

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Travaux publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'Art

Par: ABDI BILAL & BERRABAH IKRAM

Sujet

**ANALYSE NUMERIQUE DE L'INTERACTION ENTRE
DEUX TUNNELS DANS UN MILIEU URBAIN**

Soutenu le /09/ 2022 , devant le jury composé de :

| | | | |
|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| HAMZAOUI F. | Maitre de conférences | Université de Tlemcen | Président |
| BENCHOUK A. | Professeur | Université de Tlemcen | Examinatrice |
| EL HOUARI N. | Maitre de conférences | Université de Tlemcen | Encadrante |

Année universitaire : 2021 /2022

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos chers parents que nous aimons par-dessus tous, et pour l'éducation qu'ils nous ont donnée et qui nous a permis avec l'aide du BON DIEU d'arriver là où nous sommes.

Nous aimerons exprimer toute notre gratitude et notre profonde reconnaissance pour tous les sacrifices que vous avez fait sans jamais renoncer un jour ; vous étiez pour nous une vraie source d'inspiration, pour nous c'est la meilleure façon de vous honorer et vous montrer que vous avez été magnifique et aussi sans oublier nos familles et nos amis qui ont été présents et à qui nous leur souhaitons plus de succès.

A toute la promotion 2021/2022

A tous ceux que nous aimons, merci

Abdi Bilal & Berrabah Ikram

Remerciements

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

Nous tenons à remercier, aussi, vivement et respectueusement, Mr Hamzaoui Fethi Maitre de conférences à l'université de Tlemcen qui nous a fait l'honneur de présider ce jury. Nous remercions aussi Mme Benchouk Assia Professeur à l'université de Tlemcen d'avoir bien voulu examiner ce mémoire.

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

Merci à tous

RESUME

L'analyse des mouvements induits par le creusement des tunnels est de grande utilité dans l'ingénierie souterraine afin de les prévenir. Dans ce mémoire, des analyses numériques, accompagnées de calculs empiriques sont présentés pour estimer l'effet du creusement de tunnels jumeaux parallèles sur le comportement du massif encaissant. La première étape de l'analyse numérique était de déterminer les déplacements vertical et horizontal du sol en usant d'un modèle de référence tiré de la littérature (Gouw, 2005), les résultats ont été comparés au cas de tunnel singulier. Ensuite, nous avons étudié l'effet de la distance horizontale entre les deux tunnels qui s'est avéré un paramètre très influençant sur les tassements en surface. Des approches empiriques ont été utilisées en parallèle pour comparaison afin de montrer leur intérêt au stade des études préliminaires. Les résultats obtenus corroborent ceux trouvés dans la littérature.

Mots Clés : Tunnels jumeaux, Analyses numérique et empirique, Mouvements de sols, Interaction.

ABSTRACT

The analysis of movements induced by the tunneling is very useful in underground engineering in order to prevent them. In this thesis, numerical analyses, accompanied by empirical calculations are presented to estimate the effect of the tunneling of twin parallel tunnels on the behavior of the surrounding ground. The first step of the numerical analysis was to determine the vertical and horizontal displacements of the ground using a reference model taken from the literature (Gouw, 2005), the results were compared to the singular tunnel case. Then, we studied the effect of the horizontal distance between the two tunnels which turned out to be a very influential parameter on surface settlements. Empirical approaches were used in parallel for comparison in order to show their interest at the stage of preliminary studies. The results obtained corroborate those found in the literature.

Keywords: Twin tunnels, Numerical and empirical analysis, Ground movements, Interaction.

ملخص

يعتبر تحليل الحركات الناتجة عن حفر الأنفاق مفيدًا جدًا في الهندسة تحت الأرض من أجل منعها. في هذه الأطروحة ، تم تقديم تحليلات عددية مصحوبة بحسابات تجريبية لتقدير تأثير حفر الأنفاق المزدوجة المتوازية على سلوك الكتلة الصخرية المحيطة. كانت الخطوة الأولى في التحليل العددي هي تحديد الانتقال العمودي والأفقي للأرض باستخدام نموذج مرجعي مأخوذ من المؤلفات (Gouw، 2005) ، وتم مقارنة النتائج بحالة النفق المفرد . ثم درسنا تأثير المسافة الأفقية بين النفقين والتي أثبتت أنها عامل مؤثر للغاية على الانزلاقات السطحية. استخدمت المناهج التجريبية بالتوازي للمقارنة لإظهار أهميتهم في مرحلة الدراسات الأولية. النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد تلك الموجودة في المؤلفات. استخدمت المناهج التجريبية بالتوازي للمقارنة لإظهار أهميتهم في مرحلة الدراسات الأولية. النتائج التي تم الحصول عليها تؤكد تلك الموجودة في المؤلفات ، وتؤيد النتائج التي تم الحصول عليها تلك الموجودة في المؤلفات.

الكلمات المفتاح: الأنفاق المزدوجة، التحليل العددي والتجريبي، الحركات الأرضية ، التفاعل

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

Chapitre 1

| | |
|--|----|
| Figure 1.1 : Endommagement de maison à la suite d'un effondrement en Floride (2006) ... | 7 |
| Figure 1.2 : Tunnel d'A38 saltash (Royaume-Uni) fissuration sur les parois (Idris, 2007)..... | 8 |
| Figure 1.3 : Tempête Alex Alpes-Maritimes en 2020..... | 9 |
| Figure 1.4 : Forme de la cuvette de tassement (Dolkhenzo, 2002)..... | 9 |
| Figure 1.5 : Déformation d'un bâtiment dû au tassement provoqué par le creusement d'un tunnel (Dolkhenzo, 2002) | 10 |
| Figure 1.6 : Différentes catégories des machines de creusement (El Houari, 2008)..... | 13 |

Chapitre 2

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Le concept de Terzaghi (1946) | 18 |
| Figure 2.2 : Cuvette de tassement 3D (Vermeer et al. 2005)..... | 23 |
| Figure 2.3 : Mouvements de sol suivant leur position par rapport à l'axe du tunnel (Dias, 1999) | 24 |
| Figure 2.4 : Profil gaussien de la cuvette de surface (Dolzhenko, 2002)..... | 25 |
| Figure 2.5 : Mouvement de sol. Perte de volume (Dolzhenko, 2002)..... | 25 |
| Figure 2.6 : Différentes dispositions de tunnels jumeaux (Divall et Goodey, 2014)..... | 26 |
| Figure 2.7 : Mouvements de sol de tunnels jumeaux creusés avec un décalage a. Tassement en surface. b. Déplacement horizontal (Do et al, 2014)..... | 28 |

Chapitre 3

| | |
|--|----|
| Figure 3.1 : Définition du problème de calcul..... | 33 |
| Figure 3.2 : Modèle éléments finis retenu pour le modèle de référence (Gouw, 2005)..... | 35 |
| Figure 3.3 : Mouvements de sol prédit par Plaxis (Extension longitudinale =45m)..... | 36 |
| Figure 3.4 : Validation du modèle d'étude..... | 36 |
| Figure 3.5 : Cuvettes de tassement en surface (Calcul numérique)..... | 37 |
| Figure 3.6 : Déplacement horizontal (Calcul numérique)..... | 38 |

| | |
|--|----|
| Figure 3.7 : Variation de la distance horizontale entre les deux tunnels..... | 39 |
| Figure 3.8 : Cuvettes de tassement en surface (Calcul numérique)..... | 40 |
| Figure 3.9 : Déplacement horizontal (Calcul numérique)..... | 41 |
| Figure 3.10 : Cuvettes de tassement en surface (Calcul empirique et numérique)..... | 42 |

Chapitre 1

| | |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Classes de désordres selon Cording et Boscardin (1989)..... | 8 |
| Tableau 1.2 : Critères de choix pour le creusement des tunnels (Gesta, 2007)..... | 11 |

Chapitre 2

| | |
|---|----|
| Tableau 2.1 : Classification de Terzaghi (C.E.TU , 2012) | 19 |
|---|----|

Chapitre 3

| | |
|--|----|
| Tableau 3.1 : Caractéristiques du sol pour le modèle de référence (Gouw, 2005)..... | 34 |
|--|----|

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|----------|
| Dédicace | I |
| Remerciements..... | II |
| Résumé..... | III |
| Abstract..... | IV |
| ملخص..... | V |
| Liste des figures et tableaux..... | VI |
| Table des matières..... | VIII |
| | |
| INTRODUCTION GÉNÉRALE..... | 1 |
| | |
| Chapitre 01 : Etude bibliographique sur les ouvrages souterrains | |
| | |
| 1.1 INTRODUCTION..... | 3 |
| 1.2 NOTIONS DE BASES SUR LES OUVRAGES SOUTERRAINES | 4 |
| 1.2.1 Les ouvrages à faible profondeur..... | 4 |
| 1.2.2 Les ouvrages à grande profondeur..... | 4 |
| 1.3 METHODES D'EXECUTION DES TUNNEL..... | 5 |
| 1.4 RISQUES LIÉS AUX INSTABILITÉS DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS..... | 6 |
| 1.4.1 Les Effondrements..... | 6 |
| 1.4.2 Les désordres..... | 7 |
| 1.4.3 Les inondations..... | 8 |
| 1.4.4 Les tassements en surface..... | 9 |
| 1.5 CHOIX DES TECHNIQUES DE CREUSEMENTS D'UN TUNNEL..... | 11 |
| 1.5.1 Creusement à l'explosif..... | 12 |
| 1.5.2 Technique de creusement mécanisé..... | 12 |
| 1.5.2.1 Machines de creusement des tunnels..... | 13 |

| | |
|---|----|
| 1.5.2.2 Machines de construction des tunnels (TBM)..... | 13 |
| 1.6 CONCLUSION..... | 14 |

Chapitre 02 : Méthodes de calcul des tunnels

| | |
|--|----|
| 2.1 INTRODUCTION..... | 15 |
| 2.2 DESCRIPTION DES METHODES DE CALCUL..... | 16 |
| 2.2.1 Méthodes empiriques..... | 17 |
| 2.2.1.1 Méthode de l'AFTES..... | 17 |
| 2.2.1.2 Méthode de TERZAGHI..... | 17 |
| 2.2.2 Méthodes analytiques..... | 19 |
| 2.2.2.1 La méthode de convergence-confinement (MCC)..... | 20 |
| 2.2.3 Méthodes numériques..... | 21 |
| 2.3 PREDICTION DES TASSEMENTS DANS LES TUNNELS..... | 22 |
| 2.3.1 Cas d'un tunnel singulier..... | 22 |
| 2.3.2 Cas de tunnels jumeaux..... | 25 |
| 2.4 Tassement de deux tunnels..... | 27 |
| 2.5 CONCLUSION | 29 |

Chapitre 03 : Effet du creusement de deux tunnels sur le comportement du massif encaissant

| | |
|---|----|
| 3.1 INTRODUCTION..... | 30 |
| 3.2 APERÇU SUR L'OUTIL DE CALCUL : PLAXIS V 8.2..... | 31 |
| 3.3 PRESENTATION D'UN CAS D'ETUDE | 32 |
| 3.3.1 Définition du modèle de référence..... | 32 |
| 3.3.2 Caractéristiques des matériaux..... | 34 |
| 3.3.3 Modélisation par éléments finis- Maillage retenu..... | 34 |
| 3.3.4 Vérification du modèle d'étude..... | 35 |

| | | |
|--------|--|-----------|
| 3.4 | RESULTATS ET DISCUSSIONS..... | 37 |
| 3.4.1. | Tassement en surface..... | 37 |
| 3.4.2 | Déplacement horizontal..... | 38 |
| 3.5 | Variation de la distance horizontale entre les deux tunnels..... | 39 |
| 3.5.1 | Tassement en surface..... | 39 |
| 3.5.2 | Déplacement horizontal..... | 40 |
| 3.6 | COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES METHODES..... | 41 |
| 3.7 | CONCLUSION | 42 |
| | CONCLUSION GÉNÉRALE..... | 44 |
| | BIBLIOGRAPHIE..... | 46 |

INTRODUCTION GENERALE

Le creusement d'ouvrages souterrains constitue de nos jours une des solutions les mieux adaptées pour la construction des infrastructures de transports routiers et ferroviaires. Notre pays connaît un essor assez évolué dans ce contexte d'où l'intérêt majeur que présente de telles études.

Actuellement, à l'égard de l'urbanisation et la congestion du trafic dans les zones urbaines, la nécessité d'étendre les transports en commun en particulier les systèmes de métro augmente considérablement. Ce type de tunnels a tendance à se présenter sous la forme de tunnels jumeaux et proches les uns des autres créant ainsi une sorte d'interaction qui peut induire des mouvements importants dans le massif encaissant.

Ces mouvements se propagent dans toute la masse du sol et peuvent avoir un effet néfaste sur les structures et services et deviennent un facteur très important qui doit être pris en compte dans les études des tunnels.

Les résultats présentés dans ce mémoire mettent en lumière l'intérêt de ce genre d'études consacrées à l'analyse de l'effet du creusement de tunnels jumeaux sur le massif encaissant.

L'étude a comporté une partie bibliographique et une autre numérique et empirique.

Le travail commence par une étude bibliographique divisée en deux chapitres suivie d'une étude d'un modèle de référence tiré de la littérature :

Dans le premier chapitre, nous avons cité des notions de bases sur les ouvrages souterrains, ainsi que les risques et les phénomènes liés aux instabilités dans ce type d'ouvrages, par la suite, nous avons donné un bref aperçu sur les techniques et les procédés de creusement des tunnels y compris la plus répandue : la méthode de creusement au tunnelier pressurisé.

Dans le deuxième chapitre, quelques méthodes permettant la prévision des mouvements engendrés par le creusement des tunnels singuliers et des tunnels jumeaux ont été présentées.

Le dernier chapitre est consacré à des simulations bidimensionnelles de la réponse mécanique d'un massif de sol lors du creusement de tunnels jumeaux parallèles. Nous avons utilisé le code de calcul PLAXIS 2D pour les différentes simulations numériques. Des approches empiriques ont été utilisées en parallèle pour montrer leur intérêt au stade des études préliminaires. Des tassements et des déplacements horizontaux obtenus numériquement ont été présentés et confrontés à des résultats empiriques.

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

Chapitre 1

Etude bibliographique sur les tunnels

1.1 INTRODUCTION

Les projets de tunnels peuvent être différents par leurs profondeurs, leurs géométries, la nature du terrain, la méthode d'excavation, etc. Mais, comme le précise Lunardi (2008), la connaissance du milieu dans lequel on opère, de l'action du creusement et de la réaction du massif suite à l'excavation et le choix de techniques de creusement ainsi que des conditions dans lesquelles ces méthodes sont applicables et les différentes modes de soutènement et revêtement sont nécessaires pour tout projet de réalisation d'ouvrage souterrain.

Dans ce chapitre, nous allons citer des notions de bases sur les ouvrages souterrains, ainsi que les risques et les phénomènes liés aux instabilités causés par ce type d'ouvrages. Par la suite, nous donnerons un bref aperçu sur les techniques et les procédés de creusement

des tunnels y compris la plus répandue : la méthode de creusement au tunnelier pressurisé.

1.2 NOTIONS DE BASES SUR LES OUVRAGES SOUTERRAINES

Nous citons ci-après quelques notions de bases sur les tunnels ;

1.2.1 Les ouvrages à faible profondeur

Un ouvrage souterrain à faible profondeur peut être réalisé de deux façons :

- En tunnel : soit par attaque ponctuelle ou au tunnelier, on évitera l'explosif, surtout en zone urbaine, car le risque augmente à cette faible profondeur.
- En tranchée ouverte : On réalise une tranchée à ciel ouvert dans laquelle on construit l'ouvrage. Celle-ci est ensuite remblayée.

Une fois réalisés, ces deux types d'ouvrages se distinguent facilement par leur forme : la tranchée couverte ressemble à une boîte rectangulaire, tandis que le tunnel creusé sous terre est généralement de forme circulaire.

Généralement les tunnels peu profonds, creusés dans des terrains meubles et/ou aquifères, sont les « favoris » des tunneliers, qui ont le grand avantage de pouvoir mieux maîtriser les tassements et de mieux contrôler des désordres dans les bâtiments sus-jacents.

1.2.2 Les ouvrages à grande profondeur

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 ($R_c > 150\text{MPa}$) peuvent avoir un comportement complètement différents lors de leur traversée (Martin, 2012).

La convergence enregistrée pour ce type d'ouvrages est de quelques centimètres, voir décimétrique (alors qu'elle est généralement de quelques millimètres) et donc les soutènements doivent être "flexibles".

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).

1.3 METHODES D'EXECUTION DES TUNNELS

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

Quatre principales méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées :

1 Tunnel dans le rocher :

Méthode traditionnelle à l'explosif.

Méthode par attaque ponctuelle.

2 Tunnel en terrain difficile :

Méthode par pré découpage mécanique.

Méthode de creusement au tunnelier.

Les progrès de ces dernières années dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtement permettent maintenant de réaliser des ouvrages dans tous les types de terrain.

1.4 RISQUES LIÉS AUX INSTABILITÉS DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS

L'excavation en souterrain notamment dans les cas des tunnels urbains cause des risques spécifiques pendant toutes les phases du projet durant sa construction et son exploitation. Les ingénieurs, les ouvriers, la population et les usagers s'exposent à différents risques dont les impacts peuvent être considérables sur leurs sécurités.

Les risques principaux rencontrés dans la construction et l'exploitation de tels ouvrages ont plusieurs origines :

1. Risques géotechniques et géologiques : ces risques sont liés à l'insuffisance des informations obtenues à travers la campagne de reconnaissance, à la capacité de prévoir la réponse du terrain à l'action de creusement ;
2. Risques hydrologiques : les risques hydrologiques sont associés à l'insuffisance des informations recueillies en ce qui concerne l'hydrologie souterraine dans la zone du Projet ;
3. Risques d'étude : liés surtout à la difficulté du projet à s'adapter aux conditions géo mécaniques rencontrées réellement, aux défauts de construction l'expérience du bureau d'étude ainsi qu'aux contraintes contractuelles.
4. Risques de construction ou de creusement : liés au choix de la méthode de construction non appropriée ou mal maîtrisée, aux phénomènes d'instabilité, à l'expérience de l'équipe du constructeur et aux contraintes contractuelles ;
5. Risque opérationnel liés aux défauts de fonctionnement et aux accidents ;
6. Risque financier, lié aux contraintes sociales et politiques, à la non-acceptation des responsabilités, aux contentieux et à la sécurité.

1.4.1 Les Effondrements

Les effondrements représentent une menace concrète sur la stabilité des ouvrages souterrains, notamment pendant la phase de construction. Ils peuvent être liés

directement à une évolution du comportement du terrain encaissant ou à une défaillance mécanique du système de soutènement. Dans les ouvrages situés à faible profondeur, un effondrement se produisant dans le tunnel peut remonter jusqu'à la surface et engendrer des dégâts conséquents.

L'association Internationale des Travaux en Souterrains (AITES) a publié en 2005 les effondrements les plus tragiques des ouvrages souterrains pendant les dix dernières années. (Figure 1.1)



Figure 1.1 Endommagement de maison à la suite d'un effondrement en Floride (2006)

1.4.2 Les désordres

Il s'agit d'un problème affectant une partie d'ouvrage qui se manifeste progressivement ou brutalement. Les causes des désordres sont multiples outre l'évolution défavorable des défauts, l'altération des matériaux, le comportement du terrain encaissant et l'action des eaux (figure, 1.2).



Figure 1.2 Tunnel d'A38 saltash (Royaume-Uni) fissuration sur les parois (Idris, 2007)

Le tableau (1.1) donne les classes de désordres selon (Cording et Boscardin, 1989).

Tableau 1.1 Classes de désordres selon Cording et Boscardin (1989)

| Catégorie de dommages | Degré de sévérité | Déformation limite en extension |
|------------------------------|--------------------------|--|
| 0 | Négligeable | 0-0.05 |
| 1 | Très faible | 0.05- 0.075 |
| 2 | faible | 0.075-0.15 |
| 3 | faible | 0.15-0.3 |
| 4-5 | Sévère à très sévère | >0.3 |

1.4.3 Les inondations

C'est le résultat d'une invasion d'un ouvrage souterrain par une grande quantité d'eau souterraine ou une grande quantité d'eau de pluie, ces phénomènes en résultent d'énormes pertes de matériaux et des arrêts de travail dans les ouvrages souterrains affectés (figure, 1.3).



Figure 1.3 Tempête Alex Alpes-Maritimes en 2020

1.4.4 Les tassements en surface

Le creusement des tunnels et des ouvrages souterrains généralement réalisés à de faibles profondeurs et dans des terrains meubles engendre, souvent, un tassement du sol au-dessus du tunnel, pouvant endommager les infrastructures situées en surface. La cuvette de tassement provoquée à la surface du sol par le creusement d'un tunnel est définie par le tassement maximal (S_{\max}) et la distance du point d'inflexion caractérisant l'extension latérale de la cuvette (Figure 1.4).

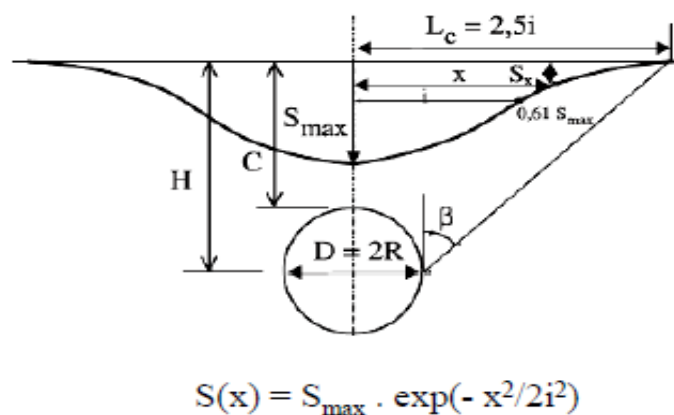


Figure 1.4 : Forme de la cuvette de tassement (Dolkhenzo, 2002)

Avec :

- $S(x)$: tassement vertical à l'abscisse x
- S_{\max} : tassement maximum en surface
- x : représente la distance au centre du tunnel.
- i : abscisse du point à partir de l'axe de symétrie vertical de tunnel.

En milieu urbain, afin d'évaluer les déformations provoquées par le tassement, la construction est assimilée à une poutre fléchie qui subit intégralement les tassements et les déformations du sol de fondation causés par le creusement des tunnels.

Comme le montre la figure (1.5), on distingue deux zones suivant la concavité de la déformation : zone A et zone B.

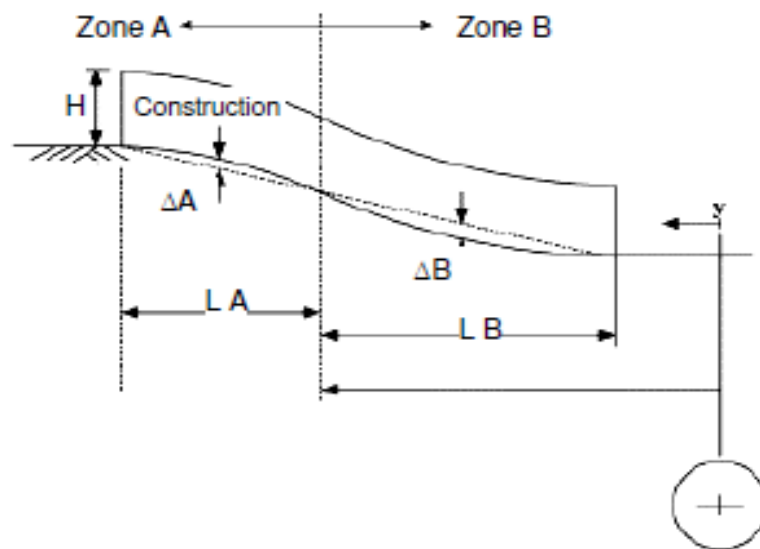


Figure 1.5 : Déformation d'un bâtiment dû au tassement provoqué par le creusement d'un tunnel (Dolkhenzo, 2002)

1.5 CHOIX DES TECHNIQUES DE CREUSEMENTS D'UN TUNNEL

Les critères de choix sont nombreux et leur importance relative varie, parmi ces critères : La nature du terrain, Les exigences de l'environnement, le délai imposé, la nature du matériel existant à l'entreprise.

Le choix est difficile et demande beaucoup d'attention et d'expériences. Néanmoins, on peut dresser le tableau ci-dessous comme d'autres critères de choix :

Tableau 1.2 Critères de choix pour le creusement des tunnels (Gesta, 2007)

| Critères de choix | | Nature de terrain | Matériels | Section du creusement |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|--|-----------------------|
| Méthodes | L'explosif | Toutes les natures de roches | Ne varie pas fondamentalement en fonction du terrain | - |
| | Méthodes mécanisées | Sols homogènes | Varie considérablement en fonction du terrain | - |
| Type de machine | Machine à attaque ponctuelle | Terrain tendre mais cohérent | - | Toutes sections |
| | Machine à attaque globale | Sols homogènes | - | Section circulaire |
| Type de confinement | Bentonite ou air comprimé | Terrain instable | - | - |
| | Confinement pâteux | Terrain hétérogène | - | - |
| Type de tête de coupe | Couteaux | Sols | - | - |
| | Pics à crayon | Roche mi-dur | - | - |
| | Molettes à disques | Roche dure à très dure | - | - |

Ci-après on citera brièvement ces techniques de creusements ;

1.5.1 Creusement à l'explosif

L'exécution des tunnels situés dans les roches dures nécessite généralement l'emploi des explosifs pour lesquels un abattage manuel (marteaux piqueurs, pelle hydraulique) ou un terrassement mécanique (machine foreuse pleine section ou à attaque ponctuelle, brise roche) n'est plus envisageable du point de vue technique ou économique. L'abattage à l'explosif s'effectue pour chaque volée d'avancement de manière cyclique.

1.5.2 Technique de creusement mécanisé

Le souci de réduire certains inconvénients du travail à l'explosif tels que : les risques d'accidents, l'ébranlement de la roche autour de la cavité, les hors profils, les coûts supplémentaires qui en résultent en matière de soutènement a amené les exploitants des mines ainsi que les entrepreneurs à chercher d'autres moyens d'excavation sans l'emploi des explosifs. Ainsi le creusement mécanisé est apparu.

On peut distinguer deux classes de tunneliers selon qu'il s'agit de simples machines de creusement ou de véritables machines de construction de tunnels intégrant les fonctions correspondant à la réalisation d'un ouvrage finalisé de point de vue génie civil.

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

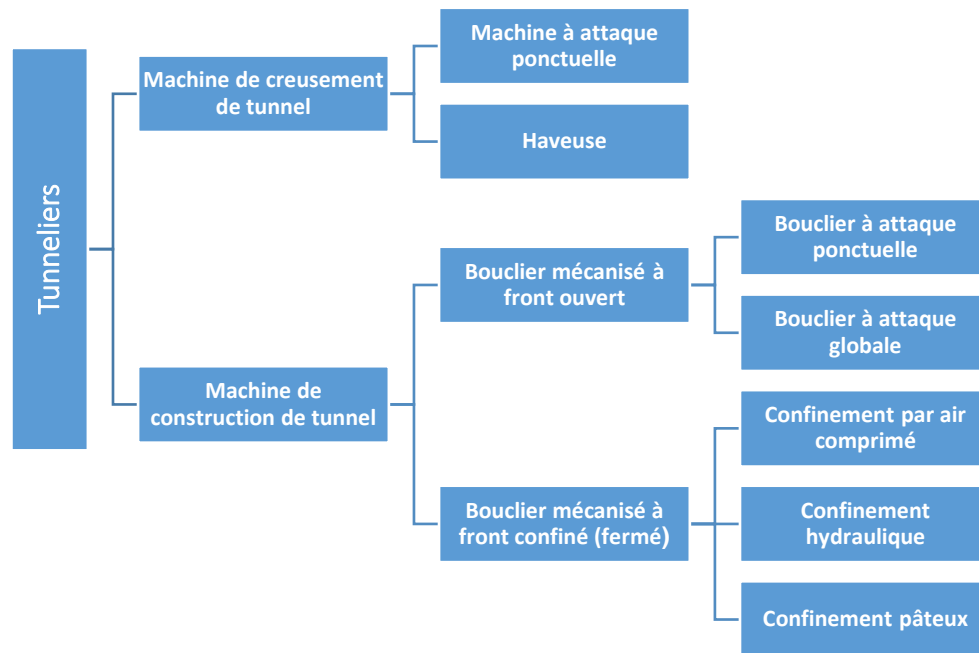


Figure 1.6 Différentes catégories des machines de creusement (El Houari, 2008)

1.5.2.1 Machines de creusement des tunnels

Ce sont des machines d'abattage utilisées dans des travaux souterrains afin d'extraire des matériaux.

Elles ont été initialement utilisées dans les mines pour réaliser un trait, une saignée mince et profonde dans la matière à extraire en vue de réaliser une surface de dégagement pour extraire la roche dans les tailles.

Ensuite, d'autres haveuses ont été créées pour excaver des cavités dans les galeries de mine et dans les tunnels.

1.5.2.2 Machines de construction des tunnels (TBM)

En contraste avec la méthode de creusement conventionnelle, le creusement au tunnelier est complètement mécanisé. Le développement des tunneliers a permis une industrialisation du processus de creusement et par conséquent une réduction considérable des durées de chantiers de tunnels. Ces machines permettent non seulement de réaliser les excavations et d'évacuer les déblais mais procurent aussi un confinement au sol environnant. Dans les meilleures conditions, un tunnelier peut avancer avec une vitesse d'un mètre par heure tout en installant les voussoirs préfabriqués qui jouent le rôle du soutènement définitif ou du revêtement. En revanche, opter pour l'utilisation des tunneliers n'est pas systématiquement le meilleur choix économique surtout si la longueur du tunnel n'est pas importante.

1.6 CONCLUSION

Les travaux civils en souterrain sont des infrastructures sensibles à plusieurs causes qui peuvent menacer pas seulement la stabilité de ces ouvrages, la sécurité des équipements ainsi que des travailleurs et des usagers, mais aussi la sécurité de l'environnement et des ouvrages implantés au voisinage.

À travers ce chapitre, des notions de bases ont été mis en évidence brièvement, sur les ouvrages souterrains et les instabilités rencontrées pendant leur construction on a cité : les 5 catégories principales ; il s'agit des effondrements, des désordres, des inondations et bien sûr des tassements.

Dans le chapitre suivant, il sera question de présenter les principales méthodes de calcul utilisées pour l'estimation des mouvements causés par le creusement des tunnels.

Chapitre 2

Méthodes de calcul des tunnels**2.1 INTRODUCTION**

Le creusement des tunnels engendre des perturbations plus au moins importantes dans l'équilibre interne du massif environnant, créant des déformations et des déplacements dans le sol. Dans les milieux urbains ces mouvements peuvent affecter, en plus, la stabilité des ouvrages avoisinants.

Contrôler et prévenir l'excavation et la stabilité de tels ouvrages passe tout d'abord par le contrôle des déplacements induits par ces excavations. Pour cela, l'ingénieur doit se baser sur différentes méthodes et d'outil fiable qui lui permettront d'évaluer ce champ de déplacement.

Dans chapitre, nous allons présenter quelques méthodes permettant la prévision des mouvements engendrés par le creusement des tunnels singuliers et des tunnels jumeaux.

2.2 DESCRIPTION DES METHODES DE CALCUL

Parmi les problèmes qui se posent au projeteur de tunnel, celui de la vérification de sa stabilité celle du sol environnant. L'absence de règles dans le domaine est souvent compensée par le jugement et l'appréciation de l'ingénieur.

Des méthodes de dimensionnement des ouvrages souterrains ont enregistré de grands progrès durant les dernières décennies. Ces méthodes ont pour objet d'estimer les caractéristiques de soutènement des tunnels et d'évaluer les mouvements du massif encaissant. Passant du stade purement empirique à celui où l'on fait appel à des modèles numériques très développés qui permettent la prise en compte de la complexité du problème traité.

Cependant, aucune de ces méthodes actuelles ne peut prétendre résoudre l'infinité des cas qui s'offrent au projeteur. Néanmoins, il est possible de définir des domaines préférentiels d'utilisation pour chaque méthode de calcul.

Cette partie décrit brièvement les principales méthodes de calcul des tunnels et leur développement.

On peut classer les méthodes de calcul des tunnels dans plusieurs catégories selon les hypothèses principales qui définissent le cadre d'utilisation de chaque méthode. Nous distinguons trois catégories principales de méthodes de calculs :

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

2.2.1 Méthodes empiriques

Au niveau des études préliminaires, les ouvrages souterrains sont fréquemment dimensionnés à partir de classifications des massifs rocheux. En effet, l'art des tunnels est demeuré jusqu'à ces dernières années une science essentiellement empirique dont les spécialistes se constituaient un savoir-faire au travers d'expériences passées, la transmission des enseignements tirés de ces expériences étant soit directe pour les spécialistes suivant eux-mêmes le déroulement des travaux, soit assurée par l'intermédiaire de relations écrites : compte-rendu, rapports...

Pour essayer de structurer ce savoir et de fournir des outils d'aide à la conception, certains auteurs ont très tôt proposé des synthèses sous forme de classifications. Ces méthodes, rapides d'emploi et donc économiques, reposent sur différents paramètres géotechniques. C'est donc le choix de ces paramètres et la façon de les utiliser pour le dimensionnement de l'ouvrage qui va faire la différence d'une méthode à l'autre.

Dans ce qui suit, nous exposons brièvement les méthodes empiriques actuellement les plus utilisées, à savoir celle de :

2.2.1.1 Méthode de l'AFTES

L'AFTES (groupe de travail N°1, 1993) et le (groupe de travail N°7,1993) ont établies des recommandations pour une description des massifs rocheux et des recommandations relatives au choix du type de soutènement en galerie, ces recommandations énumèrent les principaux critères relatifs au terrain encaissant, à l'ouvrage et à son mode d'exécution ainsi qu'à son environnement qui doivent être pris en compte pour effectuer le choix des soutènements.

2.2.1.2 Méthode de TERZAGHI

La méthode de Terzaghi (1946) a proposé que le facteur de charge de la roche (H_p) soit la hauteur de la zone perturbée au-dessus de la tête du tunnel, qui est susceptible de charger le soutènement du tunnel.

Terzaghi a étudié les discontinuités structurales des masses rocheuses. Une vaste expérience acquise dans les tunnels a montré que la roche qui se comprime est en réalité un sol qui se comprime, car une masse rocheuse articulée et faible s'effondre en cas de forte contrainte de surcharge et se comprime dans les tunnels. Terzaghi a combiné les résultats de ses expériences sur les masses rocheuses des tunnels Alpines.

La formule utilisée est (figure 2.1) (Tableau 2.1) :

$$H_p = (b + H_t) \quad (2.1)$$

Avec :

H_p : Hauteur de surcharge de terrain uniformément répartie.

K : Coefficient variable avec la nature et la texture de terrain.

b : Largeur du tunnel.

H_t : Hauteur du tunnel.

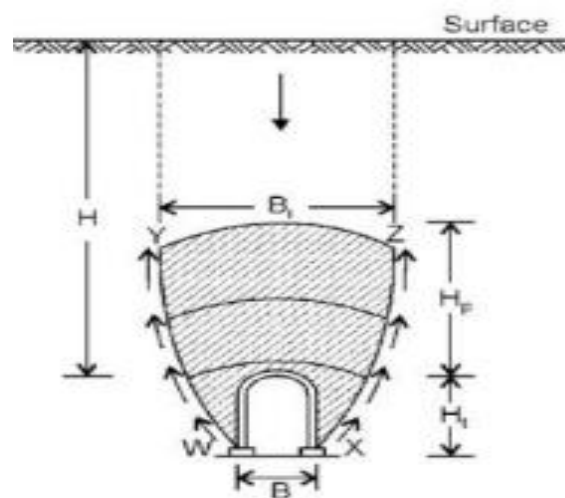


Figure 2.1 Le concept de Terzaghi (1946) de charge de roche dans les tunnels.

Tableau 2.1 Classification de Terzaghi (C.E.TU, 2012)

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

2.2.2 Méthodes analytiques

Cette approche se base sur l'étude d'une façon analytique des déplacements dans un massif de sol pendant l'excavation. Le calcul analytique est d'autant plus utile qu'il permet d'obtenir des ordres de grandeur et de réaliser des études paramétriques par la suite.

Malheureusement, les modèles du calcul analytique des tassements en surface simplifient en général la géométrie et les propriétés mécaniques du terrain et le phasage de l'exécution des travaux. Néanmoins, ils fournissent des clés pour l'analyse des mesures et le choix des formes des profils de tassements de la surface du sol (Dias, 1999). Plusieurs chercheurs ont travaillé afin de développer ces méthodes de calcul destinées à évaluer les mouvements dans le sol, parmi eux : Panet (1969), Resendiz

(1979), Sagaseta (1987), Verruijt et Booker (1996), Verruijt (1997), Loganathan et Poulos (1998) Bobet (2001), Park (2004). (EL Houari, 2008).

Toutefois, leur domaine d'application directe est limité, en raison des hypothèses de calcul très restrictives sur lesquelles elles reposent.

Les méthodes analytiques se basent sur des hypothèses simples visant à simplifier la modélisation du problème rencontré. Ces simplifications portent sur les hypothèses suivantes :

1. La géométrie : le tunnel est supposé à section circulaire et d'axe horizontal.
2. La stratigraphie : on ne prend en compte qu'une seule couche de terrain supposée homogène.
3. La loi de comportement du sol : supposée élastique linéaire ou élasto-plastique.
4. L'état initial de contraintes est supposé isotrope et homogène.
5. Les formules sont exprimées dans le plan et dans le cadre des petites déformations.

La méthode analytique la plus répandue dans le domaine des ouvrages souterrains est :

La méthode de convergence-confinement (MCC) :

Plutôt que de méthode, il conviendrait de parler de concept. Les idées et théories qui sont liées à ces deux termes : convergence et confinement, sont reprises dans toutes les autres approches du dimensionnement.

La convergence est liée à un déplacement, le confinement est la pression radiale qui s'applique sur le pourtour de l'excavation, en présence d'un soutènement. Il constitue en quelque sorte le chargement du soutènement. On parle aussi de déconfinement, mais pour le terrain, il s'agit de la décompression causée par la présence du tunnel. Ce déconfinement s'amorce bien en avant du front (à un diamètre environ).

Pour situer le contexte, cette méthode est née suite au succès de la méthode autrichienne (technique pour la réalisation des tunnels en tranches) dans les années 70. Sa conceptualisation complète remonte au tout début des années 80.

La méthode convergence-confinement est une méthode analytique : toutes les formules sont explicites et peuvent être entrées sur une simple calculette.

L'hypothèse forte est la considération unidimensionnelle du problème :

- Hypothèse des déformations planes.
- Hypothèse d'isotropie des contraintes initiales ($K_0 = 1$) et d'isotropie du massif.
- La cavité étudiée a une forme cylindrique.

Dans la littérature, la méthode convergence-confinement est la préférée des ingénieurs pour sa souplesse, ainsi que pour sa représentativité du terrain et soutènement à la fois. Diverses extensions de cette méthode ont été développées, nous citons la plus récente celle attribuée à Lee et al. (2006) qui ont développé une solution analytique simple de la courbe de réaction du terrain en supposant un régime d'écoulement au sein du massif. Les résultats obtenus analytiquement en été confrontés aux résultats in situ. La validité de cette méthode développée été vérifiée par des travaux numériques.

2.2.3 Méthodes numériques

Les méthodes numériques présentent l'avantage de prendre en compte directement la réponse du terrain et du soutènement, ainsi que d'une grande partie des spécificités du projet (tant sur le plan géométrique que géotechnique). Ses utilisations ont pris une ampleur considérable au cours des dernières années, aussi bien pour des fins de recherche que pour des applications à des projets. Toutefois, des progrès restent nécessaires pour améliorer les moyens de représenter dans le calcul les particularités de

comportement des terrains et les modes de chargements induits par des techniques de réalisation particulières.

Les méthodes numériques permettent d'obtenir le champ des déplacements, contraintes et des déformations en tout point du massif autour de l'excavation ou le soutènement et de traiter une large gamme de problèmes qui sont difficiles voire impossibles à résoudre avec d'autres méthodes.

L'avantage incontestable des méthodes numériques est d'aborder des problèmes théoriques analytiquement insolubles en les remplaçant par une solution numérique approchée.

Ces méthodes sont ainsi généralement utilisées au niveau du projet après un certain nombre d'études plus grossières au moyen de méthodes empiriques et analytiques. Les quatre méthodes numériques les plus répandues sont :

1. La méthode des différences finies.
2. La méthode des éléments distincts
3. La méthode des éléments finis
4. La méthode des éléments frontières

2.3 PREDICTION DES TASSEMENTS DANS LES TUNNELS

2.3.1 Cas d'un tunnel singulier

Les phénomènes s'initiant autour du tunnel se propagent vers la surface en fonction du temps de réponse et de la hauteur de couverture. En effet, les tassements de sol apparaissant en surface lors du creusement d'un tunnel sont le résultat de phénomènes complexes liés à la transmission vers la surface des mouvements engendrés au voisinage direct de l'excavation et on constate l'apparition d'une dépression appelée cuvette de tassement qui progresse avec l'avancement du tunnel.

Ainsi, les tassements de surface dans les milieux urbains 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.

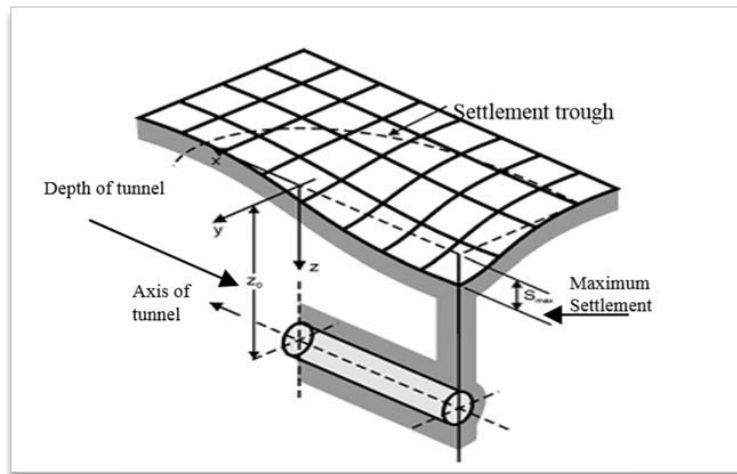


Figure 2.2 Cuvette de tassement 3D (Vermeer et al, 2005)

Les tassements en surface expliquent également le comportement des constructions situées dans les zones en mouvement (figure 2.3).

En fonction de la courbe de tassement, on peut se retrouver dans la situation où deux immeubles accolés ont tendance à s'écartier en tête et tendance à se contrebuter en tête s'ils se trouvent au centre de la cuvette de tassement. Le cas des bâtiments importants affectés par la dépression de tassement est encore plus complexe (Dias, 1999).

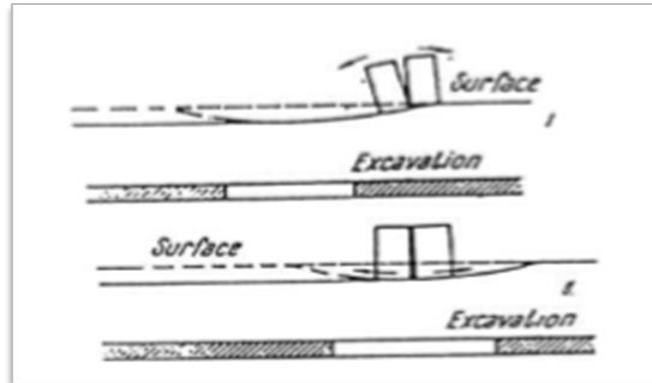


Figure 2.3 Mouvements de sol suivant leur position par rapport à l'axe du tunnel
(Dias, 1999)

Les tassements en surface sont symétriques à l'axe du tunnel. Ceci a été décrit pour la première fois par Marcos en 1958 en utilisant une fonction gaussienne pour représenter le profil de la cuvette de tassement. Au congrès de Mexico (1968), Peck a ensuite proposé une série de mesures de tassements de 14 tunnels creusés dans des massif de sol saturés dont les cuvettes de tassement étaient correctement décrites par une courbe de Gauss (figure 2.4) (cité par Dolzhenko, 2002). La formulation se présente sous la forme suivante :

$$S = S_{max} \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (2.2)$$

Avec :

- $S(x)$: tassement vertical à l'abscisse x
- S_{max} : tassement maximum en surface
- x : distance horizontale depuis l'axe du tunnel.
- i : abscisse du point d'inflexion.

Le tassement maximum S_{max} a été également déterminé en fonction des données expérimentales, différentes formules existantes dans la littérature, on cite la plus répandue :

$$S_{max} = -\frac{0,31V_L D^2}{i} \quad (2.3)$$

i : Point d'inflexion =KH et V_L : est le volume perdu.

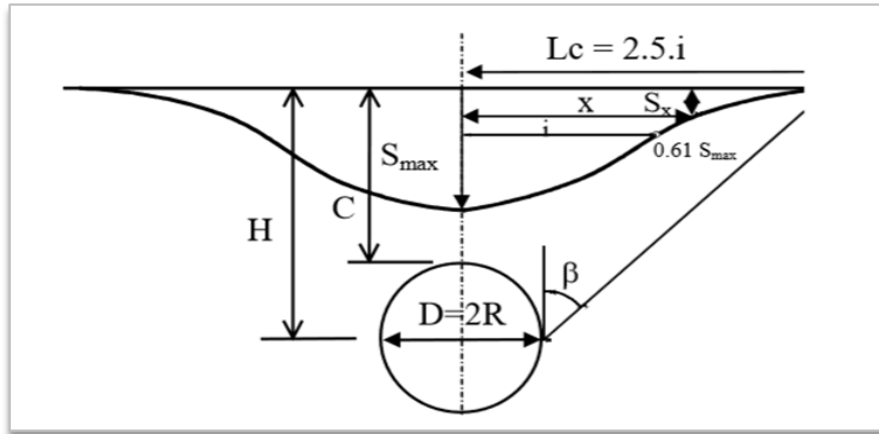


Figure 2.4 Profil gaussien de la cuvette de surface (Dolzhenko, 2002)

Pour une section donnée cette cuvette de tassement en surface est caractérisée par sa largeur (L_c), son tassement maximum (S_{max}), la profondeur (H) et le diamètre du tunnel (D), la nature du massif et la perte de volume (figure 2.5).

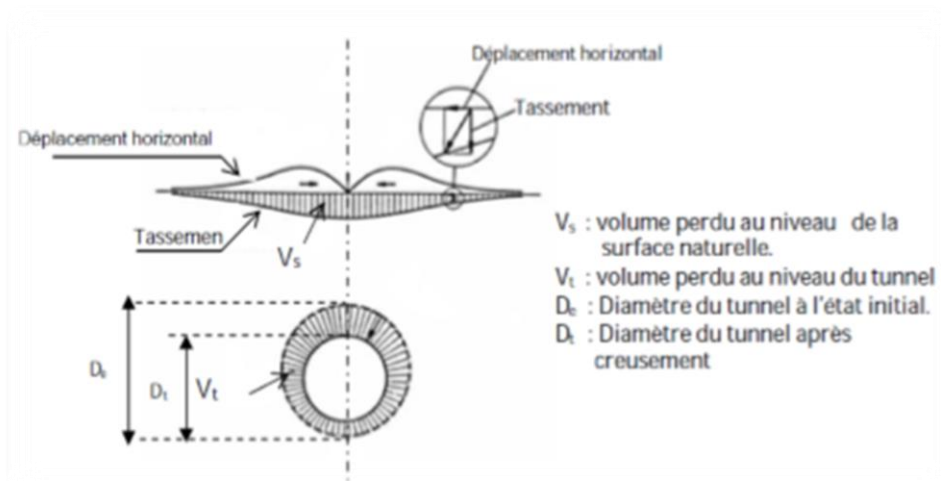


Figure 2.5 Mouvement de sol. Perte de volume (Dolzhenko, 2002)

2.3.2 Cas de tunnels jumeaux

Les deux tunnels ou appelée les tunnels jumeaux sont construits dans de nombreuses configurations qui diffèrent en termes de géométrie et de position (figure 2.7). Les

tunnels jumeaux disposés en décalage sont parallèles les uns aux autres ou verticaux ou inclinés, mais à des distances différentes.

Pour tous tunnels jumeaux, le concepteur est face à de véritables défis dont l'évaluation et le contrôle des tassements du sol, la stabilité du front d'excavation, ainsi que les déformations, les charges et les contraintes dans le revêtement.

Le mouvement du sol est un problème tridimensionnel complexe qui n'est pas seulement influencé par la géométrie du tunnel et les conditions du sol, mais aussi par les détails de construction. Pour la disposition en tunnels jumeaux, les fouilles sont entreprises à différentes altitudes. Donc, les interactions peuvent avoir des influences imprévues sur les tassements de surface en plus des distributions de contraintes et des déformations du revêtement du tunnel.

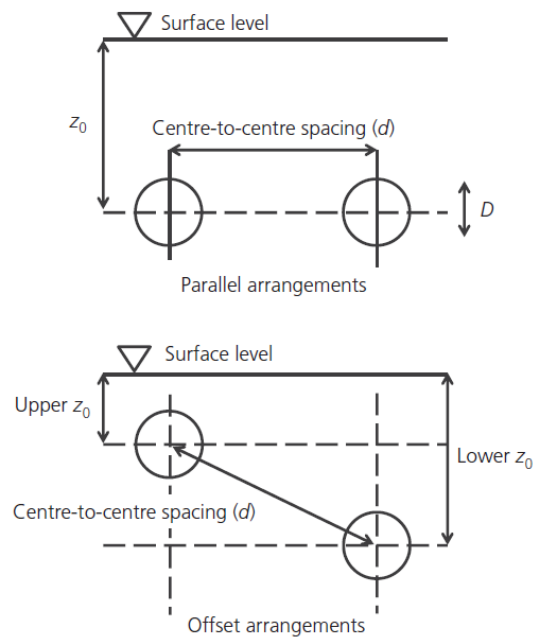


Figure 2.6 Mouvement de sol. Perte de volume (Dolzhenko, 2002)

Il faut souligner que l'interaction entre deux tunnels et les tassements de terrain induits par le creusement ne sont pas bien compris, considérant que peu d'analyses ont été faites

par rapport aux cas d'un tunnel singulier, que ce soit observations du terrain, expériences en laboratoire ou analyses numériques.

2.4 TASSEMENT DE DEUX TUNNELS

Cependant, dans la pratique de l'ingénierie, les tunnels jumeaux est la configuration la plus utilisée dans les projets ferroviaires urbains, en particulier dans une disposition alignée qui provoque un tassement du sol plus faible (Chehade et Shahrour, 2008 ; Suwansawat, 2004),

Yang et Wang (2011) ont proposé une méthode stochastique simplifiée pour calculer le tassement du sol des tunnels jumeaux en superposant les tassements induits par deux tunnels identiques. Ils ont obtenu un tassement symétrique par rapport à l'axe médian entre deux tunnels. Cependant, leur hypothèse de modèle est trop idéaliste et le tassement de forme symétrique n'est pas conforme aux situations réelles (Yoo et Kim, 2008).

En fait, un tassement asymétrique est largement observé dans la pratique du génie civil en cas où les deux tunnels ne sont pas creusés simultanément (Chen et al. 2012).

Selon Suwansawat et Einstein (2007) et Chen et al. (2012) cité par Ma et al, (2014), la courbe gaussienne décrite par Peck (1969) peut non seulement être applicable pour décrire les tassements de terrain induits par le creusement du premier tunnel, mais aussi décrire les tassements supplémentaires induits par le deuxième tunnel.

En conséquence, il est raisonnable d'appliquer l'Equation (2.2) de chaque tunnel et proposer un autre modèle double pour décrire la nouvelle forme de tassement du sol (équation 2.4).

$$s = s_1 \exp(a_1 x^2) + s_2 \exp[a_2 (x - u)^2] \quad (2.4)$$

S : est le tassement global du sol.

s_1 et s_2 : tassements maximum correspondant aux deux tunnels.

x : Distance horizontale à partir de la ligne médiane du tunnel.

a_1 et a_2 : sont des paramètres de forme.

u : est la distance entre deux tunnels.

La figure 2.7 présente un cas d'étude de tunnels jumeaux construit avec un décalage.

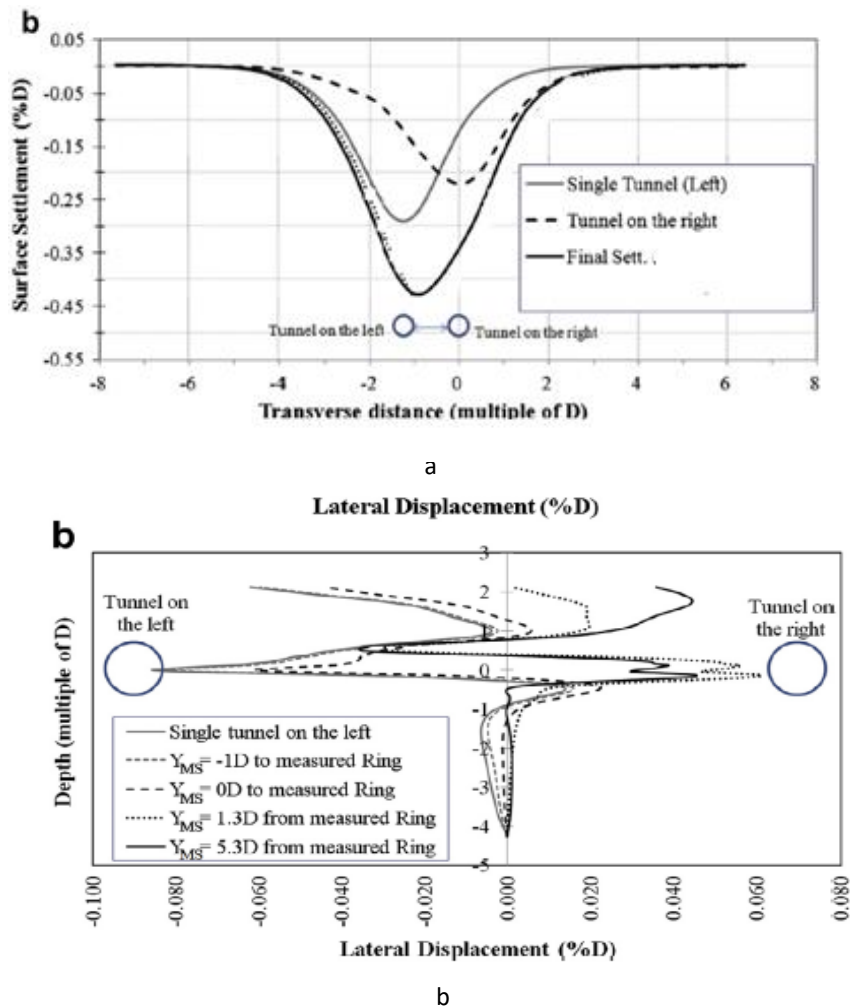


Figure 2.7 Mouvements de sol de tunnels jumeaux creusés avec un décalage
 a. Tassement en surface. b. Déplacement horizontal
 (Do et al, 2014)

O'Reilly et New (1982) ont proposé une formule pour la prédiction des tassements de surface par le principe de superposition (cité par Divall et Goodey, 2014).

Cette formule est utilisée lorsque les deux tunnels sont creusés en même temps.

$$S_v = S_{v\max} \left[\exp\left(\frac{-x_A^2}{2i^2}\right) + \exp\left(\frac{-(x_A - d)^2}{2i^2}\right) \right] \quad (2.3)$$

Avec :

d: la distance horizontale entre les deux axes médian des tunnels.

Les autres paramètres sont les mêmes cités plus haut.

2.5 CONCLUSION

À travers ce chapitre, nous avons exposé quelques méthodes permettant la prévision des mouvements engendrés par le creusement des tunnels qu'il soit singulier ou des tunnels jumeaux.

Les formules empiriques existantes dans la littérature reliant les deux paramètres (le tassement maximum S_{\max} et l'abscisse du point d'inflexion i) ne peuvent être prises à la légère et doivent être vérifiées par rapport aux calculs numériques et évidemment les comparer aux données expérimentales sur un site urbain.

La méthode analytique peut être d'une grande utilité pour les études paramétriques d'un futur projet. Néanmoins, elle devrait être complétée par le calcul numérique.

A la fin, nous pouvons dire que les méthodes de prédiction des tassements sont très efficaces si les paramètres observés in situ sont proches des hypothèses prises en compte dans les approches théoriques simplifiées.

Dans le chapitre suivant, il serait question traiter un cas d'étude tiré de la littérature et d'analyser le comportement du terrain encaissant vis-à-vis la construction de tunnels jumeaux.

Chapitre 3

Effet du creusement de deux tunnels sur le comportement du massif encaissant

3.1 INTRODUCTION

La complexité des mouvements résultants du creusement des tunnels est très bien définie dans la littérature et il paraît évident pour la détermination de ces mouvements de disposer d'outils de calcul fiables pour l'estimation et la prévention du comportement régité.

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté une bibliographie sur les excavations souterraines ainsi que les méthodes pour le calcul d'un seul tunnel ensuite de deux tunnels.

Dans le présent chapitre, il s'agit d'une simulation bidimensionnelle de la réponse mécanique d'un massif de sol lors du creusement de tunnels jumeaux parallèles.

Nous avons utilisé le code de calcul PLAXIS 2D pour les différentes simulations numériques.

Des approches empiriques ont été utilisées en parallèle pour montrer leur intérêt au stade des études préliminaires.

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

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
- Programme des résultats
- Programme courbe

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

PLAXIS-Calculation : La procession 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-procession 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 réalisation des courbes de chargement déplacement, des chemins de contraintes, en plus de divers autres diagrammes.

3.3 PRÉSENTATION DU MODÈLE DE CALCUL

L'analyse va porter sur la modélisation d'un cas d'étude tiré de la littérature, il s'agit de celui de Gouw (2005) dont deux tunnels peu profonds sont en interaction.

Ce même modèle sera modifié par la suite en vue de faire une étude paramétrique, aussi, la distance horizontale entre les deux axes verticaux des deux tunnels sera variée en vue de connaître l'effet de cette distance sur le comportement du massif encaissant.

En dernier, nous allons utiliser des approches empiriques décrites dans le chapitre 2 pour faire des comparaisons.

3.3.1 Définition du modèle de référence

Le modèle traité est celui de Gouw (2005) ; il consiste à la réalisation de deux tunnels circulaires de diamètre $D=6,3\text{m}$ construits dans un massif de sol stratifié à une profondeur de $H=15\text{m}$ de la surface naturelle.

L'étude de cas est extraite d'une zone particulière entre les stations Hougang et Kovan le long du projet NEL du système de transport en commun de Singapour. Dans cette zone particulière, des tunnels jumeaux de $6,3\text{m}$ de diamètre espacés de 15m ont été creusés en utilisant la méthode du tunnelier pressurisé.

L'état du sol encaissant consiste en une couche de remblai suivie de la formation d'anciennes alluvions (OA). Les anciennes alluvions sont divisées en sous-couches en fonction de leur consistance. La nature du sol est majoritairement limoneuse et sableuse argileuse. L'épaisseur des couches de sol et les paramètres sont illustrés à la figure (3.1).

Toutes les couches sont modélisées en utilisant le critère de Mohr-Coulomb.

Les déplacements horizontaux et verticaux sont supposés nuls au niveau du substratum rocheux qui se trouve au fond. Les déplacements horizontaux sont bloqués sur les côtés latéraux.

Le revêtement des tunnels est composé de voussoirs en béton armé formant un anneau dont le comportement est supposé élastique-linéaire.

Il s'agit d'un premier calcul qu'on appellera modèle de référence (deux tunnels), il sera modifié au fur et à mesure de l'état d'avancement du chapitre en vue de voir l'influence des différents paramètres.

Par la suite, nous allons faire une comparaison avec les méthodes empiriques en vue de souligner l'intérêt de l'utilisation de telles approches.

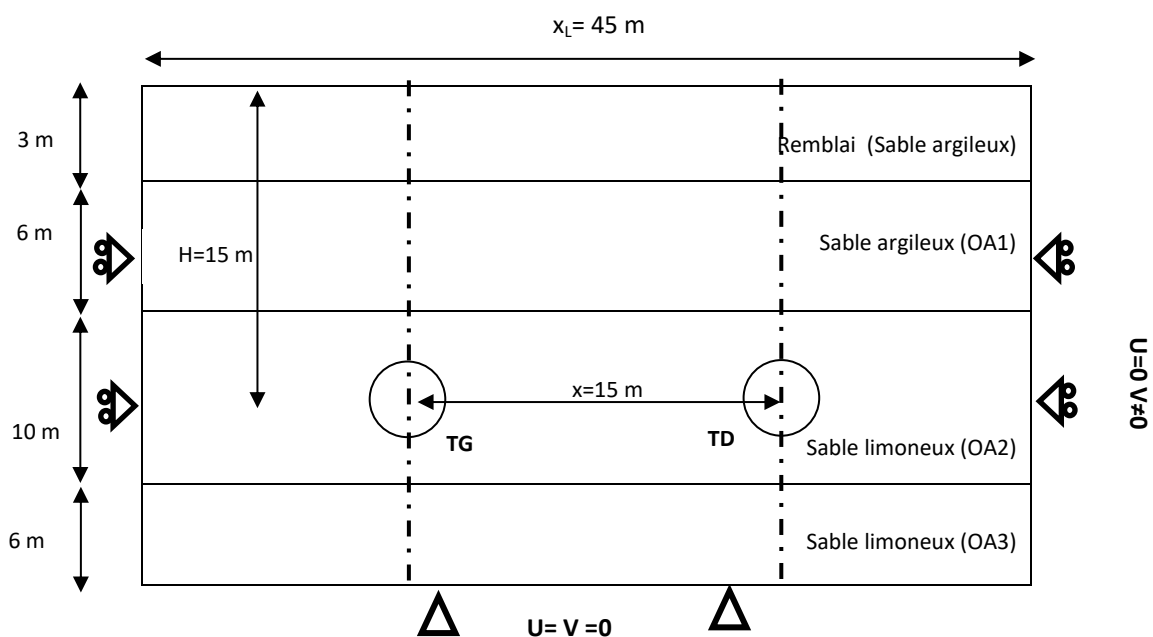


Figure 3.1 Définition du problème de calcul (Modèle de Réf.)(Gouw, 2005)

Avec TG : tunnel de gauche, TD : tunnel de droite.

3.3.2 Caractéristiques des matériaux

Le tableau 3.1 résume les caractéristiques du modèle choisi.

Tableau 3.1 Caractéristiques du sol pour le modèle de référence (Gouw, 2005)

| Paramètres du modèle | Unités | Remblai | OA1 | OA2 | OA3 |
|------------------------|-------------------|---------|-------|-------|-------|
| Poids volumique sec | kN/m ³ | 16 | 18 | 18 | 18 |
| Poids volumique humide | kN/m ³ | 18 | 19.5 | 19.5 | 19.5 |
| Module de Young | kN/m ² | 10000 | 10000 | 40000 | 60000 |
| Coefficient de poisson | kN/m ² | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| Cohésion | kN/m ² | 80 | 100 | 100 | 120 |
| Angle de frottement | (°) | 30 | 30 | 35 | 35 |

3.3.3 Modélisation par éléments finis- Maillage retenu

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

- 296 éléments triangulaires de 15 nœuds.
- 2545 nœuds.

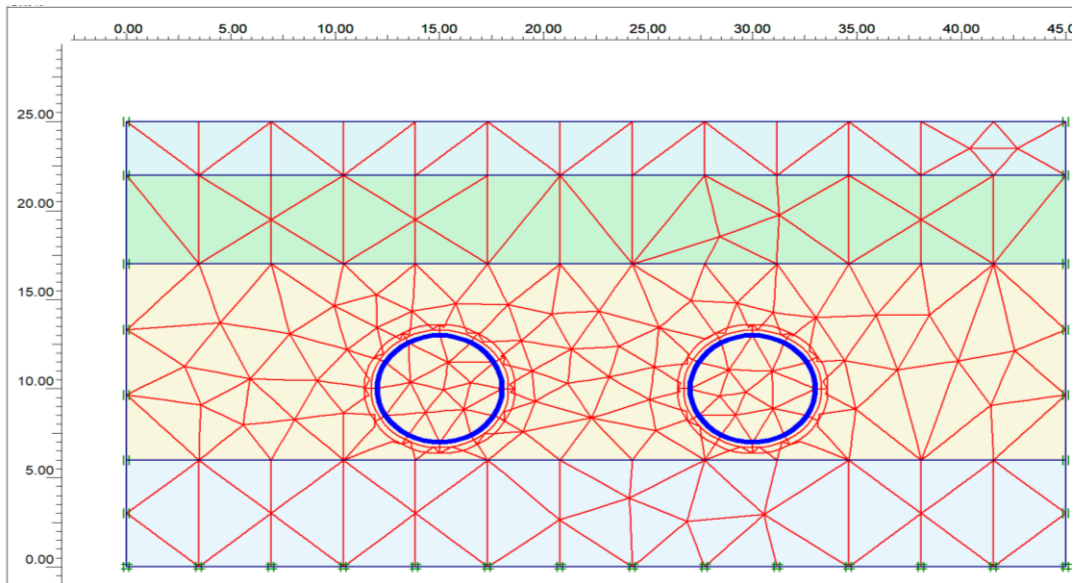


Figure 3.2 Modèle éléments finis retenu pour le modèle de référence

3.3.4 Vérification du modèle d'étude

Dans cette partie, nous avons voulu vérifier le modèle d'étude choisi (Gouw, 2005) pour pouvoir l'utiliser dans notre étude.

Pour cela, nous avons modélisé cet exemple avec le code de calcul Plaxis 2D. La figure (3.3) montre le résultat des tassements obtenu : il apparaît que le tassement en surface (appelé cuvette de tassement) n'atteint pas les limites de la surface, et ceci n'est pas tolérable vu que le constructeur ne saura pas les limites de la zone d'influence pour prévenir des éventuels dégâts.

Ce résultat est causé par la faible extension longitudinale (appelée x_L) des limites du modèle (Berthoz, 2012).

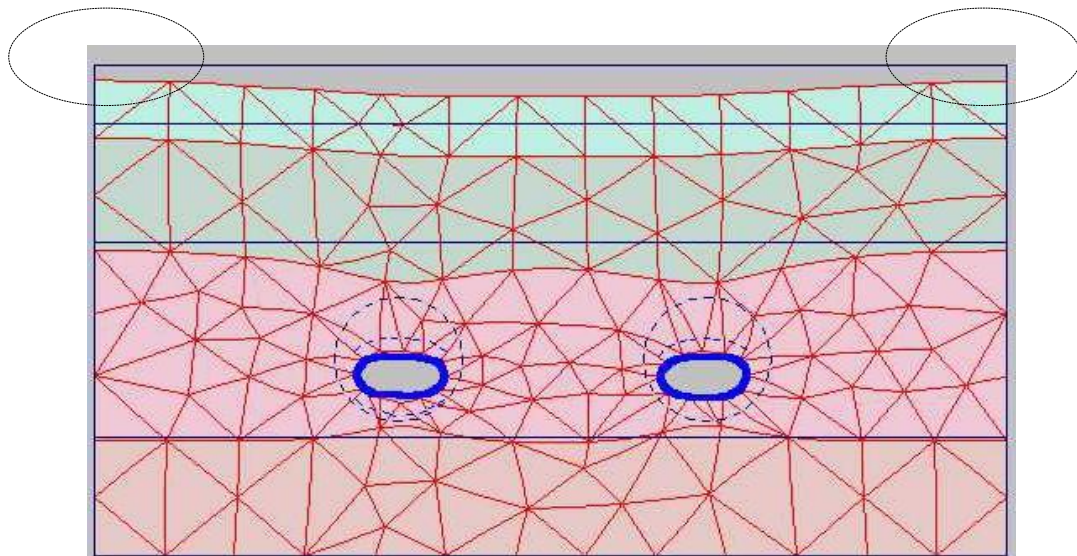


Figure 3.3 Mouvements de sol prédit par Plaxis (Extension longitudinale =45m)

Pour cela, nous avons effectué une étude paramétrique en augmentant cette extension ($x_L=45m$) à différentes valeurs : 100m, 120m, 140m, 160m afin d'obtenir le modèle adéquat.

Les courbes de tassements en surface obtenues grâce aux différentes modélisations numériques utilisant le code de calcul Plaxis 2D sont représentées sur la figure (3.4).

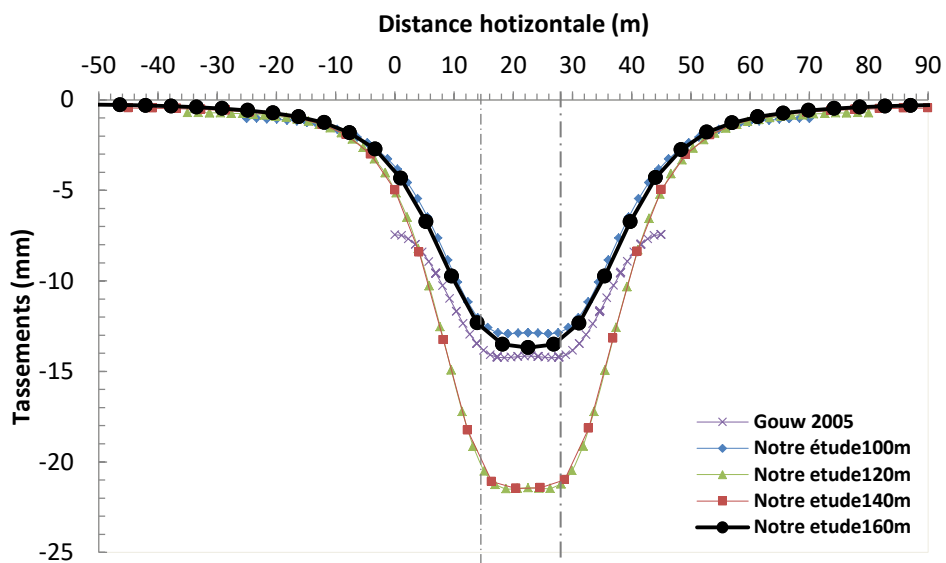


Figure 3.4 Validation du modèle d'étude

Nous remarquons que le modèle avec l'extension de 160m est celui qui a donné une cuvette de tassement la plus proche du modèle de Gouw (2005) mais qui a pu atteindre la surface naturelle (les limites du modèle).

Ainsi, ce modèle avec une extension de 160m sera adopté pour tous nos calculs ultérieurs.

3.4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Dans cette partie, nous présentons les résultats des tassements en surface et des déplacements horizontaux obtenus après la construction des deux tunnels simultanément et séparément.

3.4.1 Tassement en surface

La figure 3.5 montre les résultats des tassements des tunnels gauche et droit modélisé séparément ensuite en interaction (Modèle Réf.).

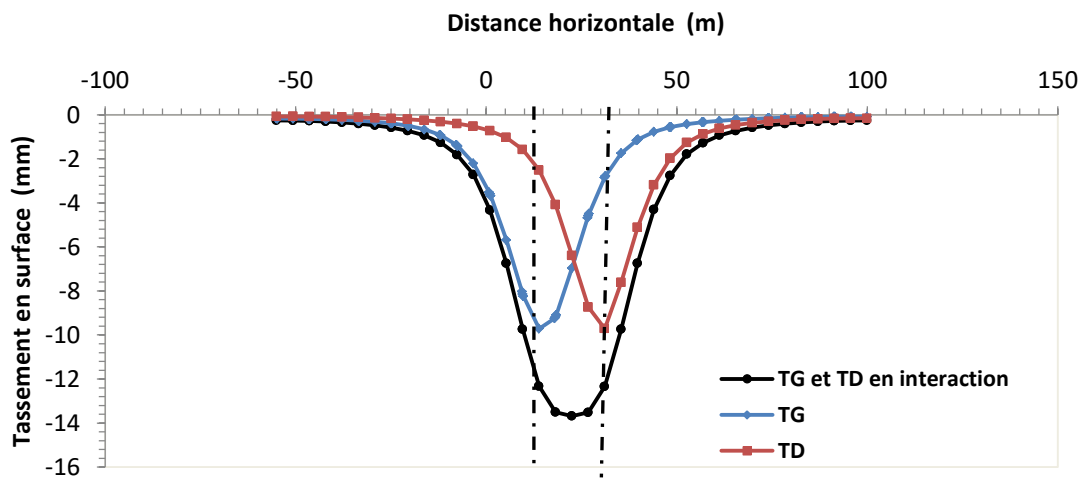


Figure 3.5 Cuvettes de tassement en surface (Calcul numérique)

En étudiant l'effet de la construction de chaque tunnel séparément, on remarque que les deux tunnels tassent avec la même amplitude et de la même largeur de cuvette avec un tassement maximal de l'ordre d'environ 10mm. Ceci est évident vu que les deux tunnels ont les mêmes caractéristiques et la même géométrie.

Par ailleurs, la construction des deux tunnels (TG et TD en interaction) conjointement a fourni une seule cuvette de tassement plus large et plus profonde dont l'axe médian est au centre de la distance qui sépare les tunnels jumeaux. Ceci est causé par l'interaction entre le tunnel de gauche et celui de droite dont chacun influe sur l'autre. Le tassement maximum dans ce cas est de l'ordre d'environ 14mm.

3.4.2 Déplacement horizontal

De la même manière, nous avons modélisé les déplacements horizontaux.

La figure 3.6 montre les déplacements horizontaux des tunnels gauche et droit modélisés séparément ensuite en interaction (Réf.).

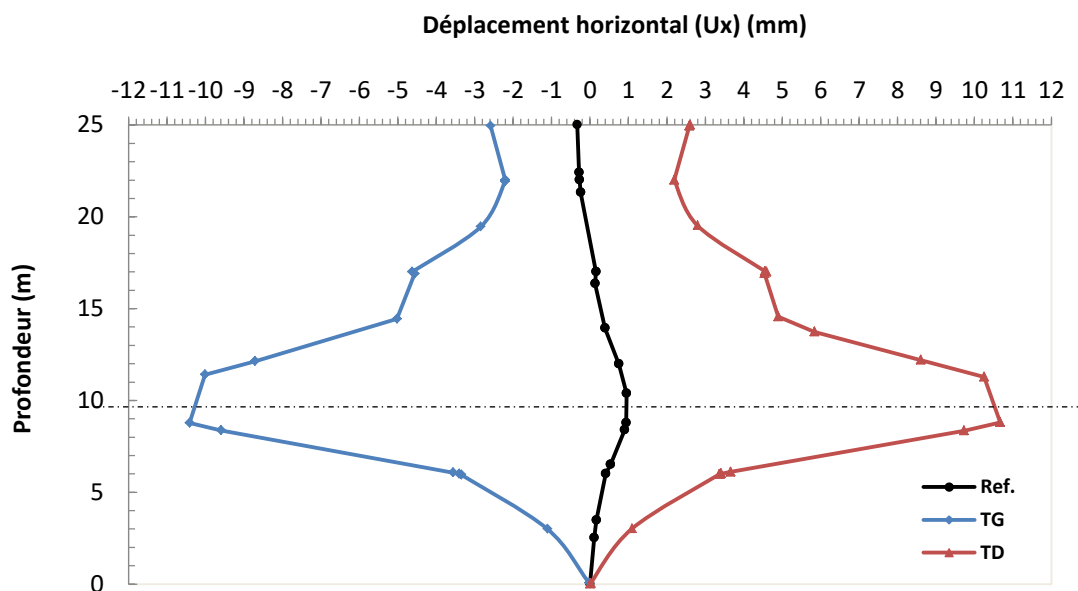


Figure 3.6 Déplacement horizontal (Calcul numérique)

Nous remarquons que le sol converge vers l'extérieur pour le **cas de tunnel seul** avec un déplacement horizontal maximum de $U_x \sim 11\text{mm}$ que ce soit pour le tunnel de gauche ou de droit.

Néanmoins, les deux tunnels creusés conjointement se déplacent avec un déplacement horizontal négligeable de l'ordre de 1mm, causé par un état d'équilibre créé entre les deux tunnels.

3.5 Variation de la distance horizontale entre les deux tunnels

Dans cette partie, nous avons voulu analyser l'influence de la distance horizontale entre les deux axes verticaux des deux tunnels (nommé « x ») (Voir figure 3.7).

Ce paramètre sera modifié en fonction du diamètre des tunnels.

La position du tunnel a été modifiée horizontalement, il s'agira des positions suivantes : $x = 2D, 3D, 4D, 5D$. On gardera la même profondeur des tunnels $H = 15\text{m}$.

A savoir $x = 2,5D$ représente le modèle de référence.

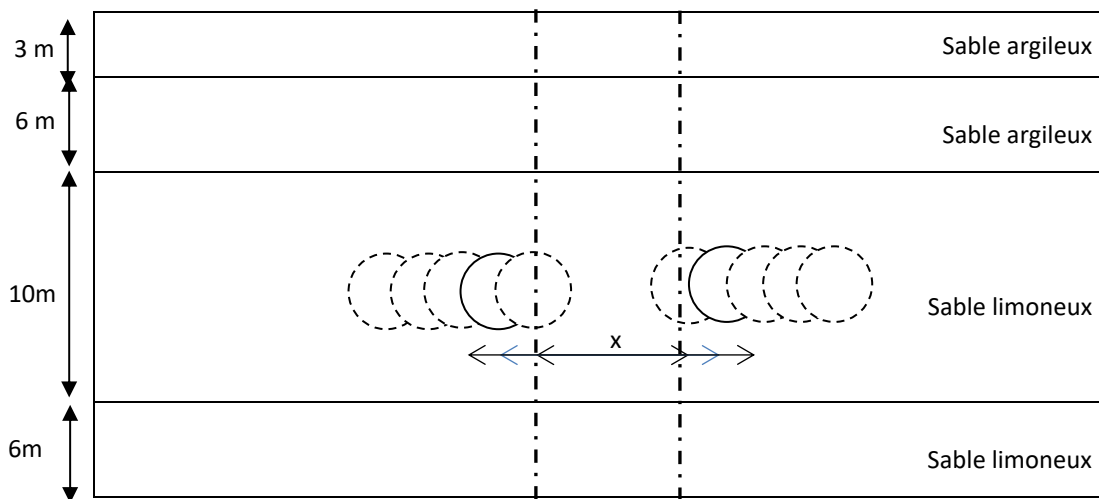


Figure 3.7 Variation de la distance horizontale entre les deux tunnels

Après les différentes modélisations numériques avec le code de calcul Plaxis 2D, les résultats suivants ont été obtenus :

3.5.1 Tassement en surface

La figure 3.8 montre les tassements retrouvés après la construction des deux tunnels simultanément.

Nous remarquons qu'en augmentant la distance horizontale entre les deux axes verticaux des deux tunnels, le tassement maximum diminue et on obtient des cuvettes moins profondes et plus larges et tendent à se séparer de manière à ce que chaque tunnel crée

une cuvette propre à lui comme s'il s'agissait de la construction d'un seul tunnel et l'effet de l'interaction se réduit.

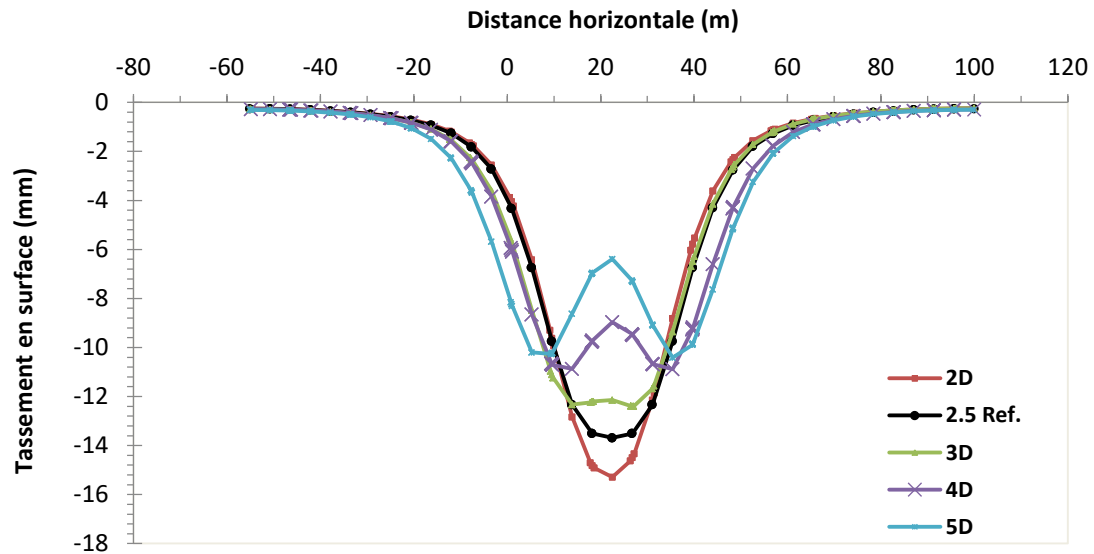


Figure 3.8 Cuvettes de tassement en surface (Calcul numérique)

Nous pouvons conclure que l'effet de l'interaction entre les deux tunnels jumeaux et parallèles se manifeste à partir d'une distance égale à environ $x=3D$ c'est-à-dire à environ 18m pour créer une seule cuvette plus profonde et moins large : c'est l'effet de superposition.

3.5.2 Déplacement horizontal

La figure 3.9 montre les déplacements horizontaux après la construction des deux tunnels.

Il s'agit ici d'étudier ces mouvements à la mi-distance entre les deux tunnels.

Nous remarquons que l'effet de l'influence des deux tunnels se dissipe à une distance de $3D$ pareil qu'en cas des tassements.

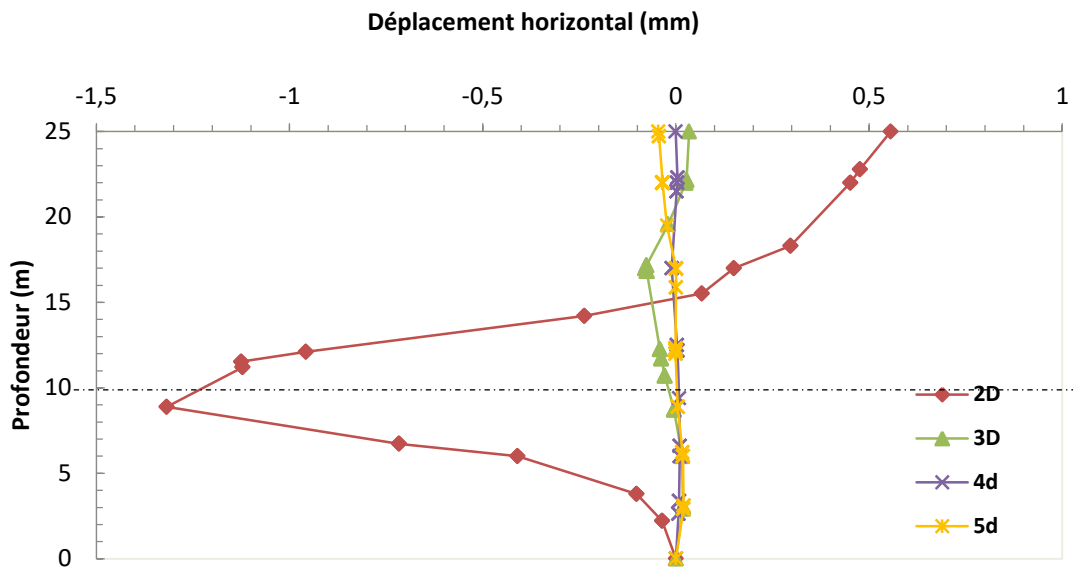


Figure 3.9 Déplacement horizontal (Calcul numérique)

3.6 COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES METHODES

Des analyses additionnelles ont été exécutées en complément afin d'étudier l'intérêt de l'utilisation des formules empiriques dans ce genre d'études.

Cette dernière partie a été dédiée à la comparaison entre les méthodes de calcul (numérique et empirique).

Nous avons utilisé la formule de « Peck » pour tracer les cuvettes de tassement pour chaque tunnel seul (Tunnel gauche et tunnel droit séparément) sachant que cette formule qui a été établie en 1969 ne permet d'être utilisée que dans le cas d'un seul tunnel (Voir chapitre 2).

En parallèle, nous avons utilisé la formule établie par O'Reilly et New (1982) (cité par Dival et Goodey, 2014) pour le tracé des tassements en surface de tunnels jumeaux (Voir chapitre 2).

La figure 3.10 présente les différentes cuvettes de tassement obtenues, à savoir :

1. La cuvette du modèle de référence (deux tunnels) modélisée numériquement par le code de calcul Plaxis.

2. La cuvette du tunnel gauche modélisée numériquement par le code de calcul Plaxis.
3. La cuvette du tunnel droit modélisé numériquement par le code de calcul Plaxis.
4. La cuvette du tunnel gauche tracée par la formule de Peck (1969).
5. La cuvette du tunnel droit tracée par la formule de Peck (1969).
6. La cuvette du modèle de référence tracée par la formule O'Reilly et New (1982)

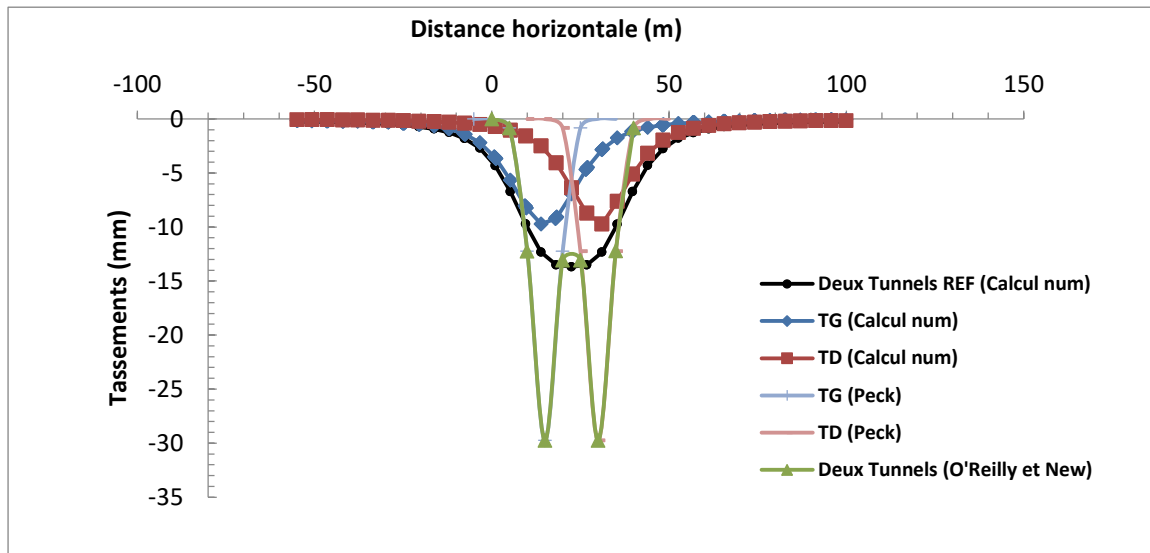


Figure 3.10 Cuvettes de tassement en surface (Calcul empirique et numérique)

Le résultat trouvé a montré que les tassements trouvés par les approches empiriques sont plus importants par rapport à ceux obtenus par le calcul numérique. Néanmoins, elles restent un outil intéressant au stade des études préliminaires.

3.7 CONCLUSION

Dans le chapitre présent, il était question d'étudier l'effet de la construction de tunnels jumeaux et parallèles sur le comportement du massif encaissant.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'intérêt de modéliser ce cas d'études pour monter le supplément de mouvement par rapport au creusement d'un seul tunnel.

La première étape de l'analyse numérique était de vérifier le modèle de Gouw (2005) pour pouvoir l'utiliser dans les différentes simulations numériques.

Nous avons remarqué que la construction des tunnels séparément pouvait engendrer moins de tassement maximum et plus de déplacements horizontaux en comparaison avec les deux tunnels construits conjointement.

En parallèle, nous avons montré que la distance horizontale qui sépare les deux axes verticaux des deux tunnels est un facteur très important qui peut engendrer plus de mouvements dans le sol encaissant s'il est réduit.

Et enfin, nous avons montré que les approches empiriques peuvent être utiles au stade des études préliminaires.

CONCLUSION GENERALE

Le creusement des tunnels affecte l'équilibre initial du terrain encaissant et crée des mouvements et des déplacements susceptibles de créer des dommages en surface et en profondeur. L'étude de ces mouvements peut s'avérer très indispensable pour prévenir ces dégâts qui peuvent être considérables. D'où la nécessité de réaliser des analyses préliminaires adaptées au préalable du projet pour un choix optimal en terme d'emplacement et de techniques.

Dans ce mémoire, il était question d'étudier l'effet de la construction de tunnels jumeaux et parallèles sur le comportement du massif encaissant en usant d'un modèle tiré de la littérature (Gouw, 2005).

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'intérêt de traiter ce cas d'étude pour monter le supplément de mouvement causé par la réalisation de deux tunnels par rapport au creusement d'un tunnel singulier.

La première étape de l'analyse était de vérifier le modèle de Gouw (2005) pour pouvoir l'utiliser dans les différentes simulations numériques. Le modèle présentait une extension insuffisante qui a donné une cuvette de tassement qui n'a pas atteint les limites du modèle, c'est pourquoi nous avons utilisé une étude paramétrique pour y remédier, le résultat obtenu était utilisé pour les différentes analyses ultérieures.

Nous avons remarqué que la construction séparée des deux tunnels pouvait engendrer moins de tassement et plus de déplacements horizontaux, un résultat qui diffère du cas de deux tunnels construits conjointement.

Aussi, il a été décelé que la distance horizontale qui sépare les deux axes verticaux des deux tunnels est un facteur très important qui peut engendrer plus de mouvements dans le sol encaissant s'il est réduit : c'est l'effet de l'interaction.

Et enfin, nous avons montré que les approches empiriques peuvent être utiles au stade des études préliminaires en effectuant des comparaisons avec les résultats numériques.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons une continuité et ceci en :

1. Etudiant l'effet de cette interaction en présence d'une nappe phréatique.
2. Etudiant le cas de deux tunnels verticaux.
3. Modifiant le diamètre de l'un des deux tunnels.

BIBLIOGRAPHIE

1. Abderrahmane A. et Bensalah A. (2016). Influence du creusement d'un tunnel sur le comportement du sol sous les fondations d'une construction en surface. Mémoire de fin d'étude. Université de Tlemcen. Algérie.
2. AFTES (1995). Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain. *Revue Tunnels et Ouvrages Souterrains*, vol. 132, pp. 373-395.
3. Akhaveissy A H. (2010). Analysis of tunnel and super structures for excavation. Department Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, P.O. Box 67149-67346.Iran
4. Berthoz N. (2012). Modélisation physique et théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. France.
5. Bouvard-Lecoanet A., Colombet G. (1992), *Ouvrages souterrains - Conception*, Paris : s.n., 1992.
6. Boscardin M., Cording, E, J. (1989). Building response to excavation induced settlement *Journal of geotechnical engineering*. ASCE, Vol. 115, No 1, pp.1-21. 1989.
7. Chakeri H. & Ozcelik Y. & Bahtiyar. (2015), Unver Investigation of ground surface settlement in twin tunnels driven with EPBM in urban area. *Arab J Geosci* (2015) 8:7655–7666.
8. CENTRE DES ETUDES DES TUNNELS (C.E.TU) (2005, 2006, 2012). *Mécanique des Roches et Travaux Souterrains Cours et exercices corrigés*. Par : Martin, F., Centre d'Études des Tunnels. Saïtta, A. Laboratoire Régional des Ponts-et-Chaussées d'Aix-en-Provence. France.
9. Chehade et Shahrour, 2008
10. Chen S. L., Gui M. W., Yang M. C. (2012), Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin- and quadruple-tube tunnels.
1. 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.
11. Dolzhenko N. (2002), Etudes expérimentale et numériques de modèle réduit bidimensionnel du creusement d'un tunnel. Développement d'une loi de comportement spécifique. Thèse de doctorat : INSA de Lyon. France.
12. Do, N.A., Dias, D., Oreste, P., Djeran-Maigre, I. (2014). Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 42, 40–51.
13. Divall S., Goodey R.J. Twin-tunnelling-induced ground movements in clay. *Geotechnical Engineering Proceedings of the Institution of Civil Engineers* <http://dx.doi.org/10.1680/geng.14.00054>.

14. EL Houari N. (2008). Modélisation numérique de la réponse mécanique au voisinage des tunnels dans les sols saturés par Plaxis. magister, Université Aboubekr Belkaid -Tlemcen, Algérie.
15. EL Houari N. (2015). Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration tridimensionnelle .thèse de doctorat, Université Aboubekr Belkaid -Tlemcen, Algérie.
16. Gesta, P. (1994). Travaux souterrains www.technique-ingenieur.fr. 10 nov 1994.
17. Gouw T. L. (2005), Tunneling induced ground movement and soil structure interactions. Seminar on Tunnel Technology in Civil Engineering, Peninsula Hotel, March 22, 2005
18. Idris J. (2007), Accidents géotechniques des tunnels et des ouvrages souterrains –Méthodes analytiques pour le retour d'expérience et la modélisation numérique.
19. Kitchah F. (2012), Etude numérique de la stabilité d'une section du Tunnel T4 de l'autoroute Est Ouest Mémoire de Magistère en Génie Civil Université El Hadj Lakhdar –Batna (2012).
20. Ling M., Lieyun D., Hanbin L. (2014), Non-linear description of ground settlement over twin tunnels in soil. *Tunnelling and Underground Space Technology* 42 (2014) 144–15.
21. Martin F. (2012), Cours de travaux souterrains et de mécanique des roches <http://dx.doi.org/10.1680/jgeeng.14.00054>. Paper 1400054.
22. Ma L., Ding L., Luo H., (2014), Non-linear description of ground settlement over twin tunnels in soil. *Tunnelling and Underground Space Technology* 42 (2014) 144–151.
23. Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. State of the art report. In: 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, pp. 225–290.
24. Suwansawat, S., Einstein, H.H.(2007). Describing settlement troughs over twin tunnels using a superposition technique. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 133 (4), 445–468.
25. Vermeer P.A., Moller S. C., Ruse N. (2005). On the Application of Numerical Analysis in Tunnelling. Institute of Geotechnical Engineering, Pfaffenwaldring 35, 70569 Stuttgart, Germany.
26. Yang, X.L., Wang, J.M., 2011. Ground movement prediction for tunnels using simplified procedure. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 26, 462–471.
27. Yoo, C., Kim, S.B., 2008. Three-dimensional numerical investigation of multifaced tunneling in water-bearing soft ground. *Can. Geotech. J.* 45, 1467–1486.