible l'utilisation de cet outil pour le projet d'ouvrages souterrains, avec des temps de calcul qui se réduisent de plus en plus. Toutefois, l'approche par modélisation bidimensionnelle, pour sa rapidité et relative simplicité, est encore la plus

répandue dans la pratique courante de calculs de projets de tunnel. Parmi les différentes possibilités de modélisation 2D, résumées par (Dias ,1999) dans sa thèse, l'analyse bidimensionnelle en coupe transversale et en déformations planes est celle la plus souvent utilisée.

Dans le cadre de ce type de modélisation 2D, différentes méthodes ont été étudiées pour pouvoir simuler les effets tridimensionnels de l'avancement du tunnel (méthode convergence-confinement, GAP méthode, méthode du ramollissement du sol etc.). (Karakus ,2007) résume de façon claire les différentes approches et les compare, par le biais d'un calcul 2D, aux mesures in situ de la cuvette transversale de tassements, enregistrées sur le chantier du Heathrow Express tunnel à Londres (NATM). Il conclut que le meilleur calage avec l'allure de la cuvette est obtenu grâce à la méthode convergence-confinement avec la modélisation du soutènement par des éléments barres.

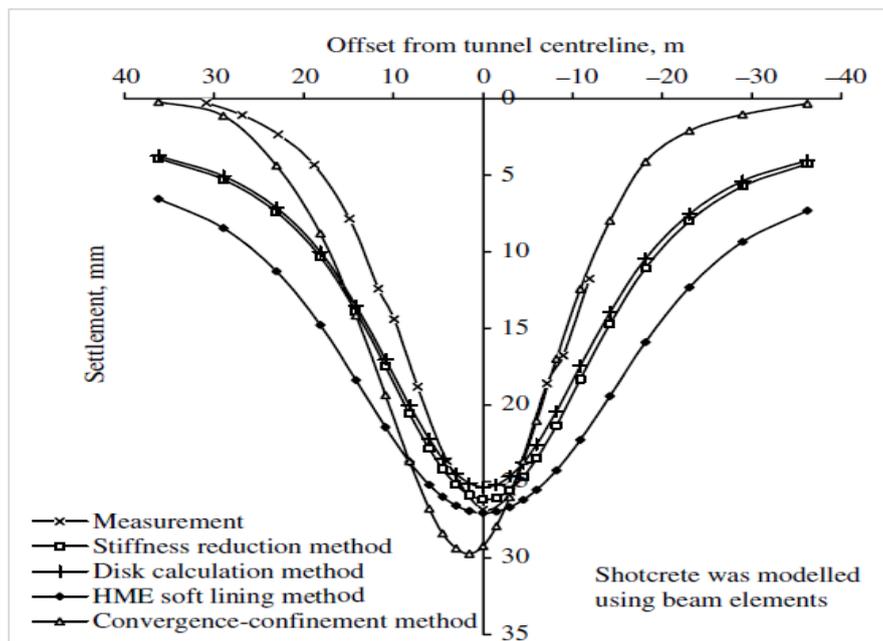


Figure 1.7 Comparaison entre les différentes méthodes de prévisions des tassements et les mesures in situ (Karakus ,2006)

1.8.1 La modélisation bidimensionnelle

Afin de simuler le creusement d'un tunnel en configuration bidimensionnelle, trois types de modèles peuvent être adoptés :

1. Le modèle transversal : le tunnel est supposé infiniment long dans la direction de son axe.
2. Le modèle longitudinal, le tunnel est considéré comme une excavation de longueur infinie.
3. Le modèle axisymétrique, l'axe du tunnel est considéré comme un axe de symétrie de révolution du modèle.

La modélisation axisymétrique dans l'axe du tunnel permet l'analyse tridimensionnelle de la stabilité du front de taille et du phasage des travaux. Malheureusement cette méthode induit des hypothèses très restrictives : tunnel circulaire, milieu homogène et isotrope, surface non modélisée. Elle s'applique donc à des tunnels à grande profondeur pour lesquels l'état de contrainte initial est sensiblement isotrope.

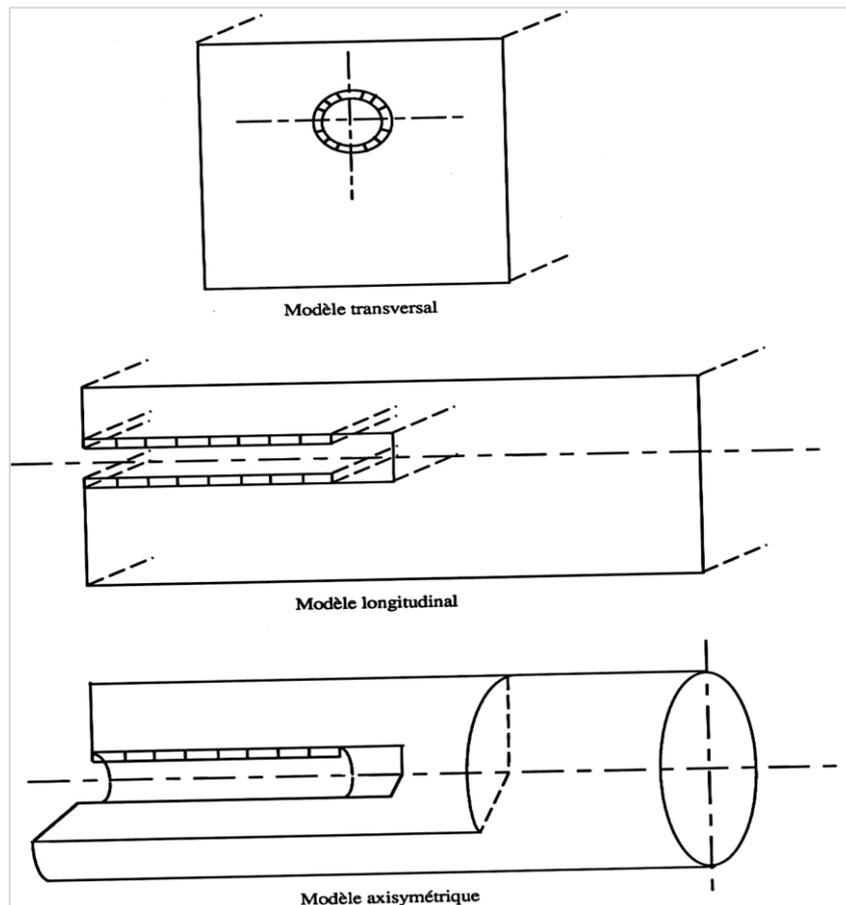


Figure 1.8 les 3 types de modélisation

1.8.2 La modélisation tridimensionnelle.

C'est le seul type d'approche permettant de traiter le problème rencontré dans toute sa complexité car il peut prendre en compte :

- la géométrie tridimensionnelle du projet (tunnel en forme de fer à cheval, tunnel incliné, écaillles de sol, etc ...)
- l'état de contraintes initial (coefficient des terres au repos)
- Le phasage souvent complexe de la technologie d'exécution retenue (radier décalé).
- L'ensemble des phénomènes mis en jeu (effet de voute au front de taille, mise en charge du soutènement, etc...)

C'est aussi l'approche la plus exigeante en taille du système, en temps de calcul et en temps d'exploitation des résultats. Compte tenu de sa lourdeur, ce type de calcul reste

encore du domaine de la recherche et de projets importants ou encore afin de valider des approches simplifiées. (Mroueh, 1998) a implanté au sein d'un code éléments finis une technique de résolution destinée à raccourcir les temps de calcul. On trouve néanmoins quelques auteurs ayant effectué des analyses tridimensionnelles (Mroueh, 1999), (Mémier, 1995), (Shahrour, 1996), (Chaffois, 1991), (Modaressi , 1993), (Celada , 1997) etc...).

(Lee ,1991) utilise un modèle tridimensionnel pour simuler les mouvements de terrain autour du tunnel de Thunderbay (Canada). Le comportement du sol supposé non-drainé est élastoplastique (Critère de Tresca). En tenant compte du vide annulaire, les résultats obtenus sont en bon accord avec les mesures enregistrées tant au niveau des tassements que des déplacements horizontaux.

1.9 LA METHODE DES ELEMENTS FINIS (MEF)

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux, l'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Conditionnée par les progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation, la méthode des éléments finis est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application où elle est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, nucléaire, génie civil, construction navale, mécanique... etc.

Cette méthode est donc une technique récente à caractère pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

1. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, ... etc..
2. L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, etc..
3. L'informatique appliquée : techniques de développement et de maintenance de grands logiciels.

1.9.1 Historique de la MEF

L'histoire de la MEF a commencé en 1819, quand Navier définit une méthode d'étude des systèmes hyperstatiques basés sur l'application des conditions d'équilibre et de compatibilité, puis Maxwell en 1864 et Castigliano en 1878 établissent d'une façon complète les théorèmes de l'énergie. Au début du 20ème siècle, des résultats fondamentaux dans le domaine des méthodes d'approximation ont été établis les bases en effectuant une discrétisation spatiale du domaine tout en utilisant les méthodes d'approximation variationnelles.

En 1955, Argyris présente une approche unifiée des méthodes des déplacements et des forces, l'année suivante Turner et Clough publient une présentation systématique de la méthode des déplacements. Ces deux publications sont particulièrement importantes et représentent véritablement le début de la MEF comme technique de calcul des structures complexes.

1.9.2 Concepts de base

La MEF consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité du déplacement réel de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées.

Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

1.9.3 Calculs par la méthode des éléments finis

La méthode aux éléments finis est théoriquement, la plus satisfaisante puisqu'elle permet la modélisation des problèmes géotechniques complexes.

Elle nécessite :

- La définition de la géométrie du problème, pour que les frontières du calcul n'influencent pas sur les résultats.
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de type Mohr-Coulomb, Duncan, Cam-Clay, ... etc..
- Les caractéristiques des ouvrages et des éléments d'interface pour introduire l'interaction sol-structures et les conditions hydrauliques.
- Les caractéristiques des butons ou des tirants d'ancrage.
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

Elle permet :

- D'effectuer les calculs d'écoulement ;
- De simuler toutes les phases de travaux ;
- De prendre en compte les variations des caractéristiques : des ouvrages, des couches de terrain et des lits de butons ou de tirants ;
- De calculer un coefficient de sécurité.

Les sorties fournissent pour les ouvrages sont :

- Les déplacements des ouvrages ;
- Les sollicitations internes des ouvrages ;
- Les efforts dans les butons ou tirants.

Et pour le sol :

- Les déplacements du sol ;
- Les déformations du sol ;
- Les contraintes totales et effectives dans le sol ;
- Les pressions interstitielles ;
- De calculer un coefficient de sécurité.

Et donc la possibilité d'étudier l'interaction de l'exécution d'un écran sur des ouvrages existants.

1.9.4 La méthode des éléments finis et les ouvrages souterrains

Les ouvrages souterrains sont complètement creusés dans un massif de sol ou de roche, leurs dimensionnements nécessitent donc des reconnaissances géotechniques précises sur toute la longueur de l'ouvrage, quatre catégories d'outils de calcul sont habituellement utilisées: les méthodes semi-empiriques, les méthodes de calcul à la rupture, les méthodes analytiques et les méthodes numériques (éléments finis, différences finies, éléments distincts). Depuis plus de deux décennies la MEF est couramment utilisée pour simuler le fonctionnement des ouvrages souterrains, les méthodes numériques sont maintenant bien au point, les méthodes analytiques sont utilisées pour obtenir des ordres de grandeur ou pour contrôler les résultats des modélisations complexes, de même que les méthodes semi-empiriques apparaissent souvent comme une approche d'estimation des tassements, les outils de calcul

permettent d'accéder aux quantités suivantes:

- Les tassements provoqués en surface (ouvrages à faibles profondeur).
- Les déformations liées aux interfaces (sol-structure).
- Les efforts repris par le soutènement.
- Les effets hydrauliques induits par les travaux.

1.10 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents mouvements engendrés par le creusement des tunnels et sont liés à un phénomène complexe qui dépend de la nature des sols, des méthodes de creusement et de la géométrie de l'ouvrage à réaliser.

Les observations menées in situ ont montré que la cuvette transversale de tassement peut-être généralement très bien décrite par la courbe de Gauss.

Nous avons en parallèle, donné un aperçu sur les méthodes dédiées aux calculs des ouvrages souterrains (analytiques, empiriques et numériques). De même, un aperçu sur la MEF a été présenté.

En conclusion, toutes ces différentes approches, même celle numérique, constituent néanmoins une simplification du phénomène réel et demandent donc à être confrontées aux observations in situ.

Le chapitre suivant portera sur le phénomène d'interaction entre les différents ouvrages.

CHAPITRE 02

**Phénomène de l'interaction entre les
ouvrages souterrains**

Table de matières

2.1	INTRODUCTION	23
2.2	GENERALITES SUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS	23
2.2.1	LES OUVRAGES A FAIBLE PROFONDEUR	24
2.2.2	LES OUVRAGES A GRANDE PROFONDEUR	26
2.3	IMPORTANCE DES OUVRAGES SOUTERRAINS.....	27
2.4	CLASSIFICATION DES OUVRAGES SOUTERRAINS.....	29
2.5	CROISSANCE DE LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS ET TUNNELS	30
2.6	PHENOMENES DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURES	31
2.6.1	<i>Interaction sol-structures</i>	32
2.6.2	<i>Interaction sol-soutènement</i>	33
2.6.3	<i>Interaction entre les ouvrages souterrains</i>	34
2.6.4	<i>Interaction Tunnels- Ouvrages existants</i>	37
2.7	CONCLUSION.....	38

2.1 INTRODUCTION

L'agglomération actuelle des milieux urbains a atteint un tel niveau que l'on est obligé à utiliser au mieux le sous-sol, seule possibilité pour s'affranchir des problèmes de surface. Ainsi, dans les dernières décennies dans le monde entier, Nous percevons naitre un nombre croissant de projets en souterrain dans les villes (parkings, immeubles à plusieurs niveaux de sous-sol, voiries et réseaux divers, transports en site propre, collecteurs d'assainissement, métro... etc) et ceci crée une interaction entre ces différentes constructions, d'où la nécessité d'accentuer les études liées à cette phénoménologie complexe.

Ainsi, nous présentons dans ce chapitre, en premier lieu, des notions de base sur les ouvrages souterrains. Par la suite, un aperçu sur la phénoménologie de l'interaction entre les ouvrages sera exposé.

2.2 GENERALITES SUR LES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les ouvrages souterrains conçoivent un usage primordial et en plein développement depuis des décennies. De même l'extension des voies de communications (routes, voies ferrées, parkings et réseaux divers) impose souvent des franchissements difficiles, qui conduisent généralement à la construction en souterrain. Ces ouvrages généralement sont construits à faible profondeur en particulier en milieu urbain.

Il s'agit d'un procédé complexe procréant de nombreux imprévus dans le massif spécifiquement dans le cas des tunnels. En effet, au fur et à mesure de l'avancement du tunnel, la construction engendre des déplacements et des déformations provoquant des instabilités dans le sol et dans le soutènement pouvant créer des conséquences humaines et économiques considérables surtout dans un milieu urbain.

Parmi les objectifs actuels de la recherche dans le domaine des ouvrages souterrains,

l'amélioration de la prévision des mouvements induits dans le massif par la construction des ouvrages souterrains et notamment la prévision des effets potentiels des travaux sur les structures sus-jacentes. Ces problématiques constituent des enjeux forts pour les projets souterrains.

2.2.1 Les ouvrages à faible profondeur

Un ouvrage souterrain à faible profondeur peut être réalisé de deux façons, il peut avoir été construit soit en souterrain, soit à l'air libre puis recouverts de remblais (tranchée) :

Qu'il s'agisse de l'une ou l'autre méthode d'exécution, en tranchée ou en souterrain, le choix du procédé est influencé par :

- L'existence dans le voisinage d'ouvrages de construction souterraine.
- Les propriétés des sols.
- La présence des canalisations enterrées.
- Le trafic de surface en cours des travaux.

Il ne sera généralement pas possible d'adopter une méthode unique applicable à l'ensemble. Il est cependant indispensable que le choix des divers procédés à adopter permette d'aboutir à un ensemble d'ouvrages cohérents du point de vue aspect, gabarit du matériel roulant, services à attendre, et de les mener à bonne fin et au moindre coût.

Une fois réalisés, ces deux types des ouvrages se distinguent facilement par leur forme, la tranchée ressemble à une boîte rectangulaire, tandis que le tunnel creusé sous terre est, généralement, arrondi.

En tunnel : on construit soit par attaque ponctuelle ou au tunnelier, on évitera l'explosif, surtout en zone urbaine, car les risques augmentent à cette faible

profondeur.

Les tunnels urbains présentent des caractères spécifiques que l'on peut résumer comme suit :

- Leur tracé généralement imposé, peu profond, traversant des sols ;
- Présence de constructions aux têtes et à l'aplomb de l'ouvrage ;
- Présence d'aménagements souterrains à proximité (caves, réservoirs, collecteurs, métro..).
- Contraintes environnementales fortes (structures sus jacentes).

Pour cela, les études doivent être adaptées en conséquence (CETU, 1998) :

- En ce qui concerne les reconnaissances : ne pas hésiter à avoir recours à des puits ou galeries et aux reconnaissances à l'avancement en cours de travaux, pour pallier l'insuffisance des reconnaissances depuis la surface ;
- En ce qui concerne le choix des procédés de construction : privilégier les procédés permettant la mise en place rapide d'un soutènement complet, peu sensible aux hétérogénéités du terrain, facile à renforcer si nécessaire (ou du revêtement définitif) ;
- En ce qui concerne l'impact du creusement du tunnel sur les constructions et ouvrages de surface ou enterrés : analyser les différentes sources de tassement et les moyens d'y remédier : renforcement des soutènements, limitation du drainage, traitements de terrain, injections de compensation, prévoir les moyens de limiter les vibrations produites lors du creusement, etc.;
- En ce qui concerne l'incidence des ouvrages annexes : intégrer très en amont du projet ces ouvrages qui peuvent constituer des contraintes fortes (émergences de sécurité, stations de ventilation, etc.).

En tranchée : On réalise une tranchée à l'air libre dans laquelle on construit l'ouvrage, celle-ci est ensuite remblayée.

Les ouvrages construits en tranchée sont privilégiés dès lors qu'ils sont réalisables (en

zone découvert, sous une rue...). Ils sont en effet plus économiques et moins aléatoires.

Lorsque l'on construit à ciel ouvert, deux possibilités se présentent : on peut soit envisager de construire l'ouvrage à l'aide de la méthode des tranchées ouvertes où tout l'ouvrage est à l'air libre jusqu'à l'édification de la superstructure, la dalle de toiture est alors en un seul tenant (Figure 2.1), soit en utilisant celle en tranchée couverte (on réalise la dalle de toiture à l'air libre, souvent en plusieurs tenants).

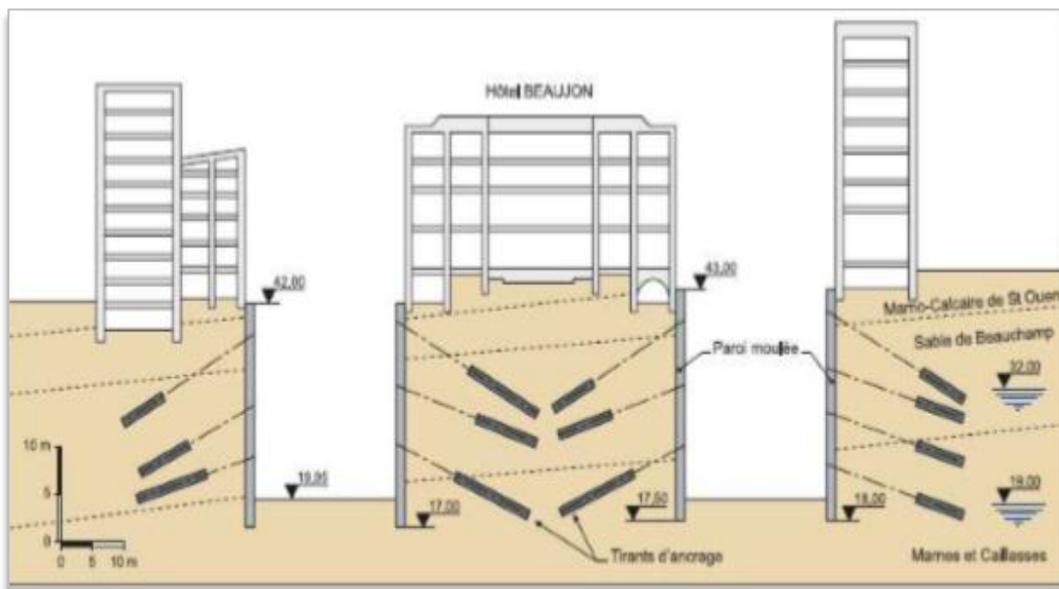


Figure 2.1 Tranchées ouverte en site urbain soutenu par des parois moulées et ancrages précontraints (Lahmadi, 2006)

2.2.2 Les ouvrages à grande profondeur

Il s'agit des tunnels longs assurant le franchissement des chaînes de montagnes à une altitude assez faible, donc avec des couvertures de terrain très importantes. Ces ouvrages posent des problèmes spécifiques tels que :

- Les reconnaissances : réalisation de sondages profonds, détermination de l'état de contrainte du terrain, etc. ;
- Pour les méthodes d'exécution : contrôle des phénomènes liés à la décompression

du massif, problèmes liés à la longueur et à la profondeur du tunnel (température, ventilation, exhaure) ;

- En ce qui concerne les ouvrages annexes : les besoins de ventilation ou de sécurité en exploitation par exemple peuvent nécessiter la construction de puits de grande hauteur ou de galeries inclinées.

Pour ce type de tunnels, la phase d'étude conduit à l'engagement de dépenses importantes, voire de travaux préliminaires et d'investigation ayant un impact important: puits, galeries de reconnaissance de grande longueur. Ceci doit être pris en compte dans l'organisation des études (Cetu, 1998).

Les tunnels alpins ont apporté de nombreuses informations sur la construction à très grande profondeur (hauteur de couverture supérieure à 1000 m). Les roches qui, à la surface, semblent très résistantes ($RC > 150\text{MPa}$) peuvent avoir un comportement complètement différent lors de leur traversée.

La convergence enregistrée pour ce type d'ouvrages est de quelques centimètres, voir décimétrique (alors qu'elle est généralement de quelques millimètres).

Dans cette profondeur, il est illusoire de vouloir freiner ces mouvements avec des cintres en métal massif. Pour accompagner les déformations, la fixation de boulons à ancrage ponctuel très rapprochés et à forte ductilité s'est avérée efficace dans certaines situations. (Akhveissy, 2010).

2.3 IMPORTANCE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les ouvrages souterrains constituent la solution la mieux adaptée à la création de nouvelles infrastructures en zone urbaine et au franchissement des zones montagneuses ainsi qu'aux problèmes d'encombrement.

En zone urbaine, le sous-sol devient une alternative quasi incontournable aux

problèmes d'occupation et d'encombrement de surface. La réalisation des travaux en souterrain permet de s'affranchir des obstacles, d'utiliser au maximum l'espace souterrain quasi illimité et de libérer la surface au sol.

La multiplication des travaux souterrains et les difficultés rencontrées conduisent à une sophistication des méthodes d'investigation, de modélisation, de conception et d'exécution.



Figure 2.2 Espace souterrain (Bousbia, 2016)

Contrairement aux projets de structures tels que les bâtiments ou les ponts, les ouvrages souterrains sont entièrement construits dans les terrains et requièrent des informations géotechniques précises concernant le massif environnant tout au long du tracé.

Ces conditions sont rarement satisfaites et rendent la réalisation des ouvrages souterrains d'autant plus difficile. Ce problème se pose de manière plus aiguë encore dans le cas des tunnels profonds. Les problèmes majeurs liés à la construction des ouvrages souterrains sont :

- La stabilité de terrain pendant les travaux notamment au front de taille
- Le choix de type de soutènement et de revêtement à mettre en œuvre pour assurer la tenue des parois à court terme, puis à long terme
- La maîtrise des mouvements engendrés en surface par le creusement particulier lorsque l'ouvrage est construit à une faible profondeur ou à proximité d'autres structures (en site urbain) - Maîtrise les problèmes hydrauliques (présence d'une nappe phréatique).

2.4 CLASSIFICATION DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les ouvrages souterrains sont définis comme des espaces fermés situés sous la surface du sol. Il est possible de classer ces constructions selon plusieurs critères dont nous citerons :

1. Celle de (Barton et al., 1974) qui classe les ouvrages souterrains suivant leur destination, en caractérisant la sécurité requise par ordre croissant.

Tableau 2.1 Classification des ouvrages souterrains (Barton et al., 1974), d'après Bouvard et al. (1992)

Classe	Description
A	Excavation minière à caractère temporaire.
B	Puits verticaux.
C	Galeries hydrauliques, collecteurs d'assainissement, galeries de reconnaissances.
D	Cavité de stockage, stations de traitement d'eau, tunnels routiers et ferroviaires, tunnels d'accès.
E	Usines souterraines (plus souvent hydroélectrique), tunnels autoroutiers, tunnels ferroviaires, galeries du métro, abris de défense civile.
F	Centrales nucléaires souterraines, gares souterraines, salles ouvertes au public (sports, spectacles).

2. Dans une autre classification et selon (Mestat, 1999), cité par (Dolzhenko, 2002), les structures souterraines peuvent être divisées en deux grandes familles :

- Les ouvrages de section plus ou moins régulière et de grande longueur (tunnels,

galeries, buses, tuyaux).

- Les cavités souterraines et structures enterrées (usines et gares souterraines, parkings, lieux de stockage).

3. Ou nous pouvons classer les ouvrages souterrains selon leur technique de construction : à ciel ouvert (connu fréquemment sous le nom de Trémie) ou en souterrain (il s'agit des tunnels).

4. Ou alors, nous pouvons citer celle de Idriss (2007) :

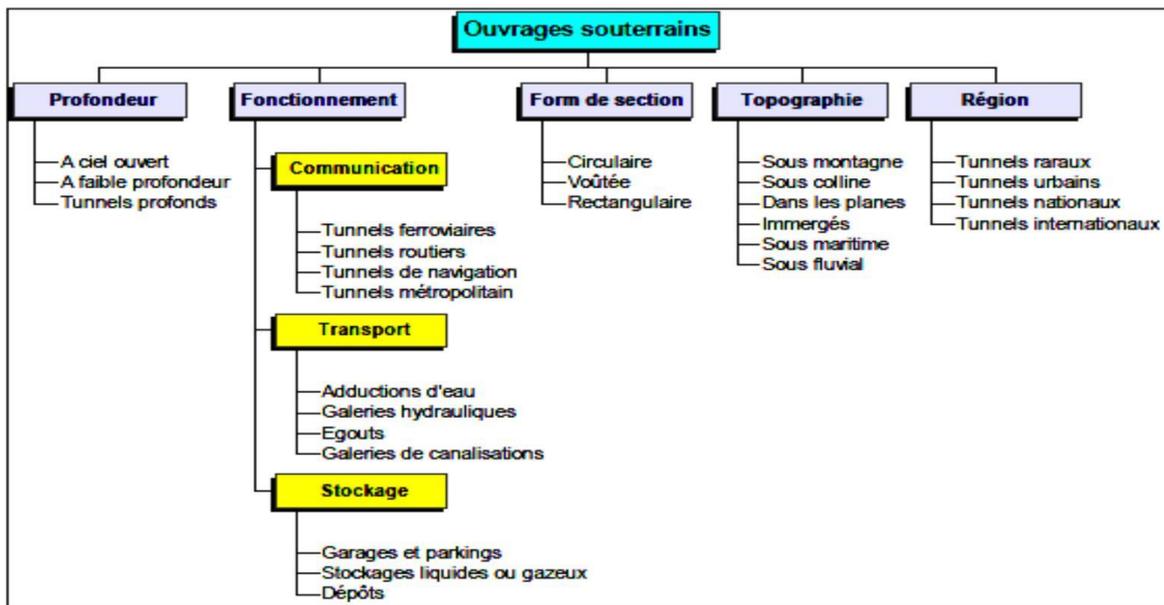


Figure 2.3 Classification globale des tunnels (Idriss, 2007)

2.5 CROISSANCE DE LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES SOUTERRAINS ET TUNNELS

La construction des tunnels est l'une des premières activités d'ingénierie qui ait laissé des traces importantes sur l'histoire de la civilisation humaine. Le tunnel le plus ancien actuellement connu semble bien être celui qui a été construit en Mésopotamie sous l'Euphrate il y a 4000 ans à l'époque de la reine Sémiramis. Ce tunnel est d'une longueur de 1 km, il reliait le palais royal de Babylone au temple de Jupiter » (Gesta, 1994).

Aujourd'hui, cette branche du génie civil est en plein expansion, soutenue par une série d'innovations technologiques et par les soucis écologiques dont témoignent les politiques de transport et d'urbanisme. Les civilisations modernes ont élargi le génie de souterrain afin de répondre aux besoins croissants de communication, de transport (marchandises, eau), mais aussi pour assurer le stockage des matières dangereuses (pétrole, gaz), pour décongestionner la surface des villes (parkings souterrains) ou pour loger des unités de production d'énergie (centrales enterrées).

La figure (2.4) présente la longueur cumulée des ouvrages souterrains construits dans le monde entre 1999 et 2004, (Atkins et al. 2006), elle montre ainsi la permanence du nombre d'ouvrages souterrains construits durant ces dernières années.

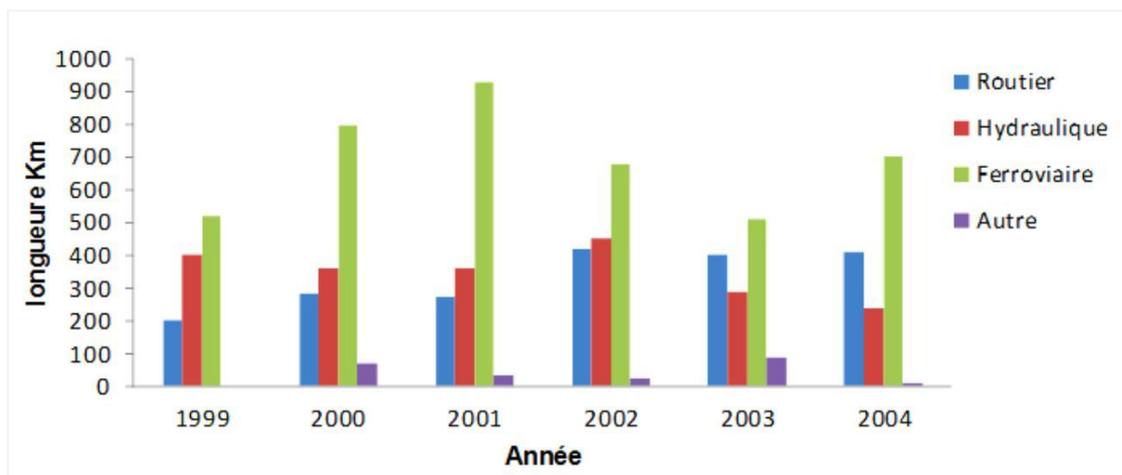


Figure 2.4 Tunnels construits entre 1999 et 2004 dans le monde (Atkins et al., 2006)

2.6 PHENOMENES DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURES

Les ouvrages de génie civil sont en contact avec des sols ou des roches, on appelle ceci une interaction, cette dernière peut être localisée dans le cas des fondations, des ponts ou des barrages, et reste plus complexe dans les soutènements, ou totale dans le cas des tunnels.

L'interaction dans le cas des ouvrages souterrains est complexe où le comportement du massif environnant représente un des aspects majeurs du problème ; elle dépend, aussi, de la rigidité du sol, des fondations des structures en surface et du soutènement choisi.

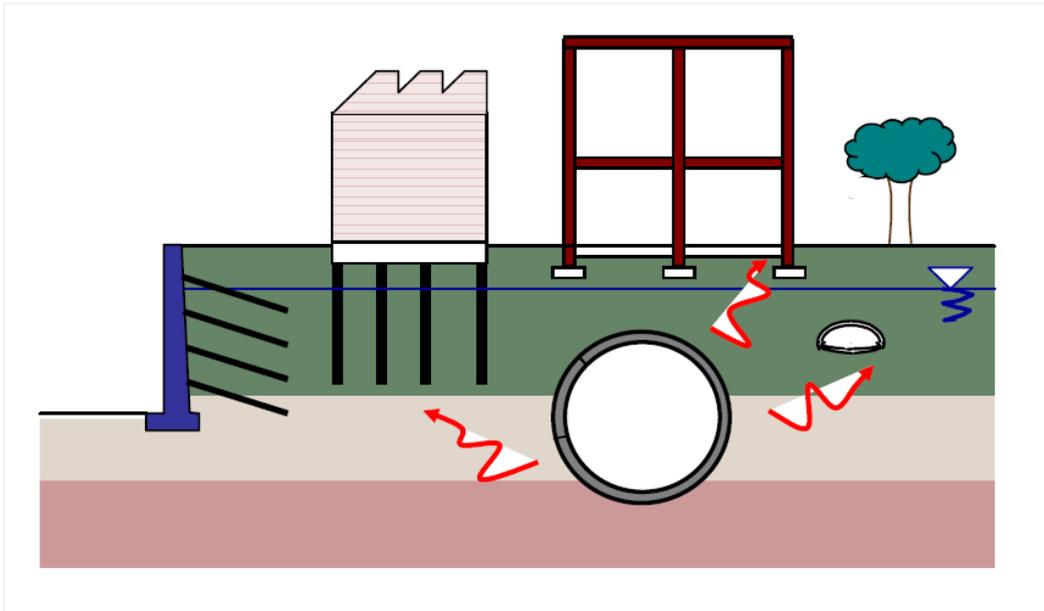


Figure 2.5 Contexte du phénomène d'interaction (Mroueh, 2003)

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

1. Effets des mouvements du sol sur le comportement des structures.
2. Action des structures sur le sol environnant.
3. Interaction entre structures voisines par l'intermédiaire du sol (tunnels peu profonds, intersection de galeries, pieux, fondations ... etc.).
4. Effet du renforcement des sols (pieux, géo synthétiques, ancrage, etc.).

2.6.1 Interaction sol-structures

L'interdépendance du comportement mécanique entre le sol et la structure est appelée Interaction sol-structure.

La structure est constituée de différents matériaux comme le béton, l'acier ou le bois dont la rigidité est beaucoup plus importante que celle du sol encaissant. Le comportement de ces matériaux peut être décrit par des modèles simples, élastiques ou élastoplastiques.

La connaissance de l'état de contrainte au contact sol-fondation est nécessaire pour un dimensionnement réaliste des structures qui prend en compte le seuil de capacité portante du sol. Cet état de contrainte est susceptible d'être modifié quand le terrain subit un mouvement (retrait- gonflement, creusement de tunnel, etc.) (Bakri, 2016).

De même, il est à signaler que le tassement admissible d'une structure donnée dépend du degré de dommages que l'on est prêt à admettre. Il y a des dommages qui mettent en péril le bon fonctionnement de l'ouvrage et d'autres qui mettent en péril son intégrité structurelle ou sa pérennité même. On distingue, ainsi, dans les études de génie civil, des états limites de service et des états limites ultimes des structures.

Pour les structures normales sur fondations isolées, Eurocode 7 mentionne des valeurs des tassements totaux jusqu'à 50mm et des tassements différentiels entre appuis voisins jusqu'à 20mm sont souvent admissibles. Il est précisé que «des tassements totaux et différentiels supérieurs peuvent être admis, à condition que les rotations relatives restent dans des limites admissibles et que les tassements totaux ne causent pas de problèmes aux services entrant dans la structure ».

2.6.2 Interaction sol-soutènement

Pour les rideaux de palplanches ou parois moulées devant lesquels une excavation est réalisée (figure 2.6a), coexistent une approche de type calcul des structures et une approche de type mécanique des sols.

Pour le calcul des structures, le sol en contact avec l'écran est réduit à un coefficient de réaction k (et, dans certains cas, une pression limite) (figure 2.6b), ce qui permet de

calculer les efforts (effort tranchant, effort normal et moment fléchissant) dans la structure en fonction de k et des coefficients aux limites du problème (Bousbia, 2016).

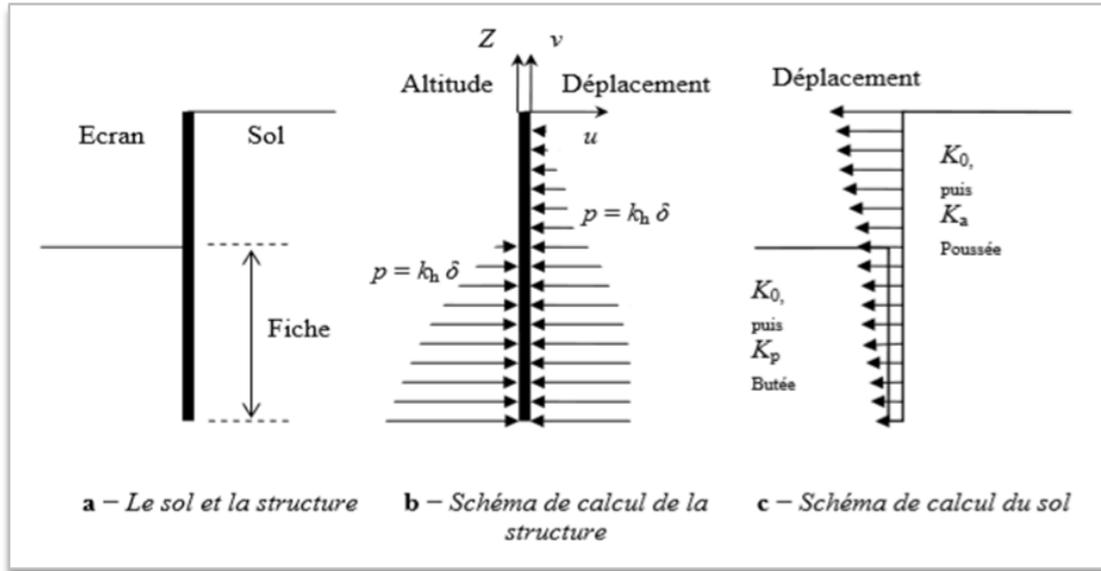


Figure 2.6 Analyse du comportement d'un écran de soutènement (Bousbia, 2016)

L'idéal serait bien sûr de calculer simultanément les efforts et les déformations dans le sol et dans l'écran, sous les charges de service, en recourant le moins possible aux coefficients de réaction, qui ne sert pas des caractéristiques mécaniques intrinsèques des sols. Néanmoins, cette perspective reste éloignée et les deux approches de l'interaction sol-structure devront encore coexister en respectant les caractéristiques essentielles de chacun des matériaux en contact.

2.6.3 Interaction entre les ouvrages souterrains

L'effet de la construction d'un ouvrage souterrain sur l'état d'équilibre et de stabilité d'autres ouvrages existants est un facteur déterminant dans la conception et la vérification de ces ouvrages.

Plusieurs études récentes ont été faites sur l'influence du creusement des tunnels par tunnelier sur le comportement des pieux adjacents (Cheng et al., 2007 ; Mroueh et Shahrour, 2002 ; Jacobsz et al., 2001 ; Leung et al., 2002 ; Chen et al., 1999 ; Vermeer et

Bonnier, 1991 ; Pang. 2006 ; Lee et al., 2006).

Pour mieux comprendre les phénomènes accompagnant ce type de problèmes, il est nécessaire d'adopter des modèles tridimensionnels en se basant sur des observations in situ (figure 2.7).

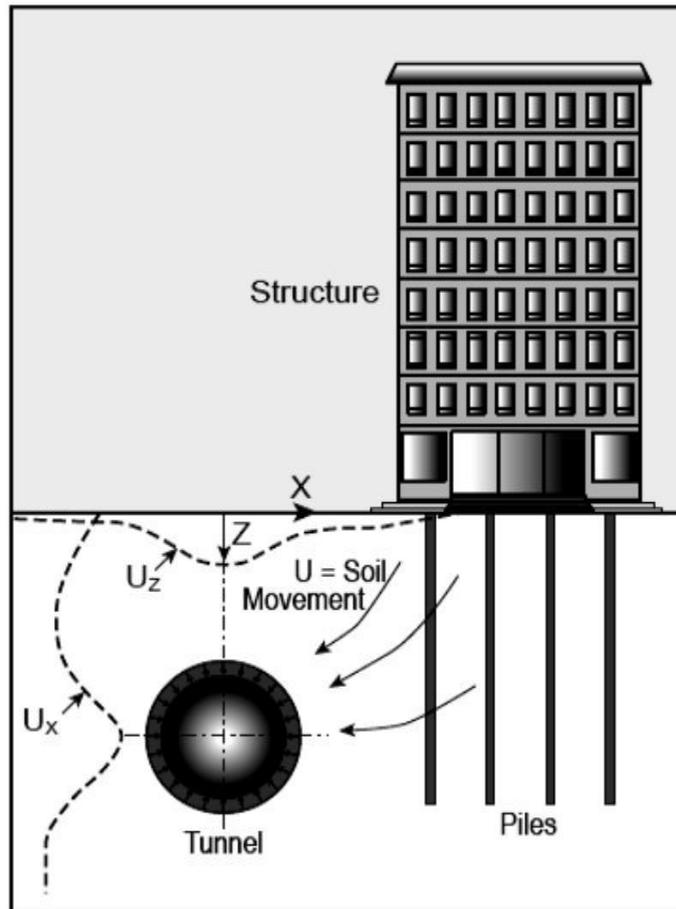


Figure 2.7 L'interaction Tunnel- Fondations profondes (Bousbia, 2016)

La réalisation de tunnels de très grands diamètres ($D > 10$ m) dans certains projets d'aménagement peut poser des problèmes majeurs en site urbain, notamment à cause des risques élevés de tassements en surface et des coûts de réalisation de ces ouvrages. Pour ces raisons, la solution d'un ouvrage bitubes peut être préférée. Cependant, la densité des infrastructures existantes et (ou) la configuration de certains sites peut conduire à des solutions avec des tunnels très rapprochés.

Cette configuration peut alors poser des problèmes d'interaction lors de la construction du deuxième tunnel sur le tunnel existant, en particulier dans les terrains meubles. (Figure 2.8).

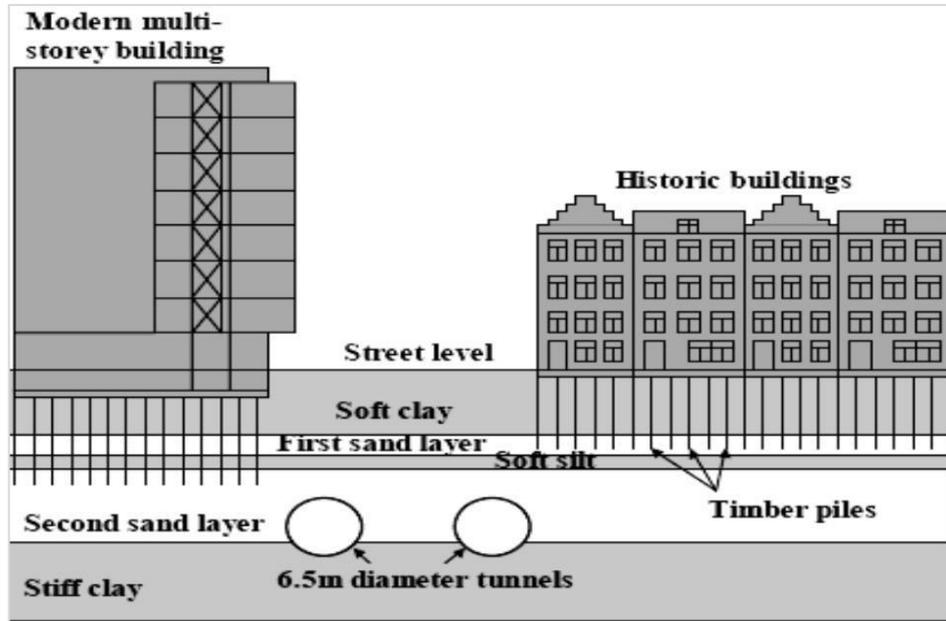


Figure 2.8 Interaction Tunnel-Tunnel (Bousbia, 2016)

De ce fait, les tunnels se trouvent soit sur une même droite horizontale (tunnels parallèles horizontalement), soit sur une même droite verticale (tunnels parallèles verticalement) ou soit sur une droite inclinée (tunnels parallèles inclinés). (Chehade et Shahrour, 2008).



Figure 2.9 Configuration d'interaction Tunnel-Tunnel (Chehade et Shahrour, 2008)

Il a noté que la position relative des tunnels et les procédures de constructions affectent les tassements du sol en surface et les efforts internes dans le revêtement. Le tassement maximum est obtenu pour la disposition des deux tunnels alignés verticalement tandis que les deux tunnels alignés horizontalement donnent un tassement minimal mais avec une large extension latérale.

2.6.4 Interaction Tunnels- Ouvrages existants

Des cas d'interaction entre le creusement d'un tunnel et des ouvrages existants sont investis par plusieurs chercheurs (Mroueh, 1999). On peut trouver l'interaction Tunnel –Fondation profonde : un thème qui a fait l'objet de plusieurs études expérimentales en centrifugeuse. On peut citer pour exemple les travaux de (Bezuijen et Van der Schrier 1994, Hergarden et al. 1996, Van derschrier et al. 1993), dans lesquels les auteurs se sont intéressés aux tassements induits et à la perte de capacité portante d'un groupe de pieux au cours du creusement d'un tunnel. L'essai a comporté deux étapes : La première concernait la mise en place des pieux dans le sol, la deuxième étape concernait la simulation du creusement, par réduction progressive du diamètre du tunnel.

Les auteurs ont montré dans une première série de mesures que les pieux situés à moins de $1,5D$ du centre du tunnel (D diamètre du tunnel) subissent des tassements importants et une forte réduction de leur capacité portante (Figure 2.10). Ils ont aussi établi que les pieux situés à plus de $2,5D$ du centre du tunnel sont peu affectés.

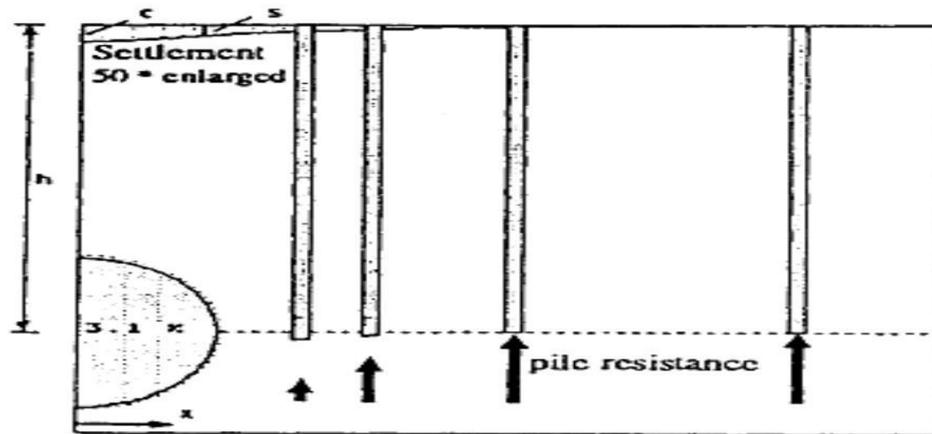


Figure 2.10 Interaction tunnel- Fondations profondes (Bousbia, 2016)

2.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue bibliographique assez générale concernant les ouvrages souterrains, ensuite nous avons présenté un aperçu sur le phénomène de l'interaction sol- structures.

Pour mieux formuler l'interaction entre ouvrages, on doit comprendre en premier lieu le mécanisme d'interaction sol- structure et les déformations qui en résultent, telles que les tassements des sols en surface, les déplacements horizontaux ainsi que les déformations de ces différentes structures.

Le chapitre suivant mettra en exergue ces différents points en se servant de modélisations numériques en 2D s'appuyant sur le code de calcul PLAXIS qui se base sur la méthode des éléments finis.

CHAPITRE 03

**Modélisation numérique de
l'interaction d'ouvrages souterrains**

Table de matières

3.1	INTRODUCTION	3
3.2	OUTIL DE CALCUL PLAXIS 2D	3
3.3	PRESENTATION DU MODELE DE CALCUL	5
3.3.1	LA GEOMETRIE DU MODELE	5
3.3.2	CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX	6
3.3.3	PROCEDURE DE CALCULS.....	7
3.4	RESULTATS DES CALCULS DU MODELE DE REFERENCE.....	9
3.4.1	<i>Maillage éléments finis</i>	9
3.4.2	<i>Déplacements Verticaux</i>	9
3.4.3	<i>Tassement en surface</i>	10
3.4.4	<i>Déplacement vertical au niveau du radier de la trémie</i>	11
3.4.5	<i>Déplacement à la clef du tunnel ferroviaire</i>	12
3.4.6	<i>Déplacements Horizontaux en surface, au niveau des deux parois</i>	13
3.4.7	<i>Diagrammes de déformations des parois moulées</i>	15
3.5	INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU TUNNEL.....	17
3.5.1	<i>Tassements pour différentes profondeurs</i>	17
3.5.2	<i>Déplacement vertical au niveau de radier</i>	18
3.5.3	<i>Déplacement à la clef de tunnel</i>	18
3.5.4	<i>Interprétations des résultats</i>	19
3.6	CONCLUSION	19

3.1 INTRODUCTION

Vu la situation de l'encombrement des systèmes de transports et de certains types d'installations en surfaces, le recours à l'exploitation de l'espace souterrain comme solution est devenue une nécessité depuis quelques décennies pour apporter des solutions à ce genre de problèmes.

Dans les milieux urbains, la modélisation numérique des ouvrages souterrains passe nécessairement par la prise en compte du phénomène de l'interaction entre les différentes structures (bâtiment, tunnel, autre type d'excavation, etc.) d'où l'utilité des études et recherches sur cette thématique,

Dans le chapitre présent, nous nous sommes intéressés à décrire cette interaction en présentant des résultats en termes de tassements et déplacements à différents niveaux (en surface, en clé du tunnel, en radier et dans les parois de la trémie).

Ce sujet a été investi par différents chercheurs dans le but de bien expliquer et comprendre les phénomènes mécaniques accompagnant l'effet de l'interaction entre ouvrages souterrains. Les constats et les résultats issus de ces études permettent de bien prédire la sécurité et la durabilité de ces ouvrages.

Les différentes modélisations sont faites en configuration bidimensionnelle au moyen du code de calcul Plaxis 2D. Pour se faire un exemple de référence est traité et les résultats obtenus seront comparés à travers des études paramétriques.

3.2 OUTIL DE CALCUL PLAXIS 2D

Le développement des méthodes de calcul numérique sur ordinateur (spécialement la méthode des éléments finis) a permis de trouver des solutions à beaucoup de problèmes, les modèles permettent de décrire assez correctement le comportement des sols. Quant aux algorithmes de résolution, leur fiabilité et leur performance dépendent surtout de la méthode de calcul utilisée et des critères de convergence

fixés. Le logiciel de calcul PLAXIS 2D est utilisé dans cette étude, il est fondé sur ces principes et il est connu pour avoir donné par ailleurs des résultats satisfaisants. Le choix de ce logiciel a été motivé par sa disponibilité et sa souplesse, ainsi que par la performance du fait qu'il se prête bien aux objectifs fixés pour l'analyse de la stabilité des tunnels et des pentes.

Il contient les sous programmes suivants :

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

PLAXIS-Input : Le sous-programme Input appelé aussi le pré-processing programme contient tous les outils nécessaires à la création et modifications des modèles géométriques, à l'engendrement des maillages des éléments finis et aux définitions des conditions initiales.

PLAXIS-Calculations : Le processing programme ou le sous-programme de calculs contient les outils nécessaires à la définition des phases et au commencement de la procédure de calcul des éléments finis.

PLAXIS-Output : Ou le programme post-processing contient les facilités pour la visualisation des résultats des différentes phases de calcul comme les déplacements au niveau des nœuds, les contraintes et les forces dans les éléments structuraux etc.

PLAXIS-Curves : Le sous-programme curve sert à la construction des courbes de chargement-déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes.

Dans Ce mémoire, nous avons utilisé un logiciel Nommé PLAXIS qui est basé sur cette

méthode. C'est un logiciel en 2D hollandais développé par l'équipe du Pr. Vermeerl dédié principalement à la géotechnique.

3.3 PRESENTATION DU MODELE DE CALCUL

3.3.1 La géométrie du modèle

Le projet choisi est un cas d'étude vue de voir l'effet de l'interaction entre plusieurs ouvrages : Un tunnel ferroviaire sous la trémie a été rajouté et un autre d'assainissement du côté droit.

Le modèle choisi sera simulé en géométrie plane dans un massif de sol homogène. Il est de 80m de largeur sur 30m de profondeur, il s'agit d'une trémie de 8 m de largeur et de 7m de hauteur, composé de deux voies séparées, un tunnel de diamètre de 6,0m est creusé à une profondeur de 12m directement sous l'axe de la tranchée, le 2^{ème} tunnel est de 4m de diamètre construit au-dessous de l'hôpital à une profondeur de 3m dans le but de créer une conduite d'assainissement.

Le soutènement de la tranchée est assuré par des parois moulées de 7m de profondeur et 35cm d'épaisseur, soutenue par deux des tirants d'ancrage inclinés de 45° par rapport à l'horizontale exposés de part et d'autre de l'excavation (voir figure 3.1).

Les conditions aux limites choisies sont des déplacements horizontaux bloqués sur les deux cotés latéraux et des déplacements verticaux et horizontaux bloqués au substratum.

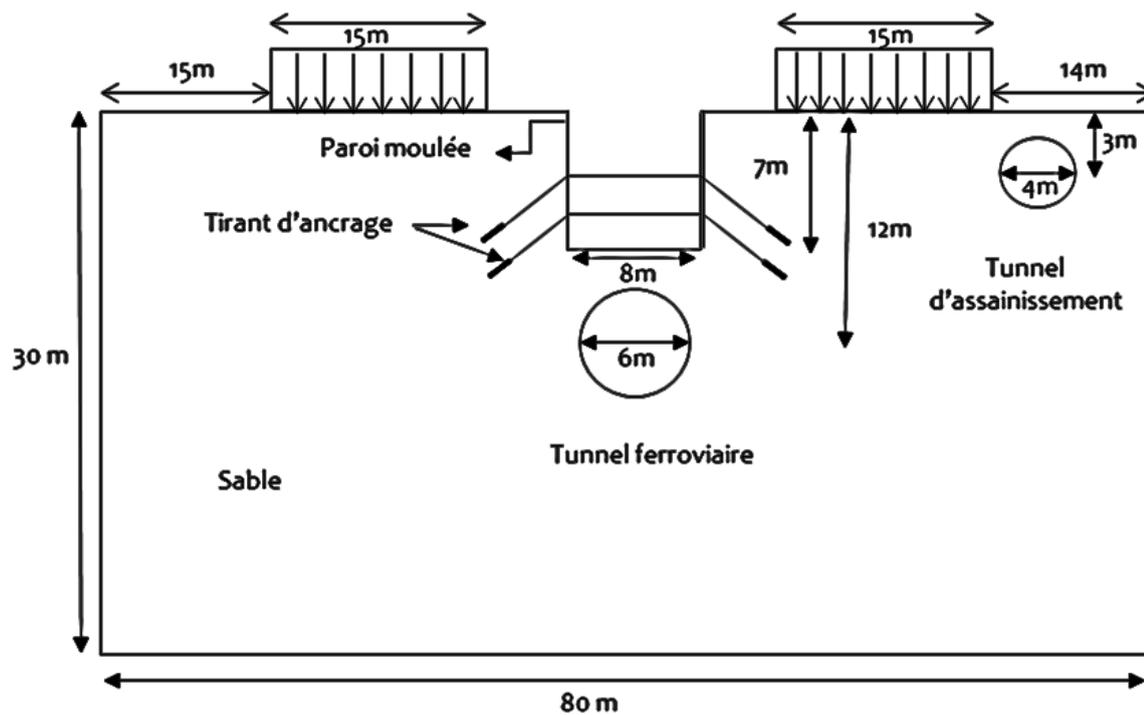


Figure 3.1 Modèle géométrique du projet

3.3.2 Caractéristiques des matériaux

Tableau 3.1 Caractéristiques du sol du modèle de calcul (manuel Plaxis)

Paramètres	Symbole	Sable	Unité
Modèle type	Modèle	MC	-
Condition	Type	Drainé	-
Poids volumique humide	γ_{unsat}	17	kN/m ³
Poids volumique saturé	γ_{sat}	20	kN/m ³
Module de Young	E	20000	kN/m ²
Coefficient de poisson	ν	0,30	-
Cohésion	C	1,0	kN/m ²
Angle de frottement	φ	35	°
Angle de dilatation	ψ	0	°

Les tableaux (3.2) et (3.3) résument les propriétés du revêtement du tunnel et des parois moulées respectivement.

Tableau 3.2 Caractéristiques du revêtement des tunnels (manuel Plaxis)

PARAMETRES	SYMBOLE	REVETEMENT	UNITE
Modèle de matériel		Elastique	
Rigidité normale	EA	$1,4 \cdot 10^7$	kN/m
Rigidité de flexion	EI	$1,43 \cdot 10^5$	kN.m ² /m
Coefficient de Poisson	ν	0,15	-

Tableau 3.3 Caractéristiques des parois moulées (manuel Plaxis)

PARAMETRES	SYMBOLE	VALEURS	UNITE
Modèle de matériel	-	Elastique	-
La rigidité normale	EA	$12 \cdot 10^6$	kN/m
La rigidité flexionnelle	EI	$0,12 \cdot 10^6$	kNm ² /m
Coefficient de poisson	ν	0,15	-

Pour les propriétés de l'ancrage, le tableau (3.4) contient les propriétés de l'ancrage et les ceux des gaines d'ancrages (Les parties scellées).

Tableau 3.4 Caractéristique des tirants d'ancrages (manuel Plaxis)

PARAMETRES	SYMBOLE	VALEURS	UNITE
Ancrage	EA	$2 \cdot 10^5$	kN/m
Gaines d'ancrage	EA	$1 \cdot 10^5$	kN/m

3.3.3 Procédure de calculs

Le calcul du modèle de référence se fait défini en 8 phases dans l'ordre :

Phase 0 :

- Initiation des contraintes (procédure Ko) ; on détermine les contraintes effectives initiales.

Phase 1 :

- Activer les parois moulées
- Activer les charges surfaciques et attribuer une valeur de charge de 10 kN pour la charge de droite et de 5 kN pour la charge de gauche.

L'excavation et l'activation des tirants seront décomposée en 5 étapes correspondant au phasage des travaux :

Phase 2 :

- On désactive le premier élément de l'excavation, 1^{ère} tranche à 2 m de profondeur.

Phase 3 :

- On active le premier niveau de l'ancrage et les Géogrilles et ajuster la force de précontrainte de 120 KN/m

Phase 4 :

- On désactive le deuxième élément de l'excavation, 2^{ème} tranche de l'excavation à 4 m de profondeur.

Phase 5 :

- On active le deuxième niveau de l'ancrage et les gaines d'ancrages et ajuster la force de précontrainte de 200 KN/m

Phase 6 :

- On désactive le troisième élément de l'excavation, 3^{ème} tranche de l'excavation à 7 m de profondeur.

Phase 7 :

- Creuser le 1^{er} tunnel
- Activer le revêtement

- Entrer la contraction de 2 %

Phase 8 :

- Creuser le 2^{ème} tunnel
- Activer le revêtement
- Entrer la contraction de 2 %

3.4 RESULTATS DES CALCULS DU MODELE DE REFERENCE

Dans cette partie, les résultats concernant les tassements en surface, les déplacements verticaux au niveau de la clé du tunnel, en radier, au niveau des deux parois de gauche et de droit de l'excavation sont présentés pour le modèle de référence. Par la suite, ces résultats seront comparés à travers des études paramétriques.

3.4.1 Maillage éléments finis

Le maillage élément fini retenu dans la figure (3.2) est triangulaire (imposé par plaxis).

Dans cet exemple, l'élément à 15 nœuds a été choisi

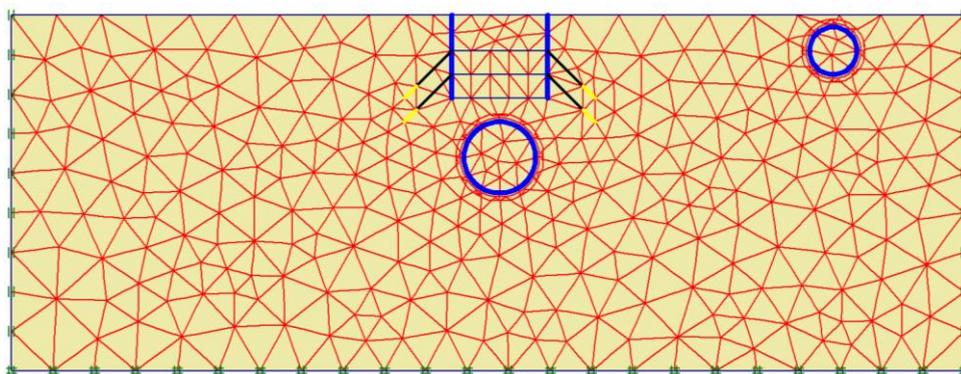


Figure 3.2 Maillage éléments finis

3.4.2 Déplacements Verticaux

La figure (3.3) montre les déplacements verticaux pour le modèle de référence.

Nous remarquons un certain refoulement au niveau du radier de la trémie et au niveau du tunnel au-dessous causé probablement par la nature du sol et des phases des

constructions des différentes structures.

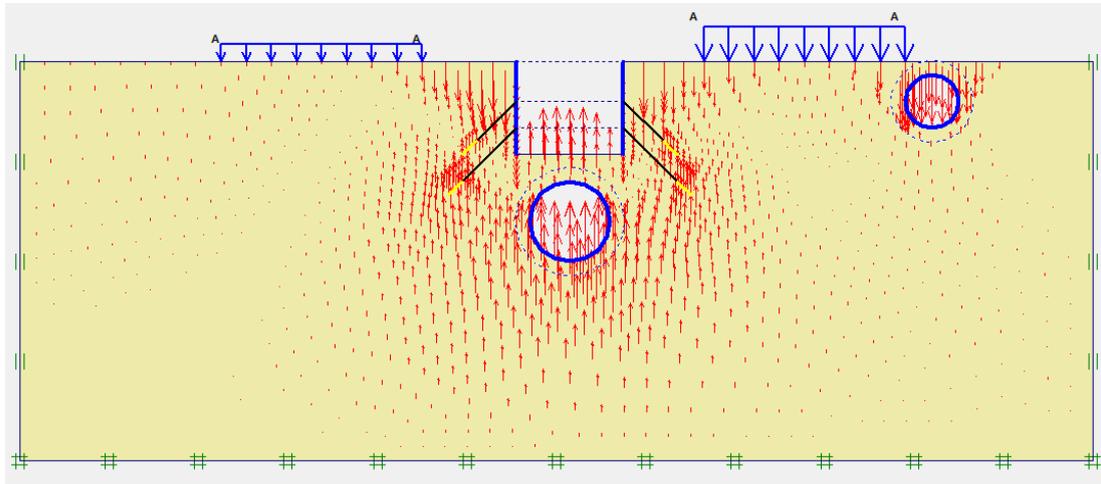


Figure 3.3 déplacements verticaux

3.4.3 Tassement en surface

La figure (3. 4) présente la distribution du tassement au niveau de la surface naturelle.

Nous avons coupé en surface en vue de voir ces tassements.

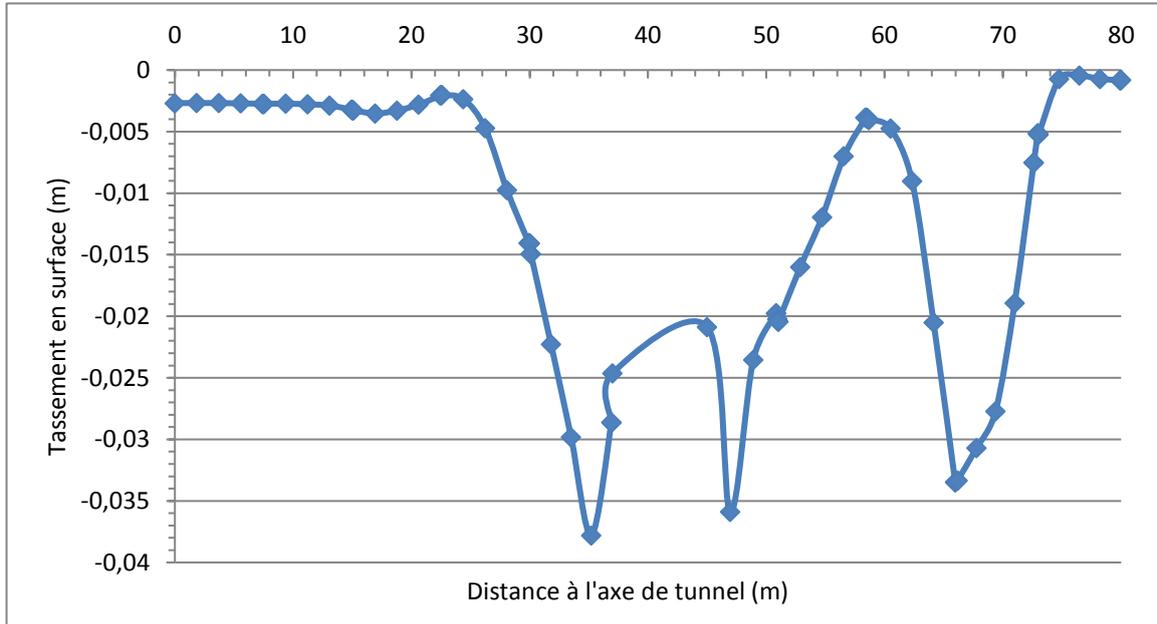


Figure 3.4 Courbe de tassement en surface

Les remarques suivantes ont été distinguées :

1. De 0 à 15 m, un tassement négligeable en surface dû à l'absence de la surcharge est obtenu.
2. Un tassement maximum de 38mm est localisé entre 25 à 35m causé par la poussée des terres et la surcharge du bâtiment de gauche.
3. Un soulèvement au niveau du radier de la trémie.
4. Un tassement maximum de 36mm est localisé à 47 m.
5. Un tassement maximum de l'ordre de 33mm est situé à 66m de distance causée par la présence de l'hôpital et le tunnel d'assainissement.

3.4.4 Déplacement vertical au niveau du radier de la trémie

Dans cette partie, nous avons coupé au niveau du radier pour voir les déplacements au niveau du radier de la trémie. La figure (3.5) montre les mouvements du sol à cet endroit, Ceci nous a permis d'examiner le comportement du sol au fond de la tranchée.

Il est clairement constaté qu'un soulèvement surgit au-dessous du radier qui disparaît ensuite s'expliquant par la présence des bâtiments en surface aussi nous pensons que c'est dû aux propriétés des parois moulées.

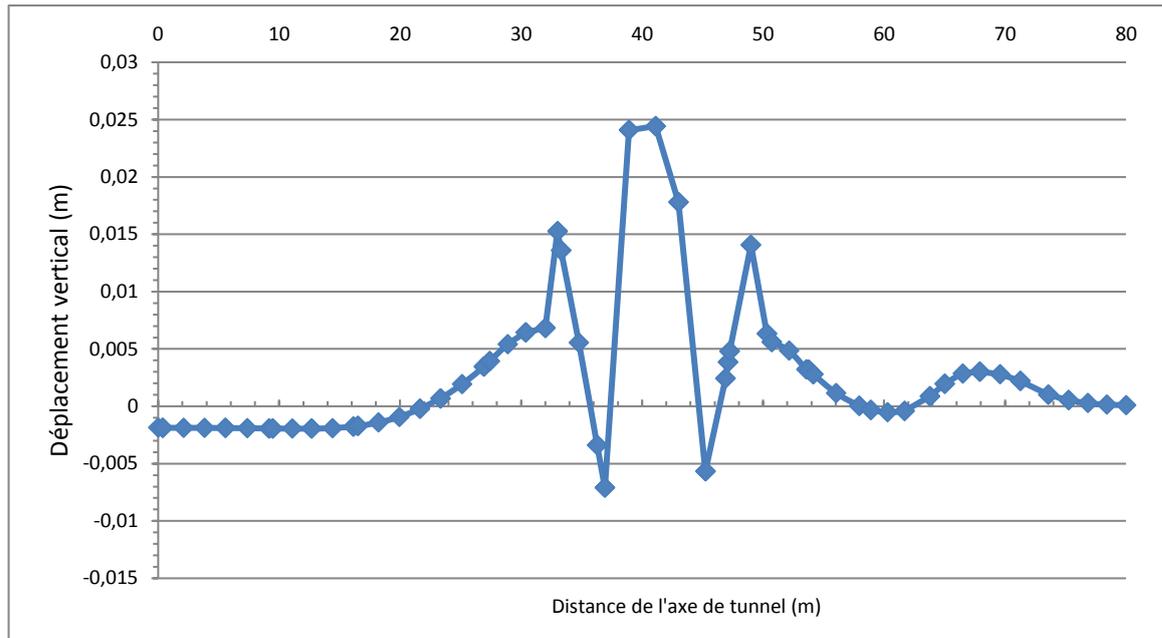


Figure 3.5 Déplacements verticaux au niveau du radier de la trémie

3.4.5 Déplacement à la clef du tunnel ferroviaire

En coupant à la clef du tunnel, les résultats obtenus ont montré que les déplacements sont importants pour les zones proches du tunnel et diminuent en s'éloignant de ce dernier jusqu'à ce qu'ils s'annulent.

Cette importance est due à la propagation des mouvements de sols causés par le mouvement de convergence à l'intérieur du tunnel.

Nous avons pu constater, en parallèle, à travers cette figure (figure 3.6) que les déplacements en clé ne sont plus complètement influencés par l'existence des structures contrairement au cas du radier de la trémie.

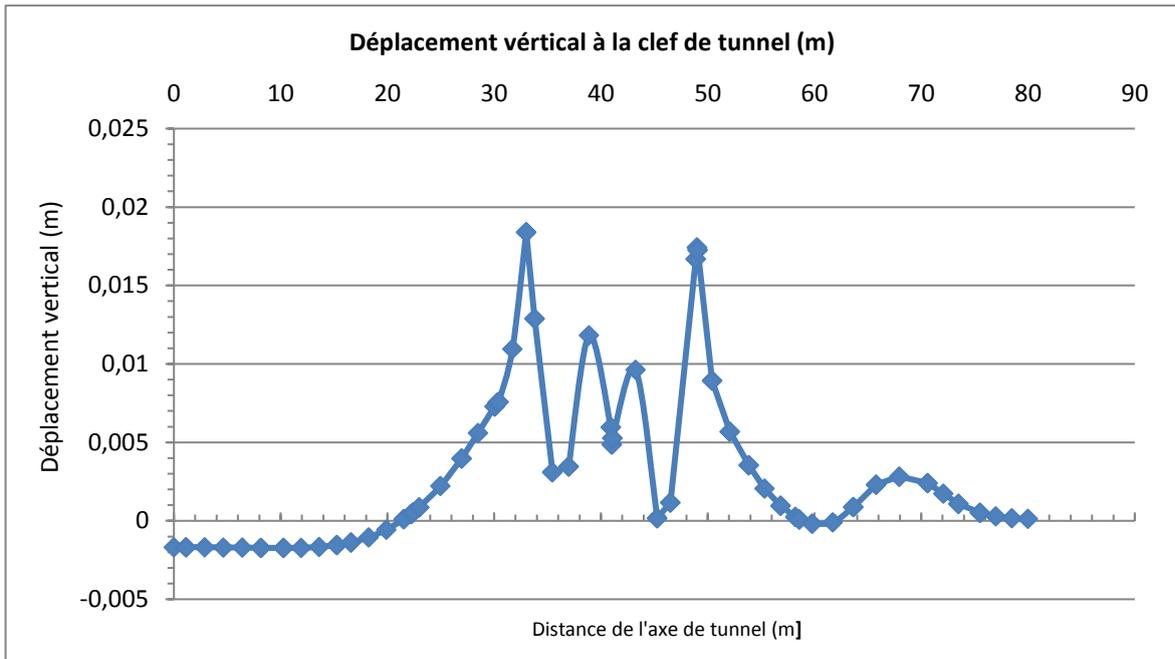


Figure 3.6 Déplacements verticaux en clef du tunnel

3.4.6 Déplacements Horizontaux en surface, au niveau des deux parois

Lorsque des tunnels sont construits dans des milieux urbains, des déplacements horizontaux peuvent causer des dommages aux structures surtout dans le cas d'interactions entre plusieurs ouvrages géotechniques (Tranchée, tunnels, mur de soutènement)

La figure (3.7) montre les déplacements horizontaux, nous remarquons une certaine concentration des déplacements horizontaux au niveau des parois

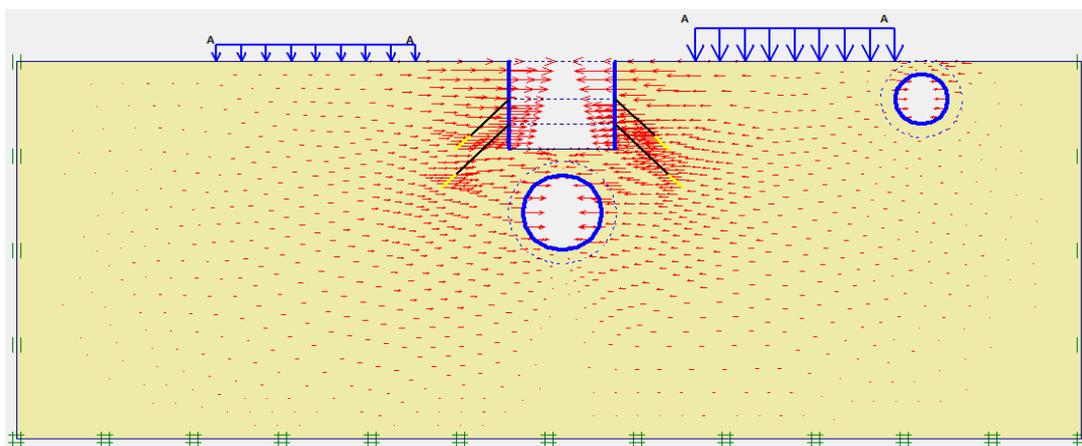


Figure 3.7 Déplacements horizontaux

La courbe de la figure (3.8) présente les déplacements horizontaux en surface en fonction de la distance, nous remarquons un déplacement horizontale négligeable jusqu'à une distance de 25m (à la moitié de l'étendue du bâtiment de gauche),

En s'approchant de la paroi de gauche, une augmentation apparait du déplacement horizontal qui atteindra 68mm à une distance de 37m (positon exacte de la paroi gauche).

Ensuite, nous observons le même déplacement (68mm) à la paroi de droit qui diminue jusqu'à s'éliminer à la fin du model.

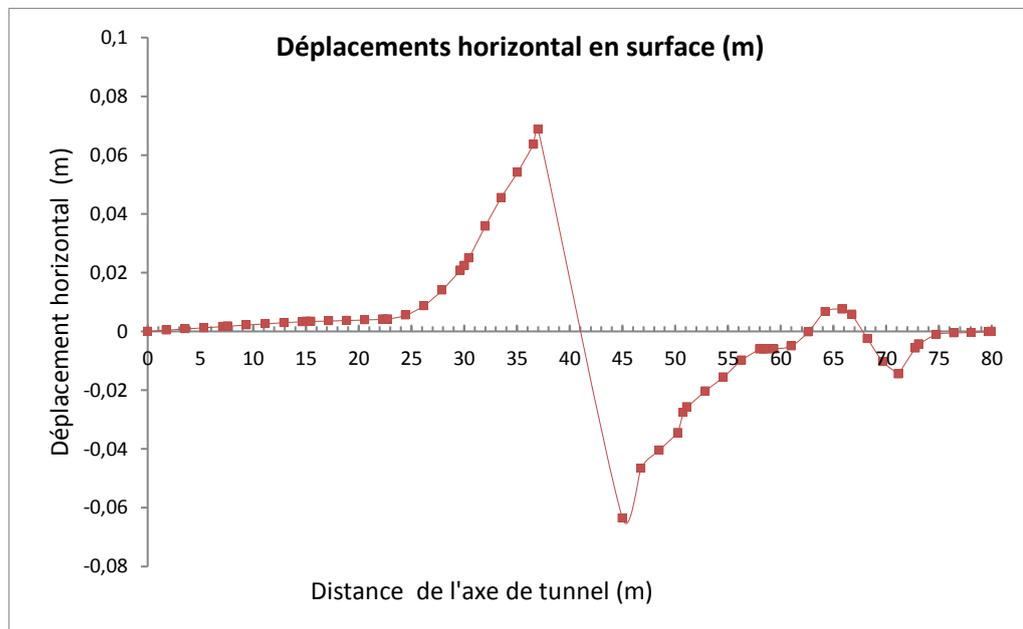


Figure 3.8 déplacements horizontal en surface

La figure (3.9) représente les résultats concernant l'évolution des déplacements horizontaux des parois gauche et droite. Pour cela, nous avons coupé verticalement au niveau des parois gauche et droite.

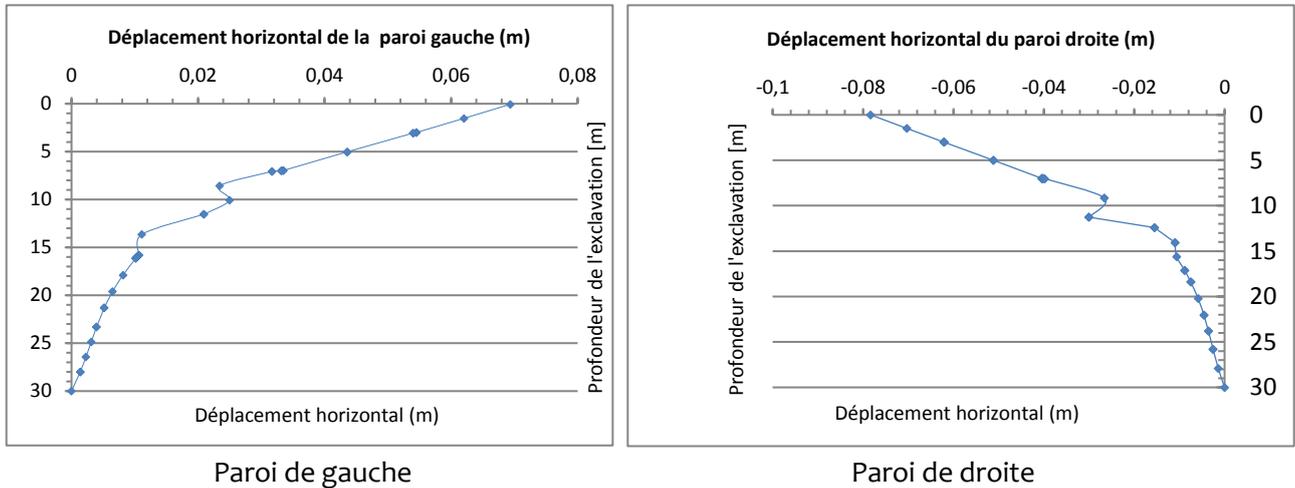


Figure 3.9 Déplacement horizontal des parois gauche et droite

On remarque que les deux parois se déforment de la même manière mais non pas de la même valeur où on note des valeurs maximales 80 mm sur la paroi droite de l'excauation à cause de la structure en surface de 10KN/m, ceci peut être considérée comme une pression horizontale appliquée sur la paroi droite. Ceci nous permet de juger que l'emplacement du bâti a une influence primordiale sur les déformations de ces parois d'où la nécessité de trouver des solutions.

3.4.7 Diagrammes de déformations des parois moulées

Dans cette partie, les déplacements horizontaux (U_x), les déplacements verticaux (U_y), les efforts tranchants (T), les moments (M) et les forces axiales (F) des deux parois sont présentés dans les diagrammes (figure 3.10 a et b).

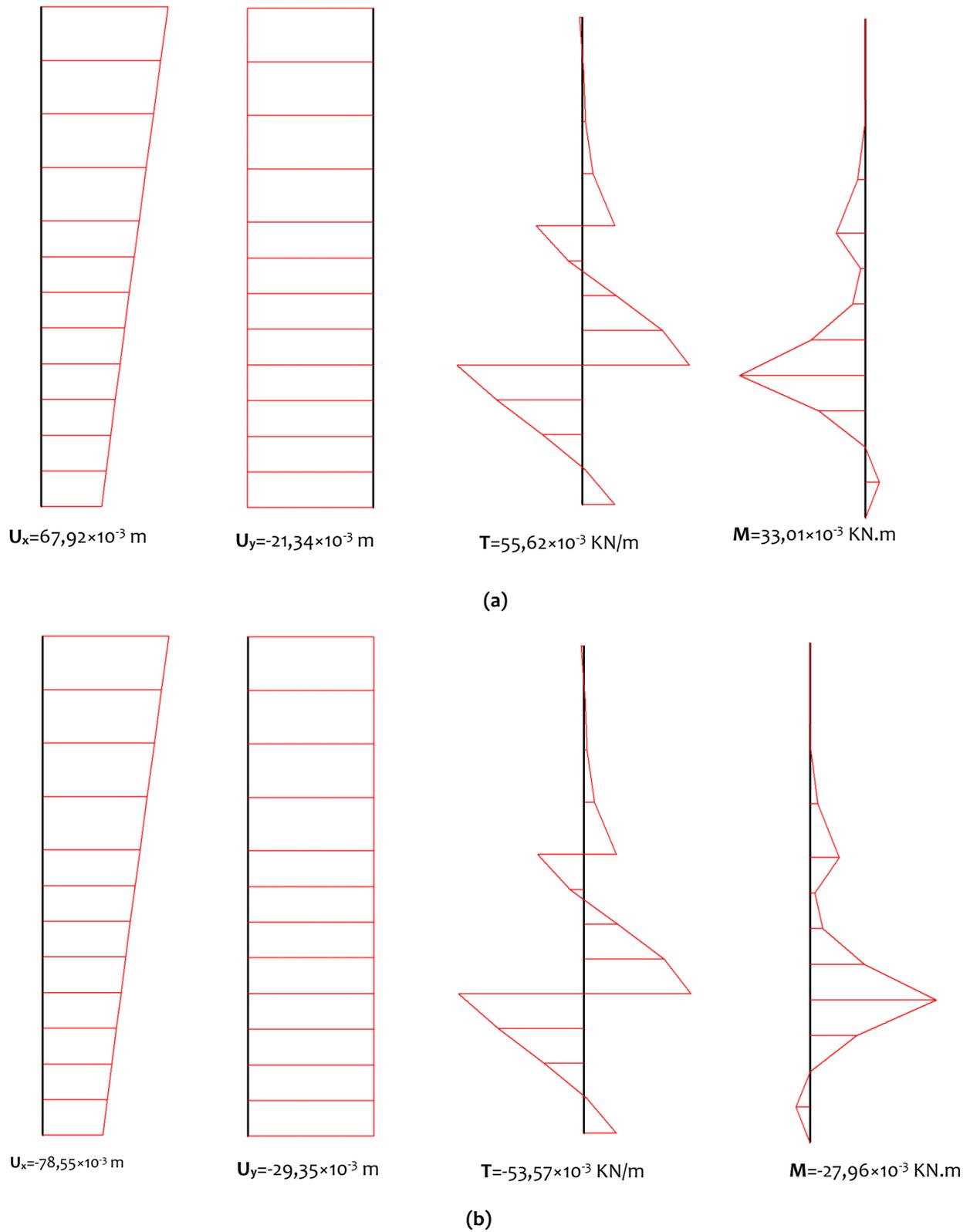


Figure 3.10 Diagrammes des parois moulée : a.Paroi gauche b.Paroi droite

3.5 INFLUENCE DE LA PROFONDEUR DU TUNNEL

Dans ce qui suit, nous nous sommes intéressés à analyser l'influence de la profondeur du tunnel de 6m de diamètre sur les tassements en surface, en radier et en clef du tunnel. Et ceci pour faire un choix optimum.

Les profondeurs adoptées sont : H=15m et H=18m.

Toutes les interprétations seront résumées à la fin de cette partie.

3.5.1 Tassements pour différentes profondeurs

La courbe sur la figure (3.11) présente les tassements en surface pour les différentes profondeurs choisies.

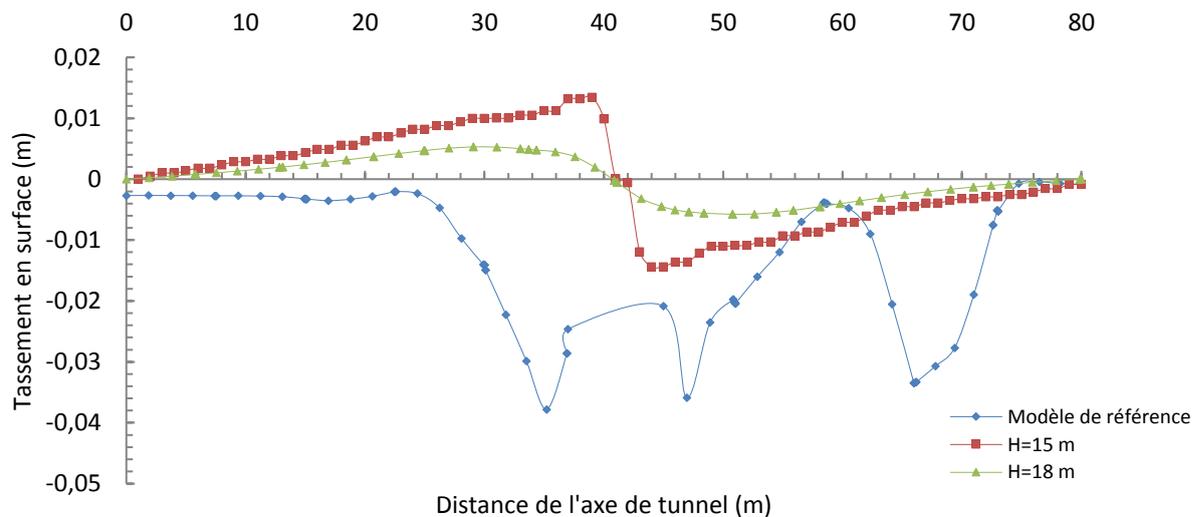


Figure 3.11 Evolution du tassement en surface pour différentes profondeurs

3.5.2 Déplacement vertical au niveau de radier

La figure (3.12) montre l'évolution du déplacement vertical au radier pour les trois profondeurs.

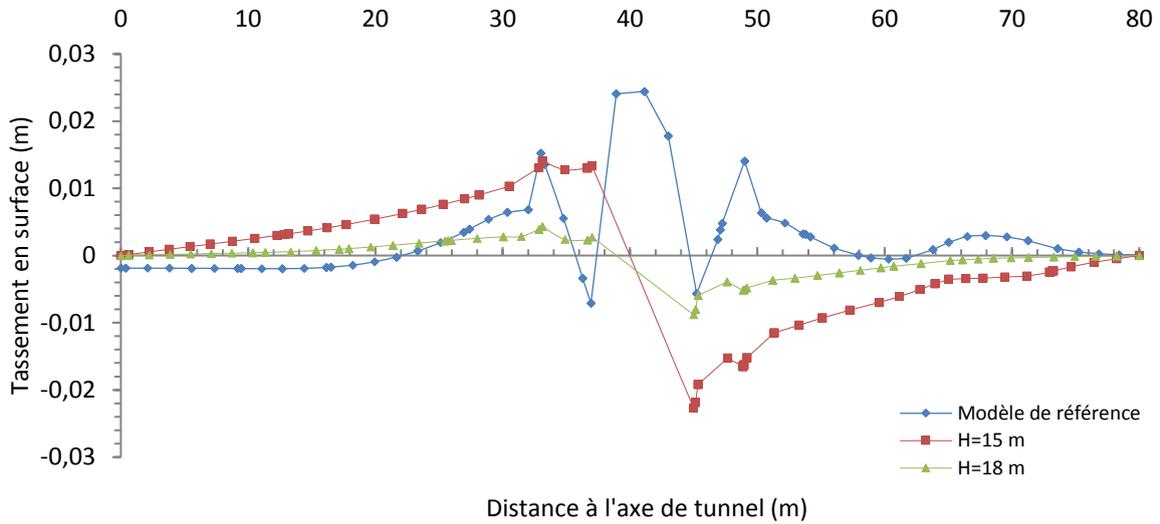


Figure 3.12 Courbes des déplacements verticaux en radier pour différentes profondeurs

3.5.3 Déplacement à la clef de tunnel

Sur la figure (3.13), nous avons coupé à la clef du tunnel pour analyser l'influence de la profondeur sur les déplacements en clé du tunnel.

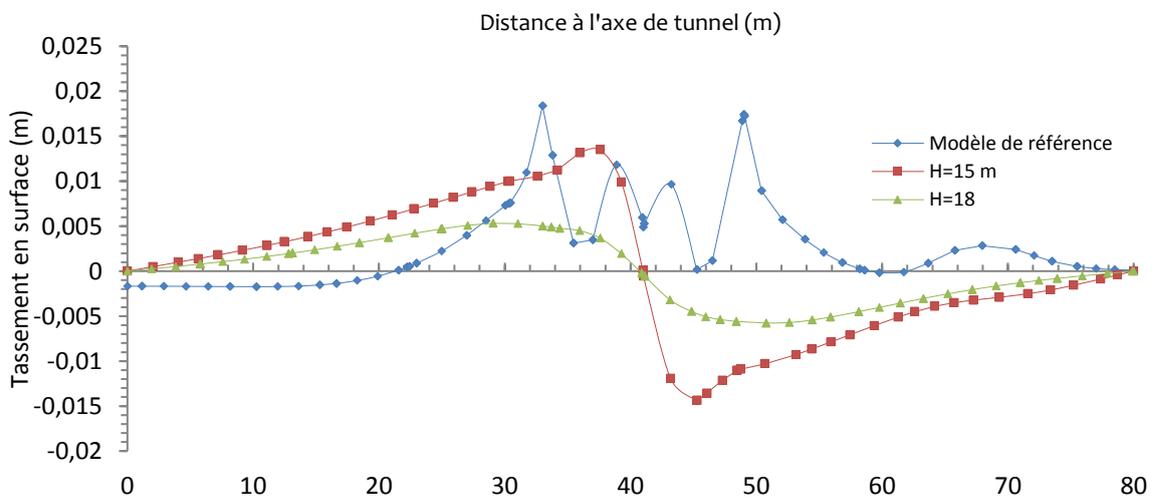


Figure 3.13 Courbes de déplacements verticaux à la clef du tunnel pour différentes

3.5.4 Interprétations des résultats

Pour les trois cas étudiés (en surface, en radier et en clé), nous avons constaté à travers les trois courbes (Figures 3.11, 3.12, 3.13) les points suivants :

- Un refoulement pour les deux profondeurs de 15m et 18m qui débute de l'extrémité gauche du modèle pour atteindre un maximum au niveau de la paroi gauche, dont l'ampleur diffère d'une profondeur à l'autre (causé probablement par les différentes valeurs de profondeur): plus on va en profondeur, plus les déplacements se réduisent.
- Ensuite, les deux profondeurs de 15 et 18m ont causé des tassements différents : la profondeur la plus élevée (18m) présente moins de tassement au contraire du modèle de référence qui est véritablement influencé par les différentes structures.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre des résultats des mouvements associés à la construction de différents types de structures en interaction dans un milieu urbain ont été présentés.

Nous avons effectué des modélisations numériques en 2D sur le cas d'étude en vue de voir l'effet des ouvrages souterrains (deux tunnels et une tranchée) sur les différents mouvements du sol et ceci en termes de déplacements verticaux et horizontaux à différents niveaux : En surface, en radier et aux parois de la trémie et à la clé du tunnel ferroviaire.

Cette étude a montré qu'il existe un tassement tout au long de la surface pour le modèle de référence, Il est aussi constaté que les déplacements en clé sont importants pour les zones proches du tunnel et diminuent en s'éloignant de ce dernier jusqu'à ce qu'ils s'annulent.

Il est clairement constaté qu'un soulèvement surgi au-dessous du radier qui disparaît ensuite s'expliquant par la présence des bâtiments en surface aussi nous pensons que

c'est dû aux propriétés des parois moulées.

La suite des simulations concerne l'analyse de l'effet de la profondeur du tunnel ferroviaire sur les mouvements du massif encaissant à différents niveaux. Les deux profondeurs de 15 et 18m ont causé des tassements différents : la profondeur la plus élevée (18m) présente moins de tassement au contraire du modèle de référence qui expose tout au long de la surface.

À cet égard, il apparaît clair que la profondeur du tunnel préexistant peut affecter les ouvrages en surface au-dessus et se limite après avoir dépassé certaine distance.

CONCLUSION GENERALE

De nos jours, les ouvrages souterrains constituent une des meilleures solutions aux problèmes urbains ainsi qu'aux liaisons interurbaines dans les régions montagneuses.

Un large éventail des structures souterraines a été réalisé pour améliorer les conditions de vie en ville. Malgré tous les avantages, leur construction représente un challenge pour les ingénieurs.

La construction de ces types d'ouvrages entraîne une modification de l'équilibre préexistant dans le massif encaissant. Cette modification a pour conséquence de provoquer des mouvements qui, souvent, sont répercutés en surface et peuvent être la source d'importants endommagements lorsqu'il s'agit d'ouvrages réalisés en surface.

Le présent travail a eu pour objet d'étudier la réponse du terrain aux interactions structures- excavations et à l'estimation des tassements et des déplacements induits dans le milieu urbain.

Dans ce cadre, l'analyse par éléments finis en deux dimensions est un moyen efficace pour étudier l'influence du creusement des ouvrages souterrains et d'analyser les déplacements induits par la construction dans un milieu environnant, et par là, estimer l'impact des travaux sur les structures avoisinantes.

Afin de mieux positionner notre travail, nous avons commencé par présenter une étude bibliographique consacré à la thématique liée aux mouvements causés par le creusement des tunnels (tassements, déplacement horizontaux) et aux différentes approches possibles pour étudier et prévoir l'évolution de ces mouvements dans le massif lors du creusement, des notions de base sur les ouvrages souterrains et un aperçu général sur la phénoménologie de l'interaction entre différents ouvrages ont été exposées en parallèle. Aussi, certain nombre des travaux réalisés dans ce domaine a été exposé.

Par la suite, des analyses numériques ont été investies afin d'étudier l'influence de ces interactions sur l'ampleur des tassements en surface et des déplacements à différents

niveaux (radier, clé du tunnel, en surface et en paroi de la tranchée).

Les résultats des différentes modélisations numériques ont montré que :

- Les déformations du terrain causées par le creusement des tunnels sont relativement importantes ce qui souligne l'utilité de telles études.
- Le creusement perturbe les conditions initiales du terrain encaissant de telle sorte que la surface du sol devient instable, ce qui peut induire des déplacements latéraux et verticaux.
- Un refoulement du radier de la tranchée causé par les différentes étapes de construction.
- Un tassement en surface perturbé par l'existence des différentes structures.
- Les déplacements en clé du tunnel ne sont plus complètement influencés par l'existence des structures contrairement au cas du radier de la trémie.
- Une concentration des déplacements horizontaux au niveau des parois causé par les poussées des terres.
- Un changement notable des mouvements du sol (soulèvement - tassement) suivant l'avancement du creusement souterrain de la tranchée.
- Plus la distance entre axes de trémie-tunnel augmente, plus les déplacements verticaux de la tranchée diminuent.
- Pour avoir moins de tassement en surface il est souhaitable d'augmenter la distance entre le tunnel et la trémie.
- Enfin, cette étude a mis en évidence clairement l'interaction entre tunnel-trémie

Le travail présenté dans ce mémoire n'est qu'une étape dans l'étude de la modélisation des effets de l'interaction entre plusieurs ouvrages souterrains, il pourrait être prolongé de telle façon à :

- Modifier la nature du sol en vue d'étudier son influence sur le comportement du massif encaissant.
- Poser un mur de soutènement séparant le tunnel de la structure avoisinante afin

d'analyser l'effet de la réponse du sol à cette procédure.

- Effectuer une étude paramétrique qui met en œuvre la position du tunnel latéralement.

BIBLIOGRAPHIE

1. Akhaveissy A H. 2010. Analysis of tunnel and super structures for excavation. Department Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, P.O. Box 67149-67346. Iran : s.n., 2010.
2. Atkins W. S., and others, 2006. The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground Research report 453, Crown publications, 78 pages.
3. 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 Lorraine.
4. Barla G., Barla M. Discussion on the Full Face Method. FELSBAU, 2004, vol. 22, n°4, pp. 26-30.
5. Barton N., Lien R., Lunde J. Engineering Classification of Rock Masse for the design of Tunnel Support. Rock Mechanics, 1974, vol. 6, N° 4, pp. 189-236.
6. Bernat, S (1996) Modelisation du creusement d'un tunnel en terrain meuble. Qualification sur chantier experimental. Lyon, ingénieur de lecole centrale de lyon.
7. Bezouen A. & Van der Schrier J.S, "The influence of bored tunnel on pile foundations", CENTRIFUGE'94, Leung, Lee & Tan (eds), Balkema, Rotterdam, ISBN 90- 5410-352-3, pp. 681-686, 1994.
8. Bousbia N. (2016). Interaction entre ouvrages souterrains. Thèse de doctorat, université de 20 août 1955 - Skikda, Algérie.
9. Celada, B. and Gonzalez, A., Rock mass characterisation of the weak zones at the perthus tunnel, Pro.Of the Ind. Tech. Conf. Ltd on Tunneling under difficult conditions and rock mass classification, Bâle,1997, pp.75-86.
10. CENTRE DES ETUDES DES TUNNELS (C.E.TU) (1998). Dossier pilote des tunnels génie civil. Section 1: introduction. Section 3: conception et dimensionnement. Section 4: procédés de creusement et de soutènement.
11. Chaffois, Modélisation numérique des sols pulvérulents sollicités au cisaillement ou en compression triaxiale vraie – Application aux tunnels et aux pieux, Thèse INSA Lyon, 1991., 302 p
12. Chen, L. T., Poulos, H. G. and Loganathan, N., "Pile responses caused by tunneling", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125 (3), 207-215, 1999.
13. Cheng, C. Y., Dasari, G. R., Chow, Y. K., and Leung, C. F., "Finite element analysis of tunnel-soil-pile interaction using displacement controlled model." Tunnelling and Underground, 2007.
14. Dias D. (1999). Renforcement du front de taille des tunnels par boulonnage. Etude numérique et application à un cas réel en site urbain. Thèse de Doctorat. Lyon : INSA de Lyon, 320 p.
15. Dolzhenko, N. Étude expérimentale et numérique de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel, développement d'une loi de comportement spécifique. These de doctorat, 2002, INSA Lyon, France, 301p.

16. EL Houari N. (2015). Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration tridimensionnelle .thèse de doctorat, Université Aboubekr Belkaid - Tlemcen, Algérie.
17. EL Houari N., Allal M. A., Abou-bekr N. (2011). Numerical Simulation of the Mechanical Response of the Tunnels in the Saturated Soils by Plaxis. *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 5, N° 01, pp. 09-31.
18. El Houari N., Allal M. A. (2013). Numerical study of the settlement caused by the tunneling in the presence of the flow Arabian Tunnelling Conference & Exhibition 10-11 December 2013. Dubai United Arab Emirates.
19. El Houari N., Allal M. A. (2014). The Settlement of Soft Soil Caused by Tunneling in Presence of Flow. *Electronic Journal Geotechnical Engineering. (EJGE)*. Vol. 19. 2014, Bund. Z
20. El Houari N., Allal M. A., Abou-Bekr N. (2012). *Modélisation Numérique de la Réponse Mécanique Autour des Tunnels* by Nesrine El Houari. Paperback, 188 Pages, Published 2012. ISBN-13: 978-3-8381-8498-2, ISBN: 3-8381-8498-X. http://www.isbns.net/author/Nesrine_El_Houari.
21. El Houari N., Allal M.A., Abou-Bekr N (2008). Ground movement using Plaxis 2D. 20th Canadian Tunneling Conference, Ontario, Canada, 27-28 October 2008.
22. Hage Chehade F., Shahrour I., "Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: Influence of the relative position and construction procedure", *Tunneling and Underground Space Technology*, 23(2), 210-214, 2007.
23. Gesta P., 1994.Travaux souterrains, Article de technique de l'ingénieur. <http://www.techniques-ingenieur.fr/>, 35 pages.
24. Hegarden H J A M, VAN DER POEL T J, VAN DER SCHRIER J S., "Ground movements due to tunneling: Influence on pile foundations", *Proc Int Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Rotterdam: Balkema, 519-524, 1996.
25. Hemerrijckx. E. ET Weidener. D, "Some subsidence experiences with hydrosields", *Tunnels et Ouvrages Souterrains*, No. 128, pp. 102-111, 1995.
26. Idris.J, "Accidents géotechniques des tunnels et ouvrages souterrains – Méthodes analytiques pour le retour d'expérience et la modélisation numérique", Thèse doctorat, 2007.
27. Jacobsz, S. W., Standing, J. R., Mair, R. J., Soga, K., Hagiwara, T. & Sugiyama, "Tunnelling effects on driven piles", *Proc. Int. Conf. Response of buildings to excavation induced ground movements*, London, 2001.
28. JANIN, J. P. (2012). *Tunnels en milieu urbain : Prévisions des tassements avec prise en compte des effets des pré-soutènements (renforcement du front de taille et voûte-parapluie)*. Thèse Doc. Lyon: Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale de l'INSA de Lyon. 267p.
29. KARAKUS M. Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, vol. 22, n° 1, pp. 47-56.
30. Lahmadi A. (2006). *Étude paramétrique de l'interaction entre ouvrages: tunnel – bâtiment – excavation*. Thèse de magistère, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Algérie.
31. Leblais, Y., Andre, D., Chapeau, C., and al., Tassement liés au creusement des ouvrages en souterrain. *Tunnels et ouvrages souterrains*, Novembre /Décembre 1995, N° 132, pp. 379-386.

32. Lee, Y. and Yoo, C., "Behaviour of a Bored Tunnel adjacent to a Line of Loaded Piles", *Tunneling and Underground Space Technology* 21, Issues 3-4, page 370, 2006.
33. Leung, C. F., Chow, Y. K., and Shen, R. F., "Behavior of pile subject to excavation induced soil movement.", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126 (11), 947-954, 2002.
34. Magnan J.P., "Géotechnique 1ère année", tome 2, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 1997.
35. Mémier, B., Madier, C. and Perrodo, M., *Modélisation 3D du creusement d'un tunnel, Tunnels et ouvrages souterrains*, 1995, n° 129, pp. 160-164.
36. Mestat P. et Prat M., "Ouvrages en interaction", HERMES Science Publications, 1999.
37. Modaressi, H., *Modèles numériques pour la prédiction : 1. Des tassements en surface engendrés par l'avancement des tunneliers*, BRGM, 1993, 51 p., rapport.
38. Mroueh H. (1998). *Tunnels en site urbain : Modélisation numérique et interaction creusement - ouvrages existants*. Thèse de doctorat. : Génie Civil. Ecole Centrale de Lille. France.132p.
39. Mroueh, Hussein. 2003. *Modélisation de l'interaction sol-structures*. Paris, France : s.n., 22 5 2003.
40. Ollier, C., *Etude expérimentale de l'interaction sol-machine lors du creusement d'un tunnel peu profond par tunnelier à pression de boue*, Thèse de l'INSA de Lyon, 1997, 323 p.
41. Purwodihardjo A. *Modélisation des déformations différées lors du creusement des tunnels*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lyon, France, 2004.
42. Rowe, R.K., Lo, K.Y. and Kack, G.J., *A method of estimating surface settlement above tunnels constructed in soft ground*, *Revue canadienne de géotechnique*, 1983, n°20, pp. 11-22.
43. Serratrice J. F., Magnan J. P. (2002). *Analyse et prévision des tassements de surface pendant le creusement du tunnel nord de la traverse souterraine de Toulon*. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, N° 237, pp. 5-36.
44. Swoboda, G., Mertz, W. and Schmid, A., *Three dimensionnal numerical models to simulate tunnel excavation*, *Numerical models in geomechanics NUMOG III*, Elsevier, 1989, pp. 581-586.
45. Van der SCHRIER J.S., Bezuen A., van der BERG P. & HERGARDEN H.J.A.M, "Tunneling in urban aeras, interaction with loaded foundation piles", *Options for tunneling 1993*, H. Burger (ed.), *Developments in Geotechnical Engineering*, Elsevier Science Publishers, pp. 761-770, 1993.