

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** : Benziani Mohamed & Hadji Douniazed

**Sujet**

**Contribution à l'étude de l'effet de l'utilisation des fibres  
pour le renforcement des soutènements des tunnels**

**Soutenu le /06/ 2024, devant le jury composé de :**

Hamzaoui F.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Président
Smail N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Examinatrice
El Houari N.	Maitre de conférences	Université de Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2023 /2024

# Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail,

Aux êtres humains les plus chers dans nos vies,

À Notre lumière, celles qui nous ont donné la vie, l'amour, la tendresse et le courage, vous,  
chères mamans.

Ceux qui nous ont soutenus et guidés afin que nous puissions arriver à cette étape de notre  
vie, vous, chers pères. Que Dieu vous accueille dans son vaste paradis.

Aux cœurs innocents et bienveillants, aux âmes pures et délicates, parmi les épreuves de  
notre vie, nos sœurs et nos frères.

À nos amis, pour leur soutien moral et leurs précieux conseils.

A la promotion M2 VOA 2023- 2024.

**Benziani Mohamed & Hadji Douniazed**

## Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu tout-puissant de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté et la force de réaliser ce travail.

Nous remercions chaleureusement notre encadrante, Mme El Houari Nesrine Maitre de Conférences à l'université de Tlemcen pour sa guidance, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de ce mémoire

Nous adressons également nos remerciements sincères aux membres du jury, en particulier au président, Mr. Hamzaoui Fethi Maitre de Conférences à l'université de Tlemcen, et à l'examinatrice, Mme. Smail Nadia Maitre de Conférences à l'université de Tlemcen pour l'honneur qu'ils nous ont fait de présider et d'examiner ce modeste travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

***Merci à tous***

## Résumé

Au cours de ces dernières années, le béton renforcé par des fibres a été largement utilisé dans les constructions souterraines, spécialement pour les soutènements en voussoirs. Ce mémoire explore l'impact de l'intégration de fibres métallique dans le béton utilisé pour le renforcement des soutènements des tunnels, visant à évaluer comment les fibres métalliques influencent la performance mécanique et la durabilité des soutènements. La problématique abordée concerne la nécessité de trouver des solutions plus efficaces et durables pour renforcer les soutènements des tunnels, traditionnellement réalisés en béton armé. L'utilisation de fibres dans le béton pourrait offrir des améliorations significatives en termes de résistance et stabilité. À l'aide des simulations numériques, nous avons analysé la réponse du creusement d'un tunnel aux différentes modifications. Nous avons examiné les tassements en surface, les déplacements verticaux et horizontaux du sol et au niveau du soutènement ainsi que le moment fléchissant et l'effort axial. La première analyse portait sur un soutènement en béton armé (BA). Ensuite, sur du béton renforcé par des fibres métallique (BF). Une étude paramétrique a été réalisée en plus, en modifiant trois variables: la profondeur, le diamètre du tunnel ainsi que l'épaisseur du soutènement. Enfin, une étude comparative détaillée des résultats entre le béton armé et le béton renforcé de fibres a été effectuée. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de fibres métalliques améliore significativement les propriétés mécaniques du béton et indiquent que les soutènements renforcés par des fibres présentent une meilleure performance face aux charges et aux déformations.

**Mots Clés :** Tunnel, Béton Armé (BA), Béton Fibré (BF), MEF, Réponses mécaniques, Voussoirs.

## Abstract

In recent years, fiber-reinforced concrete has been usually used in underground constructions, especially for segmental linings. This thesis explores the impact of integrating metallic fibers into the concrete used for tunnel linings, aiming to evaluate how these fibers influence the mechanical performance and durability of the linings. The issue addressed concerns the need to find more effective and durable solutions for reinforcing tunnel linings, traditionally made with reinforced concrete. The use of fibers in concrete could offer significant improvements in terms of strength and stability. Using numerical simulations, we analyzed the response of tunnel excavation to various modifications. We examined surface settlements, vertical and horizontal ground displacements, and the behavior of the lining, including bending moments and axial forces. The first analysis focused on a reinforced concrete lining (RC), followed by an analysis of fiber-reinforced concrete (FRC). Additionally, a parametric study was conducted by varying three variables: tunnel depth, tunnel diameter, and lining thickness. Finally, a detailed comparative study of the results between reinforced concrete and fiber-reinforced concrete was carried out. The results show that the addition of metallic fibers significantly improves the mechanical properties of concrete and indicate that fiber-reinforced linings exhibit better performance under loads and deformations.

**Keywords:** Tunnel, Reinforced Concrete, Fiber-Reinforced Concrete, MEF, Mechanical Responses, Segments.

## ملخص

في السنوات الأخيرة، تم استخدام الخرسانة المسلحة بالألياف بشكل واسع في الإنشاءات تحت الأرض، خاصة في تدعيم قوالب الأنفاق. يستعرض هذا البحث تأثير دمج الألياف المعدنية في الخرسانة المستخدمة في تدعيم الأنفاق، ويهدف إلى تقييم كيف تؤثر هذه الألياف على الأداء الميكانيكي ومتانة التدعيمات. تبرز المشكلة في الحاجة إلى حلول أكثر فعالية واستدامة لتدعيم الأنفاق، بدلاً من الطرق التقليدية التي تعتمد على الخرسانة المسلحة. يمكن لاستخدام الألياف أن يعزز بشكل كبير من القوة والثبات. من خلال المحاكاة العددية، تم تحليل استجابة التربة والنفق للتعديلات المختلفة. تمت دراسة الهبوطات السطحية والحركات العمودية والأفقية للتربة والتدعيم، بالإضافة إلى العزم الانحنائي والجهد المحوري. أولاً، تم تحليل التدعيم بالخرسانة المسلحة التقليدية، ثم بالخرسانة المسلحة بالألياف المعدنية. كما أجريت دراسة معلمية بتعديل عمق النفق، قطره، وسماكة التدعيم. أظهرت النتائج أن إضافة الألياف المعدنية تحسن الخصائص الميكانيكية للخرسانة بشكل كبير و تشير المحاكاة العددية إلى أن التدعيمات المعززة بالألياف تقدم أداءً أفضل تحت الأحمال والتشوه.

### الكلمات المفتاحية:

نفق، خرسانة مسلحة (BA)، خرسانة مسلحة بالألياف (BF)، طريقة العناصر المحدودة (MEF)، الاستجابات الميكانيكية، القوالب.

# Listse des figures et tableaux

## Chapitre 1

<b>Figure 1.1</b> Tunnel sous la Tamise par Marc Brunel (1825) (Dolkhenzo, 2002)	4
<b>Figure 1.2</b> Méthode de TERZAGHI (GANA, Housseem, 2014)	9
<b>Figure 1.3</b> Excavation par l'explosif (Les tunnels-WordsPress.com)	11
<b>Figure 1.4</b> Creusement par attaque ponctuelle (SOLID GROUND, 2012)	12
<b>Figure 1.5</b> Excavation par TBM (Le Parisien 2024)	13
<b>Figure 1.6</b> Soutènement avec du Béton projeté (Bernard et Thomas, 2020)	15
<b>Figure 1.7</b> Pose de boulons au front de taille (Trompille, 2003)	16
<b>Figure 1.8</b> Mise en place d'un voussoir dans l'anneau (Duc-Tam Vu, 2022)	17
<b>Figure 1.9</b> Géométrie du revêtement et d'un voussoir typique (Duc-Tam Vu, 2022)	18
<b>Figure 1.10</b> : Schéma de principe d'un tunnelier à pression de terre (berthoz )	18
<b>Figure 1.11</b> Rôle du soutènement (El Houari, 2008)	20
<b>Figure 1.12</b> Cuvette de tassement transversale	22
<b>Figure 1.13</b> Déplacements horizontaux dans une section transversale, (a) chantier du métro de Lyon d'après Ollier (1997) Justin Bel2018	23

## Chapitre 02

<b>Figure 2.1</b> Béton ordinaire (Le guide de la Maçonnerie)	27
<b>Figure 2.2</b> Béton Armé ( <a href="https://maçonnerie.blip.fr">https://maçonnerie.blip.fr</a> )	28

<b>Figure 2.3</b> Utilisations du Béton Armé (FRC (2014))	29
<b>Figure 2.4</b> Effet des fibres sur le béton Fritih Y. (2009)	31
<b>Figure 2.5</b> Fibre métallique-Béton fibré (fibres métalliques)	33
<b>Figure 2.6</b> Fibres polypropylène (www.texdelta.com)	34
<b>Figure 2.7</b> Fibres en verre (www.texdelta.com)	35
<b>Figure 2.8</b> Structures en béton renforcé par fibres métalliques (Duc-Tam Vu.,(2022))	36
<b>Figure 2.9</b> Modélisation par éléments finis des joints des voussoirs, montrant le développement de fissures (ITAtch (2016))	39
<b>Figure 2.10</b> Réponse typique d'un essai de flexion sur : a. Poutre renforcée- b. Poutre non renforcée (Sorelli, Toutlemonde, 2005)	40
<b>Figure 2.11</b> Actions permanentes s'exerçant sur le revêtement du tunnel (Duc-Tam Vu, 2022)	42
<b>Figure 2.12</b> Test sur les voussoirs (Xian Liua et al. 2020)	43
 <b>Chapitre 03</b>	
<b>Figure 3.1</b> Modèle étudié (Liu, 1997)	48
<b>Figure 3.2</b> Maillage éléments finis	48
<b>Figure 3.3</b> Réponses au creusement avec soutènement en BA modèle de référence	50
<b>Figure 3.4</b> Influence de la profondeur du tunnel	53
<b>Figure 3.5</b> Influence du diamètre du tunnel	54
<b>Figure 3.6</b> Influence de l'épaisseur du soutènement du tunnel	55
<b>Figure 3.7</b> Réponses au creusement avec soutènement en BF modèle de référence	57
<b>Figure 3.8</b> Influence de la profondeur du tunnel	59
<b>Figure 3.9</b> Influence du diamètre du tunnel	60
<b>Figure 3.10</b> Influence de l'épaisseur du soutènement du tunnel	61

<b>Figure 3.11</b> Comparaison des cuvettes de tassement en surface	63
<b>Figure 3.12</b> Comparaison des déplacements verticaux en clé	64
<b>Figure 3.13</b> Comparaison des moments fléchissant	65
<b>Figure 3.14</b> comparaison des efforts axiaux	66
<b>Figure 3.15</b> Comparaison des déplacements horizontaux	66

## Chapitre 02

<b>Tableau 2.1</b> Types de fibres ( <a href="https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres#comment-3711">https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres#comment-3711</a> )	32
<b>Tableau 2.2</b> Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier	33
<b>Tableau 2.3</b> Propriétés physiques et mécaniques des fibres de propylène	34

## Table des matières

Dédicace.....	.I
Remerciements .....	.II
Résumé.....	.III
Abstract.....	.IV
ملخص.....	.V
Liste des figures et tableaux.....	.VI
Table des matières.....	.IX
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
Chapitre 01 : Etat de l'art sur les tunnels .....	3
1.1 introduction .....	3
1.2 Historique Des Tunnels .....	4
1.3 Définition Et Types Des Tunnels .....	5
1.3.1 Les tunnels construits en souterrain à faible profondeur .....	6
1.3.2 Les tunnels construits en souterrain à fort profondeur .....	6
1.4 Méthodes De Calcul Des Tunnels .....	7
1.4.1 Méthodes analytiques .....	7
1.4.2 Méthodes empiriques .....	8
1.4.3 Méthodes numériques .....	10
1.5 Méthodes De Creusement Des Tunnels .....	10
1.5.1 Creusement à l'explosif .....	11
1.5.2 Creusement par attaque ponctuelle.....	11
1.5.3 Creusement avec tunnelier- TBM (Tunnel Boring Machine) .....	12
1.6 Soutènement Des Tunnels .....	13
1.6.1 Les soutènements agissant par confinement du terrain encaissant .....	14
1.6.2 Les Soutènements agissant à la fois par confinement et comme armature du terrain .....	15
1.6.3 les Soutènements agissant par supportage.....	16
1.7 Rôle Du Soutènement .....	19
1.8 Fonctionnement Du Soutènement.....	20
1.9 Tassements Dans Les Tunnels .....	21
1.10 Déplacements Horizontaux Dans Les Tunnels .....	22
1.11 Renforcement Des Soutènements De Tunnels Par Du Béton Fibre .....	24

1.12 Conclusion .....	24
<b>Chapitre 02 : Synthèse sur le Béton armé et le Béton renforcé par des fibres .....</b>	<b>24</b>
2.1 Introduction.....	26
2.2 Notions Sur Le Béton Ordinaire.....	27
2.3 Généralités Sur Le Béton Armé .....	28
2.4 Béton Renforce Par Des Fibres.....	29
2.4.1 Définition et Composition du béton renforcé par des fibres.....	31
2.4.2 Types de fibres.....	31
2.4.2.1 Les fibres métalliques .....	32
2.4.2.2 Les Fibres de polypropylène .....	34
2.4.2.3 Les Fibres de verre .....	34
2.4.3 Béton renforcé par des fibres métalliques .....	35
2.4.4 Avantages béton renforcé par des fibres.....	37
2.5 Concept Du Béton Fibré Et Son Utilisation Dans Le Génie Civil .....	38
2.6 Importance Du Béton Fibré Dans Le Soutènement Des Tunnels .....	39
2.7 Fonctionnement Typique D'un Soutènement En Voussoir En Béton Fibré .....	41
2.8 Conclusion .....	44
<b>Chapitre 03 : Béton fibré vis à vis Béton Armé dans les soutènements des tunnels .....</b>	<b>46</b>
3.1 Introduction.....	46
3.2 Présentation Du Cas D'étude- Soutènement En Béton Armé.....	47
3.2.1 Modélisation et maillage éléments finis du cas d'étude.....	48
3.3 Analyses Et Résultats Numériques - Cas Du Soutènement En Béton Armé .....	49
3.3.1 Réponse du modèle au soutènement en Béton Armé.....	49
3.4 Etude Paramétrique- Cas Du Soutènement En Béton Armé .....	52
3.4.1 Influence de la Profondeur du tunnel (H).....	52
3.4.2 Influence du diamètre du tunnel (D).....	54
3.4.3 Influence de l'épaisseur du soutènement (d).....	55
3.5 Analyses Et Résultats Numériques - Cas De Soutènement En Béton Fibré .....	56
3.5.1 Réponse du modèle au matériau Béton fibrés .....	56
3.6 Etude Paramétrique - Cas Du Soutènement En Béton Fibré.....	58
3.6.1 Influence de la Profondeur du tunnel (H).....	58
3.6.2 Influence du diamètre du tunnel (D).....	60
3.6.3 Influence de l'épaisseur du soutènement (d).....	61

3.7 Etude Comparative Entre Béton Armé Et Béton Fibré .....	62
3.7.1 Résultats des tassements en surface .....	62
3.7.2 Résultat des déplacements vertical en clé.....	63
3.7.3 Les résultats des moments .....	64
3.7.4 Les résultats des effort axiaux .....	65
3.7.5 Les résultats des déplacements horizontaux.....	66
3.8 Conclusion.....	67
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	69
BIBLIOGRAPHIE.....	70

# Introduction générale

L'ingénierie des tunnels est un domaine clé du génie civil, nécessitant une compréhension approfondie des techniques de construction et des matériaux utilisés pour garantir la sécurité et la durabilité des infrastructures souterraines.

Le béton armé un matériau indispensable dans la construction de ce type d'ouvrages est un alliage entre les aciers et le béton. Ce dernier occupe la première place en termes d'utilisation des matériaux à l'échelle mondiale depuis son invention. Son intérêt tient à sa très grande facilité d'utilisation, sa résistance à la compression et sa durabilité.

Toutefois, il est considéré bien imparfait à cause de son hétérogénéité. Sa résistance à la traction est très faible, ce qui empêche son utilisation en flexion. Le constructeur doit donc s'accommoder de ses imperfections et chercher à les atténuer par des additions qui modifient ses caractéristiques. Delà, est venue l'idée du béton armé qui a procuré, en rajoutant des armatures en acier au béton, une résistance plus grande en renforçant sa résistance à la traction. Cependant, même armé, le béton reste fragile, les armatures ne peuvent en effet s'opposer à la fissuration ou à la corrosion.

En répondant à ce souci, les chercheurs ont pensé à le renforcer par d'autres substances, et l'idée des fibres est apparue en raison de faire face à ces inconvénients. Il a été prouvé que l'ajout des fibres apporte une meilleure réponse au problème de fragilité du béton : Le béton devient apparemment plus ductile et les fissures sont mieux réparties et sa résistance à la traction augmente. Ces fibres confèrent au béton une résistance accrue à la fissuration et réduisent sa fragilité en limitant l'ouverture et la propagation de ces fissures.

Cette amélioration du comportement du béton a été mise à profit dans de nombreuses applications parmi, les revêtements de tunnels.

Entre autre, les résultats des différentes recherches menées sur les bétons renforcés par des fibres métalliques ces dernières années ont prouvé l'intérêt de l'utilisation de ce type de fibres dans les éléments préfabriqués (comme le cas soutènements en voussoirs des tunnels), en raison de leurs caractéristiques mécaniques supérieures à celles du béton non renforcé.

D'où l'objectif de ce mémoire qui se focalise sur l'étude de l'effet de l'utilisation de ces fibres dans le béton utilisé pour renforcer les soutènements des tunnels de type voussoirs.

Pour atteindre cet objectif, le mémoire a été structuré en trois chapitres, chacun abordant des aspects clés de cette problématique et visant à approfondir ce sujet. Il comprend une partie bibliographique et une partie numérique.

La partie bibliographique est divisée en deux chapitres. Le premier chapitre offre une vue d'ensemble des tunnels, en examinant les différents types des tunnels construits à faible et forte profondeur. Les méthodes de calcul et de conception des tunnels sont détaillées, avec une attention particulière aux techniques de creusement utilisées (tunnelier pressurisé : TBM) et aux soutènements (types, rôle, fonctionnement). Ce chapitre a été clôturé par la présentation de notions sur les tassements et les déplacements horizontaux causés par la construction des tunnels ainsi que sur le renforcement des soutènements de tunnels par du béton fibré.

Dans ce chapitre 2, nous avons dressé les deux grandes familles de béton utilisés pour les soutènements des tunnels : le béton armé et le béton fibré, l'un comme l'autre ont des avantages et des inconvénients. Nous avons présenté des généralités et des notions de base sur ces thématiques, le béton renforcé par des fibres est plus détaillé vu que c'est un matériau innovant. Nous avons présenté son concept, son utilisation dans le génie civil ainsi que son utilisation dans les soutènements des tunnels. L'importance du béton fibré dans le creusement des tunnels est présentée en parallèle pour montrer l'intérêt porté à ce sujet. Et enfin, nous avons terminé par citer le fonctionnement typique d'un soutènement de type voussoir en Béton fibré.

Le troisième chapitre présente une comparaison numérique entre le soutènement en béton armé et le soutènement en béton renforcé par des fibres dans les tunnels. Les résultats obtenus concernaient les tassements en surface, les déplacements verticaux et horizontaux du sol et au niveau du soutènement, les moments fléchissant ainsi que les efforts axiaux appliqués au soutènement. Une étude paramétrique est menée, prenant en compte trois variables clés : la profondeur, le diamètre du tunnel ( $H$ ,  $D$ ) et l'épaisseur de soutènement ( $d$ ). Cette étude permet de déterminer comment ces variables influencent les performances des soutènements et la stabilité du sol.

Les résultats obtenus soulignent l'importance des études consacrées à l'utilisation des fibres métalliques pour le renforcement des soutènements de tunnels.

Pour conclure, une conclusion générale est exposée, accompagnée de suggestions pour des recherches futures dans ce domaine.

Chapitre 1.

## **Etat de l'art sur les tunnels**

---

## Chapitre 1

# ETAT DE L'ART SUR LES TUNNELS

### 1.1 INTRODUCTION

Les tunnels sont des constructions souterraines conçues pour surmonter divers obstacles naturels et urbains, tels que les montagnes, les rivières, les zones urbanisées et les voies de circulation préexistantes.

Les tunnels ont une variété d'utilisations, allant du transport routier et ferroviaire aux Services essentiels tels que l'approvisionnement en eau et la gestion des eaux usées. Néanmoins, leur construction présente des risques potentiels pour la sécurité des travailleurs, l'environnement et les infrastructures avoisinantes.

Alors, il est essentiel de prendre des mesures préventives adéquates pour réduire ces risques et garantir la sécurité et la durabilité des tunnels. Actuellement, les tunnels sont également employés pour le transport des conduites d'eau potable et des égouts, ainsi que pour des objectifs militaires et de protection civile.

Ce chapitre est consacré à la présentation des tunnels, historique, définitions, techniques de creusement et de soutènement. Les tassements et les mouvements horizontaux seront exposés en parallèle.

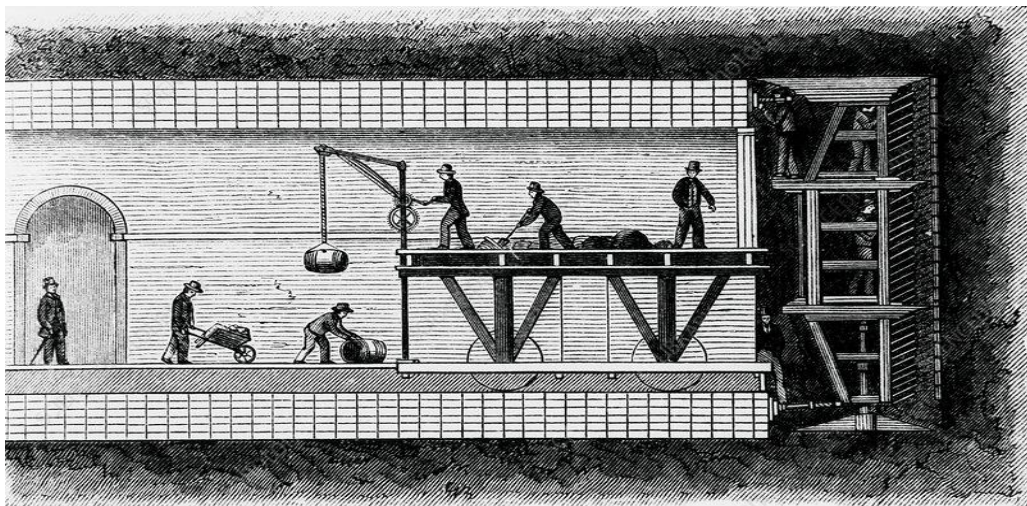
## 1.2 HISTORIQUE DES TUNNELS

Les ouvrages souterrains ne sont pas des découvertes modernes puisque leur construction remonte à l'époque où l'homme cherchait refuge dans des grottes naturelles ou dans les abris et couloirs souterrains qu'il creusait [1].

Diverses installations fortifiées étaient équipées de tunnels plus ou moins secrets permettant à leurs occupants de s'enfuir ou de circuler sans être vus. Pendant le XIXe siècle, l'essor de l'industrialisation en Occident a donné lieu à des avancées dans le domaine des ouvrages souterrains.

À l'origine, les tunnels étaient excavés manuellement, mais l'invention de la dynamite par Alfred Nobel a réduit la dépendance à la force humaine et a accéléré le processus d'excavation.

En 1825, Marc Brunel inventa un dispositif pour la construction du tunnel sous la Tamise à Londres. Il s'agissait d'un bouclier en fonte conçu pour protéger les ouvriers contre les éboulements, mais aucun mécanisme de mécanisation n'était intégré (Figure 1.1) [2].



**Figure 1.1** Tunnel sous la Tamise par Marc Brunel (1825)[3].

Cette technologie a été utilisée pour percer deux galeries d'observation, chacune mesurant 1,8 km de long, de part et d'autre de la Manche, dans le but de construire un tunnel reliant la France et l'Angleterre. Cependant, le projet a été abandonné.

Par la suite, les tunneliers ont continué à évoluer, mais leur utilisation est restée principalement limitée aux chantiers miniers, car ils étaient incapables de percer des roches dures.

En 1952, l'Américain James Robbins a inventé le premier tunnelier adapté aux roches dures, équipé d'une roue de coupe rotative. Depuis les années 1970, la construction des tunnels s'est développée à la fois dans le domaine des aménagements hydrauliques et, surtout, dans le secteur des communications rapides [1].

À travers le monde, on compte actuellement environ 130 tunnels routiers de plus de 3km de longueur dont 25 dépassent les 6 km, ainsi que plus de 150 tunnels ferroviaires de plus de 6 km de long.

Le tunnel routier le plus long au monde est le tunnel du Saint-Gothard en Suisse, achevé en 1980, mesurant 16,9 km, tandis que le tunnel ferroviaire le plus long est le tunnel de Seikan au Japon, inauguré en 1988, avec une longueur de 53,85 km. Le tunnel sous la Manche, qui a ouvert ses portes en 1994, s'étend sur près de 51 km, mais son tronçon sous-marin est le plus long du monde, couvrant 28 km [1].

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

Un tunnel est un passage souterrain creusé dans le sol, la roche ou les deux. Les tunnels sont utilisés pour le transport, l'adduction d'eau, les égouts et les conduites de services publics. Ils ont une longue histoire d'utilisation, remontant aux civilisations anciennes, et sont devenus de plus en plus importants dans la société moderne pour le développement des transports et des infrastructures.

Leur fonction peut varier, allant du transport à l'approvisionnement en eau, en passant par les égouts, la production d'énergie hydroélectrique, l'exploitation minière et divers autres usages.

Les tunnels peuvent être catégorisés selon leur objectif comme suit :

- Tunnels de transport : Ces ouvrages souterrains sont édifiés pour faciliter la circulation automobile, le transport ferroviaire et les déplacements piétonniers.
- Les tunnels hydrauliques : sont conçus pour le transport de l'eau ou d'autres liquides, tandis que les tunnels miniers sont utilisés pour l'extraction de minerais ou de roches.
- Les tunnels de service public : sont construits pour faciliter l'accès aux infrastructures publiques telles que les égouts, les conduites d'eau ou les câbles électriques.
- Les tunnels pour piétons : sont des passages souterrains conçus spécifiquement pour les piétons, offrant un moyen sécurisé et protégé de traverser des routes, des voies ferrées ou d'autres obstacles.

Chaque type de tunnel est conçu en fonction de son objectif spécifique, ce qui entraîne des caractéristiques uniques. En outre, les tunnels peuvent également être classés en fonction de leur forme, qu'elle soit circulaire, elliptique, rectangulaire, ou en fonction de leur profondeur :

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

Les tunnels situés à une faible profondeur se distinguent par un rapport spécifié par [4] :

$$H/B < 10$$

Avec :

H : la profondeur de tunnel

B : la largeur du tunnel.

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

Un tunnel est qualifié de profond lorsque :  $H / B \geq 10$

## **1.4 METHODES DE CALCUL DES TUNNELS**

Le choix de la méthode de construction appropriée dépend d'une série de compromis entre les exigences géométriques du projet, les caractéristiques du terrain, les particularités du site et de son environnement, ainsi que les contraintes géologiques et hydrogéologiques, y compris la présence éventuelle de nappes phréatiques.

Les techniques de calcul utilisées pour concevoir des tunnels adoptent généralement une approche tridimensionnelle, prenant en compte l'interaction complexe entre le tunnel, les dispositifs de soutènement et le sol environnant.

Elles font largement appel à des méthodes de modélisation et de simulation numériques pour analyser le comportement du tunnel et du sol, et pour optimiser la conception des systèmes de soutènement et de revêtement.

On peut distinguer trois principales catégories principales de ces méthodes de calcul :

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

### **1.4.1 Méthodes analytiques**

Les méthodes analytiques, comme la méthode de convergence-confinement, sont souvent utilisées comme une étape préliminaire en vue de l'application ultérieure de méthodes numériques plus avancées, telles que la méthode des éléments finis.

Les méthodes analytiques peuvent se séparer en trois familles:

1. Les méthodes analytiques élastiques (telles que celles développées par Lamé, Kirsch et Einstein- Schwartz) prennent en compte le comportement élastique permanent du terrain environnant pendant l'excavation.

2. Les méthodes analytiques élastoplastiques, telles que celles impliquées dans la convergence-confinement, la méthode de l'analyse limite, sont capables de prendre en compte une zone plastique autour du tunnel [33].
3. La méthode de convergence-confinement (la méthode la plus populaire) est une approche analytique où toutes les formules sont clairement définies et peuvent être utilisées avec une simple calculatrice. La convergence se réfère à la déformation du terrain due à la présence du tunnel.

Le confinement est associé à la pression radiale qui s'exerce sur les parois de l'excavation en présence d'un soutènement [5].

La méthode de Convergence-Confinement se distingue par son approche axée sur l'interaction entre le massif et le soutènement, ce qui la différencie des méthodes plus anciennes qui se contentaient de substituer le massif par un système de charges préexistantes sur le soutènement, ou qui ignoraient les phases d'excavation.

Bien que cette méthode offre une approche simplifiée pour dimensionner les tunnels en prenant en compte les conditions de mise en œuvre du soutènement derrière le front de taille, elle implique toutefois une simplification des lois de comportement et une homogénéisation de certaines zones du massif. Il est important de noter que cette méthode a tendance à sous-estimer la pression exercée sur le soutènement [33].

#### **1.4.2 Méthodes empiriques**

La méthode empirique de tunnel est une approche de conception qui se base principalement sur l'expérience et les connaissances tirées de projets antérieurs similaires.

Plutôt que de se fier uniquement à des calculs théoriques, cette méthode s'appuie sur les observations pratiques et les données historiques pour guider le processus de conception et d'exécution du tunnel.

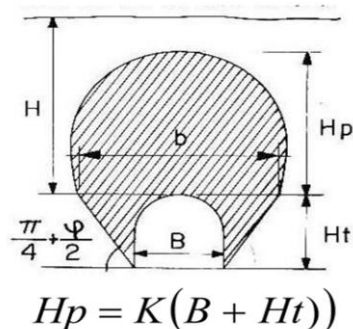
Les méthodes empiriques de tunnel sont mises en œuvre en recourant à l'observation directe et indirecte, ainsi qu'à l'expérience, pour comprendre le comportement des formations rocheuses lors de l'excavation.

En optant pour ces approches, les ingénieurs peuvent anticiper de manière plus précise le comportement du terrain pendant le creusement des tunnels et concevoir des systèmes de soutènement visant à réduire le risque d'effondrement ou d'autres incidents.

La méthode la plus reconnue est celle de Terzaghi repose sur une compréhension approfondie des interactions entre les particules du sol, l'eau interstitielle et les charges externes appliquées.

Dans le but d'évaluer les charges exercées sur les cintres en acier à l'intérieur des tunnels, cette méthode et ses avancements ultérieurs ont longtemps constitué le fondement du dimensionnement des tunnels.

Le système de classification de Terzaghi a amélioré le creusement des tunnels en 1946 en fournissant une méthode de classification des roches sur la base de leurs propriétés techniques. (Figure 1.2).



**Figure 1.2** méthode de TERZAGHI [6]

Avec :  $H_p = k(B + H_t)$

$H_p$  : Hauteur de surcharge de terrain uniformément répartie .

$B$  : Largeur du tunnel.

$H_t$  : Hauteur du tunnel.

### **1.4.3 Méthodes numériques**

Le fondement partagé par les méthodes numériques réside dans la subdivision de l'espace du problème considéré en éléments discrets, ainsi que dans la résolution d'un ensemble d'équations pour parvenir à la solution souhaitée.

Les méthodes numériques sont employées en ingénierie des tunnels afin de modéliser le comportement du tunnel et du terrain environnant dans diverses situations.

La méthode des éléments finis (MEF) représente l'une des approches numériques les plus répandues en ingénierie des tunnels.

La méthode des éléments finis (MEF) consiste à diviser un domaine complexe en éléments finis plus simples, puis à résoudre numériquement les équations gouvernant le comportement du système dans chacun de ces éléments. Ces solutions locales sont ensuite assemblées pour obtenir une solution globale du problème. En ingénierie des tunnels, la MEF est utilisée pour modéliser le comportement du sol, du soutènement et du tunnel lui-même sous différentes charges et conditions. Elle permet aux ingénieurs de prévoir le comportement du tunnel, d'optimiser sa conception et de garantir sa sécurité tout au long de sa durée de vie.

### **1.5 METHODES DE CREUSEMENT DES TUNNELS**

Le choix de la méthode appropriée dépend d'un compromis entre les exigences géométriques de l'ouvrage, les caractéristiques du sol, les particularités du site et de son environnement, ainsi que les contraintes géologiques et hydrogéologiques, telles que la présence d'une nappe phréatique.

Grâce aux avancées récentes dans les techniques de creusement, de soutènement et de revêtement, il est désormais possible de réaliser des ouvrages dans une grande variété de terrains avec des complexités majeurs.

On distingue Quatre principales méthodes d'exécution :

### 1.5.1 Creusement à l'explosif

Pendant de nombreuses décennies, l'excavation par explosifs a été la méthode la plus répandue pour creuser des tunnels dans les roches de dureté moyenne, également connue sous le nom d'excavation conventionnelle. Cette méthode est fréquemment employée pour la construction de tunnels traversant des formations rocheuses où le dynamitage manuel (à l'aide de marteaux-piqueurs ou de pelles hydrauliques) ou le terrassement mécanique ne sont plus praticables.

La séquence de tir habituelle implique généralement de faire détoner les explosifs au centre du front en premier lieu pour éliminer le blocage, suivi d'un délai de quelques microsecondes avant de faire détoner les charges de plus en plus périphériques (figure 1.3).

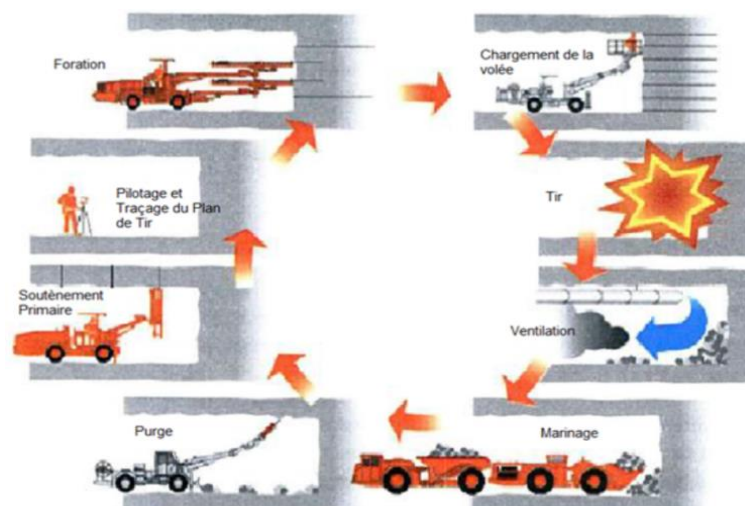


Figure 1.3 excavation par l'explosif [34]

### 1.5.2 Creusement par attaque ponctuelle

Cette méthode d'excavation est une technique mécanique qui repose sur l'utilisation d'une machine à attaque ponctuelle. Elle permet de creuser des profils de dimensions variées en utilisant une tête de fraisage montée sur un bras mobile. Généralement employée sur des roches tendres ou moyennement altérées, cette méthode implique l'utilisation d'une cisaille pour racler et balayer la surface. Comparativement aux explosifs, cette approche est considérée comme nettement plus efficace (figure 1.4).



**Figure 1.4** Creusement par attaque ponctuelle [7].

### **1.5.3 Creusement avec tunnelier- TBM (Tunnel Boring Machine)**

Cette méthode d'excavation est utilisée dans des terrains de faible résistance, lorsque le front de taille ne peut pas supporter les pressions hydrostatiques ou du sol sans un soutènement approprié. Dans cette approche, le sol est excavé sur toute sa section à l'aide de techniques mécaniques.

Le tunnelier, une machine de forage en continu, est employé pour réaliser l'excavation du tunnel et, si nécessaire, pour mettre en place un revêtement près du front de taille. Son concept est élaboré pour mener cette opération tout en minimisant les perturbations de l'équilibre naturel du sol. Dans des terrains tendres nécessitant un soutènement important, la forme circulaire est préférée pour résister aux contraintes. Le tunnelier est alors équipé d'un bouclier, et le front peut être pressurisé. Pour les grands diamètres, l'excavation est réalisée de manière globale à l'aide d'une roue de coupe située à l'avant de la machine, avec un processus de confinement approprié.

Au fur et à mesure de sa progression, la machine avance en s'appuyant sur le revêtement installé grâce à des vérins. Généralement, ce revêtement est définitif, mais dans certaines situations, il peut être complété par un anneau intérieur remplissant des fonctions supplémentaires en plus de sa résistance mécanique. Ainsi équipé d'un bouclier mécanisé,

Le tunnelier est spécifiquement conçu pour creuser des galeries souterraines. Dans ce contexte, il doit remplir plusieurs fonctions :

- Excaver le sol sur toute sa section.
- Soutenir le front de taille.
- Soutenir les parois latérales pendant l'excavation.
- Progresser en s'appuyant sur le revêtement installé grâce à un bouclier.
- Installer le revêtement sous une jupe métallique.
- Évacuer les déblais à l'arrière de la machine et les transporter vers les installations de décharge.



**Figure1.5** excavation par TBM [8]

## 1.6 SOUTÈNEMENT DES TUNNELS

Le soutènement est évidemment le facteur le plus crucial pour la sécurité du chantier. Les constructions souterraines manquent de stabilité, ce qui entraîne des effondrements parfois, soit pendant l'excavation, soit après un certain temps.

Dans d'autres cas, la convergence de l'excavation est trop importante, ou bien les déformations causées par le creusement sont inacceptables pour les structures environnantes. Il devient alors nécessaire de soutenir l'excavation [9].

Le rôle du soutènement est d'assurer la stabilité à court et à long terme et de contrôler les déformations immédiates ou progressives des terrains environnants.

Le soutènement des tunnels comprend une gamme de techniques visant à renforcer et à stabiliser les parois de l'excavation souterraine.

Ces différentes techniques de soutènement sont sélectionnées en fonction des conditions géologiques du site, de la taille et de la forme du tunnel, ainsi que des exigences spécifiques du projet.

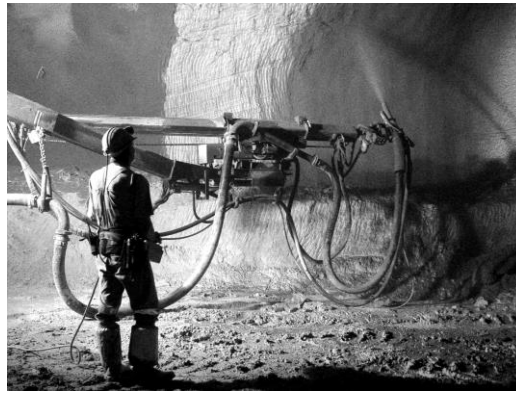
Les types de soutènement utilisés sont :

### **1.6.1 Les soutènements agissant par confinement du terrain encaissant**

Le béton projeté seul et le béton projeté associé à des cintres légers sont les plus couramment utilisés.

Au cours des dernières années, l'utilisation du béton projeté comme méthode de soutènement en souterrain a connu une croissance significative. On l'utilise afin de créer une couche de confinement qui renforce la résistance du terrain encaissant. On l'utilise près du front, soit seul soit en combinaison avec le boulonnage et/ou les cintres légers.

Le béton projeté offre l'avantage de créer une couche permanente qui préserve le sol des modifications causées par l'air et l'humidité, et qui bouche les interstices. Son confinement global permet de réduire la déformation et d'éviter la détérioration des caractéristiques mécaniques du sol. Il joue un rôle essentiel dans la structure et reprend les responsabilités issues du terrain.[10]



**Figure1.6** Soutènement avec du Béton projeté [10]

### **1.6.2 Soutènements agissant à la fois par confinement et comme armature du terrain**

Le boulonnage consiste à renforcer le terrain encaissant à l'aide de barres généralement métalliques, d'une longueur comprise entre 1,50 et 5 m, insérées dans le terrain à partir de la surface libre.

Il s'agit de différentes formes de boulonnage, qu'il soit utilisé seul ou en combinaison avec du béton projeté, des cintres légers, ou les deux en même temps. Dans les années 50, la méthode de renforcement des sols en place à l'aide de barres en acier est apparue dans les mines des États-Unis. Il a commencé en France au début des années 70 avec la construction d'un mur provisoire pour un prolongement de la ligne de Paris à Versailles.

L'expérience française s'est continuellement enrichie grâce à la flexibilité d'utilisation et de mise en œuvre de cette technique. Son application, en tant que renforcement radial, s'est particulièrement développée dans les chantiers souterrains difficiles pour traiter des problèmes ponctuels comme les chutes de blocs. L'extension de cette technique aux terrains de caractéristiques médiocres a conduit à son utilisation systématique comme soutènement radial définitif, en combinaison avec le béton projeté, selon la Nouvelle Méthode Autrichienne.

L'idée d'appliquer le boulonnage au front de taille du tunnel s'est développée dans les années 80, sa première utilisation concerne un des tunnels de la ligne ferroviaire Rome-Florence en Italie en 1988.[11]

La principale méthode d'action des boulons est le confinement, c'est-à-dire qu'ils créent, le long de la paroi du tunnel, une contrainte radiale qui, bien que faible, cette contrainte permet d'augmenter de manière significative la résistance du terrain dans la direction tangentielle. Même si le rocher a localement dépassé sa limite de rupture, il peut retrouver un nouvel état d'équilibre grâce à la formation de voûtes de décharge tout autour de l'excavation.

Les boulons agissent également comme des armatures, améliorant la résistance au cisaillement du terrain fracturé et lui conférant une sorte de cohésion artificielle. On remarque que le mode d'action du boulonnage est très différent de celui des cintres : dans le premier cas, le terrain est aidé à se soutenir lui-même en utilisant ses propres capacités, tandis que dans le second cas, il joue un rôle plus passif.

Les boulons sont fabriqués à partir de deux matériaux : l'acier ou la fibre de verre. L'acier est utilisé pour le boulonnage radial des tunnels, tandis que la fibre de verre est associée au boulonnage frontal.[11]



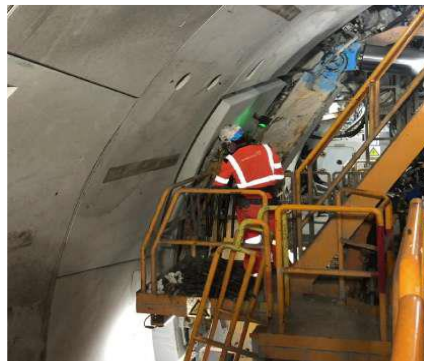
**Figure 1.7** Pose de boulons au front de taille [11]

### 1.6.3 Soutènements agissant par supportage

Dans cette catégorie existent les cintres lourds, les cintres légers et les Voussoirs.

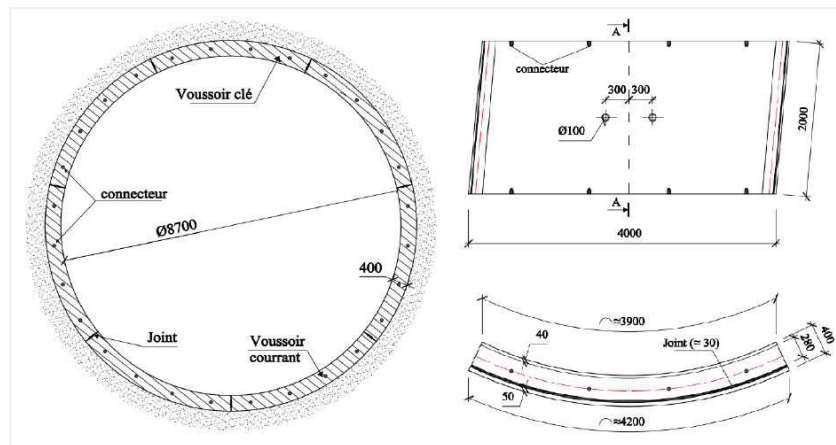
Les voussoirs ont un soutènement mobile qui avance avec le front. Des anneaux cylindriques successifs les fixent et sont utilisés comme support pour l'avancement du bouclier.

Lorsque le tunnelier progresse, le soutènement radial immédiat est obtenu par le bouclier et la jupe du tunnelier (Figure 1.8). On y installe un revêtement de voussoirs préfabriqués en béton armé ou fibré à l'aide d'un érecteur à l'intérieur de la jupe. On considère généralement ce revêtement comme étant définitif. Ils sont placés, assemblés et boulonnés à l'abri de la jupe du tunnelier. Remarquons que les voussoirs sont légèrement trapézoïdales (Figure I-8), ce qui permet de garantir les courbures du tunnel. La surcoupe des outils et la conicité de la jupe font que le diamètre d'excavation du tunnel dépasse celui des anneaux du tunnel. De cette façon, cette différence crée un vide annulaire entre les voussoirs et le sol, d'environ 10 à 20 cm de long. [12]



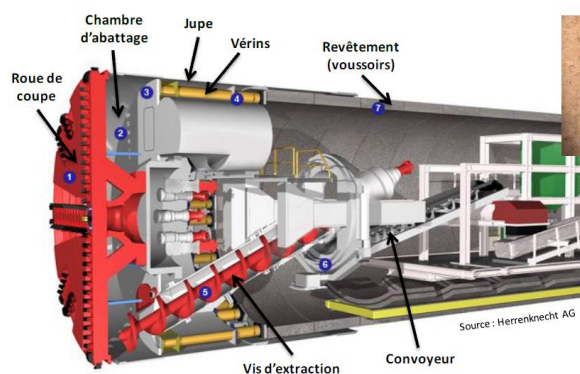
**Figure 1.8** Mise en place d'un voussoir dans l'anneau [12]

Dans la figure 1.9, on peut observer la configuration d'un voussoir courant classique : l'épaisseur du voussoir est de 400 mm, sa largeur est d'environ 2000 mm et sa longueur droite est d'environ 4000mm. Le tunnel est formé d'un anneau de sept voussoirs rhomboïdaux dont le diamètre intérieur est de 8700 mm et le diamètre extérieur de 9500mm. Deux cônes sont placés dans chaque voussoir pour être positionnés par l'érecteur du tunnelier. Toute la surface latérale du voussoir est protégée par un joint d'étanchéité [12].



**Figure 1.9** Géométrie du revêtement et d'un voussoir typique [12]

En général, dans les terrains bien entretenus, l'excavation est effectuée de manière traditionnelle (explosif ou avec des machines à attaques ponctuelles) ou avec des boucliers mécanisés ouverts [13]. Le soutènement provisoire de l'excavation (frontale et radiale) est alors effectué en utilisant des boulons, du béton projeté, des cintres en acier ou en congelant le terrain si besoin. Cette dernière technique, utilisée notamment dans les tunnels d'Holland sas [14], permet également de compenser les pressions hydrostatiques [15].



**Figure 1.10** : Schéma de principe d'un tunnelier à pression de terre [15]

## 1.7 RÔLE DU SOUTÈNEMENT

En général, le creusement d'une galerie implique la construction d'un soutènement d'une importance variable en fonction de la nature du terrain, de la taille de l'excavation et de la méthode employée. Il est possible qu'il ne soit pas présent dans les situations les plus favorables (galerie creusée dans une roche solide et peu fracturée) ou qu'il soit nécessaire d'effectuer un pré-soutènement en avant du front de taille, voire d'utiliser un bouclier à front pressurisé en terrains très mauvais. Le soutènement vise à atteindre :

Pour assurer la protection du personnel qui travaille dans la galerie.

Dès la phase d'abattage du terrain, il est essentiel de garantir la stabilité des parois de celle-ci et, si besoin est, de réduire les déformations.

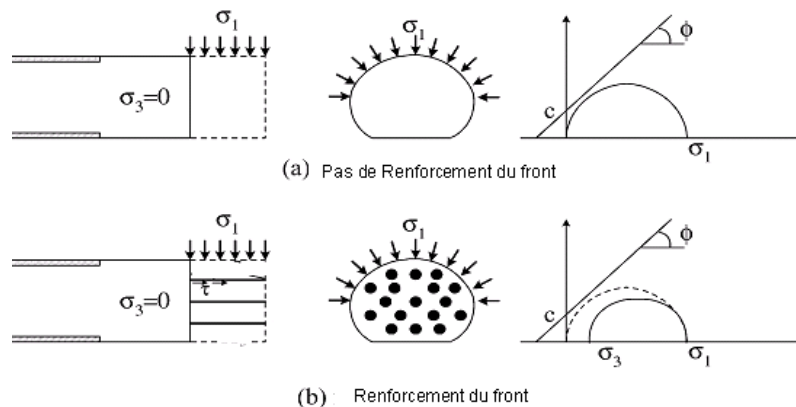
Il est important de préserver le terrain en cas de risque d'évolution défavorable (altération, etc.) après l'ouverture, ce qui entraînerait une diminution inacceptable de ses caractéristiques.

Les techniques habituelles d'exécution impliquent l'emploi d'un soutènement métallique (boulons, cintres métalliques, voussoirs en fonte) ou en béton (béton projeté, prévôté bétonnée avec ou sans cintres, voussoirs en béton armé) et son maintien en place lors du bétonnage du revêtement final éventuel.

La stabilité de la galerie pendant la réalisation des travaux (figure 1.11) est assurée par le soutènement, qui contribue également à la stabilité définitive de l'ouvrage en réduisant les efforts transmis par le revêtement qui est ensuite posé à l'intérieur. L'importance et la répartition des efforts que devra supporter le revêtement final sont souvent directement influencées par la conception du soutènement.

Lorsqu'on ne met pas en œuvre de revêtement (figure 1.11), la pérennité de l'action du soutènement doit être assurée : protection contre la corrosion ou contre un vieillissement prématuré, vérification de l'évolution des caractéristiques du terrain à long terme.

Afin d'assurer l'équilibre dans certaine nature de sol, un soutènement est indispensable (figure ).



**Figure 1.11** Rôle du soutènement [16]

## 1.8 FONCTIONNEMENT DU SOUTÈNEMENT

Lorsque l'on construit un tunnel, les contraintes anciennes du massif se déplacent sur le contour de la cavité, ce qui crée un « effet de voûte » permettant la tenue de cette cavité.

Le soutènement joue un rôle essentiel dans la mise en place de cet état d'équilibre en limitant l'extension du volume de terrain décomprimé autour de la cavité.

Lorsque le terrain est de bonne qualité (rocher sain peu fracturé), le rôle du soutènement peut se limiter à la maîtrise des instabilités locales, comme les blocs isolés découpés par le réseau de discontinuités.

On a développé cette idée d'un rôle actif du soutènement en même temps que l'utilisation des techniques de soutènement qui permettent au terrain de participer activement à sa stabilité (boulons, béton projeté, cintres légers mis en place rapidement après l'excavation).

Dans les temps passés, le soutènement était plutôt considéré comme une structure destinée à supporter les charges pesant sur le terrain, charges sur lesquelles on n'avait pas d'influence. Ce problème peut survenir en particulier lorsque le soutènement est réalisé de manière à ne pas éviter la désorganisation du terrain autour de la cavité. Il peut alors être

contraint de supporter de manière passive des charges importantes sans pour autant maîtriser les mouvements du terrain.

Il est évidemment préférable d'éviter cette situation, qui peut se produire par exemple avec un soutènement à base de cintres lourds profilés mal bloqués sur le terrain.

Enfin, il est possible de conclure qu'un soutènement bien élaboré doit exercer une pression de confinement sur le terrain dès qu'il commence à se déformer et doit chercher à préserver autant que possible les caractéristiques de résistance du massif autour du tunnel. Dans certaines situations, le soutènement doit garantir une fermeture totale de la section excavée, par exemple en installant un radier provisoire en béton projeté le plus près possible du front de taille. À l'extrême, le soutènement peut même entraîner une amélioration de la résistance du sol (rôle d'armature des boulons, injection de traitement).

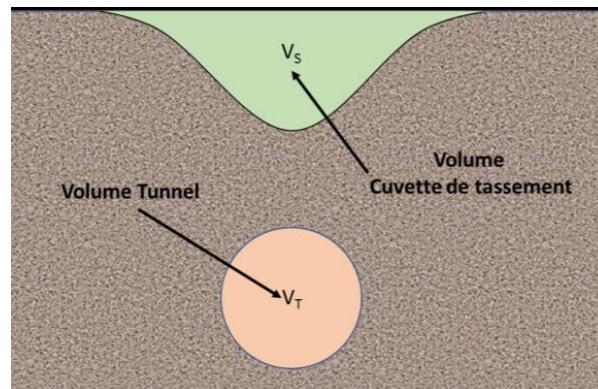
En revanche, le soutènement ne doit pas entraîner (en raison d'une rigidité excessive) l'apparition d'efforts exagérés qu'il ne pourrait pas reprendre. Il convient d'examiner ce problème en particulier dans le cas des tunnels à grande profondeur [5].

### **1.9 TASSEMENTS DANS LES TUNNELS**

L'influence des conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques sur les tassements est également importante. Toutefois, les projets à faible profondeur sont souvent plus vulnérables et requièrent donc des mesures de précaution plus strictes [33].

En ce qui concerne les travaux réalisés à l'aide d'un tunnelier, les causes des tassements sont les tassements à l'avant et au front, les tassements le long du bouclier (attribuables à la surcoupe), les tassements à la sortie de la queue du bouclier et les tassements d'ovalisation du revêtement de l'ouvrage.

D'après différentes études [17], il a été démontré que le creusement entraîne la création d'une cuvette de tassement centrée sur l'axe de creusement et de forme gaussienne, conformément aux hypothèses empiriques de Peck [1969].



**Figure1.12** Cuvette de tassement transversale [18]

### 1.10 DEPLACEMENTS HORIZONTAUX DANS LES TUNNELS

Lorsqu'un tunnel est creusé, des vibrations dans le sol sont produites plus ou moins loin de l'ouvrage selon les caractéristiques du terrain et les conditions de fonctionnement de la machine.

Outre les mouvements verticaux mentionnés ci-dessus, on observe également l'émergence de mouvements horizontaux dans les directions transverse et longitudinale de l'ouvrage. Sur le terrain, des relevés réalisés à l'aide d'inclinomètres permettent de repérer ces mouvements. La position du tunnelier, les conditions géologiques et la Profondeur du tunnel influencent ces derniers [17].

Pendant la construction du métro (TBM à pression de boue) de Toulouse en molasse et à Lyon en couches alternées d'argile et de sables et de limons, d'inclinomètres ont été installés de part et d'autre du tunnel pour mesurer les mouvements horizontaux transversaux pendant la progression du tunnelier (Figure 1.13). Dès que l'on se trouve en dessous du radier du tunnel, les mesures inclinométriques indiquent de très faibles mouvements horizontaux du sol. D'autre part, les mouvements horizontaux sont importants à la profondeur du tunnel, voire dans l'épaisseur de couverture au-dessus du tunnel (chantier de Lyon).

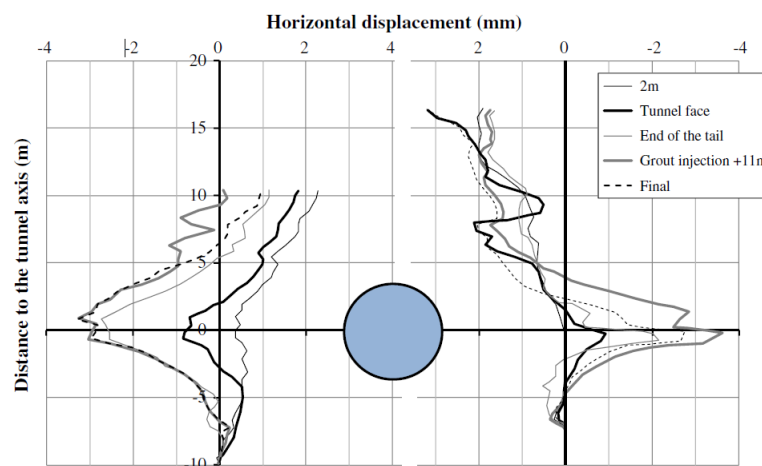
En outre, ces mouvements horizontaux transversaux changent selon l'avancement du tunnelier.

En ce qui concerne le chantier de Lyon (Figure 1.13), il est observé que le terrain situé dans l'axe du tunnel est refoulé radialement, tandis que le terrain situé dans la zone contiguë est également refoulé radialement.

Au-dessus du tunnel, la couverture tend à se concentrer vers le centre de la cuvette. Nous constatons une augmentation des amplitudes des phénomènes observés à mesure que le processus progresse.

Une fois que l'injection du vide annulaire a été réalisée, il y a une légère relaxation dans le tunnel.

En ce qui concerne la ligne B du métro de Toulouse [35], le sol a été conduit vers le tunnel par un mouvement de convergence (Figure 1.13). La valeur de convergence maximale un peu au-dessus du niveau de l'axe du tunnel. Le mouvement de convergence débute 5 mètres après la traversée du front de taille (roue de coupe du tunnelier) et se poursuit au fil du temps jusqu'à 15 jours après la traversée. Le caractère fortement sur consolidé du sol a été associé à cette convergence du sol. Il est également observé que dans des sols plus souples comme la molasse, la levée du tunnel entraîne peu, voire pas, de mouvements de sol horizontaux dans la couche de couverture au-dessus du tunnel.



**Figure 1.13** Déplacements horizontaux dans une section transversale, (a) chantier du métro de Lyon d'après Ollier (1997) [18]

### 1.11 RENFORCEMENT DES SOUTÈNEMENTS DE TUNNELS PAR DU BETON FIBRE

Le béton projeté est le plus souvent utilisé en complément de soutènement métallique (boulons, cintres réticulés) ou en remplacement de blindage métallique (entre cintres).

Il doit être alors renforcé par un treillis soudé ou des fibres. Le choix est à faire pour chaque projet en fonction du contexte géologique.

Le renforcement peut être obtenu dans de nombreux cas par l'addition de fibres dans le béton projeté. Par rapport aux bétons renforcés de treillis métalliques, les avantages sont:

- Par sa rapidité de mise en œuvre, l'utilisation de béton fibré minimise le nombre des personnels présents sous l'excavation à soutenir et leur durée d'exposition, exécutée au moyen d'un robot de projection, la couche de béton fibré permet même de n'exposer aucun ouvrier et donc d'améliorer la sécurité du personnel .
- Les bétons fibrés permettent de s'adapter au profil de l'excavation.
- Les bétons fibrés évitent la chute de morceaux de béton sous des efforts de flexion importants
- Les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.
- Les bétons renforcés de fibres sont intéressants dans la mesure où leur comportement est ductile et non pas fragile, point essentiel pour le soutènement. Le choix futur des fibres doit être guidé par ce besoin de rupture ductile.

### 1.12 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons exploré le rôle fondamental des tunnels dans notre quotidien , les tunnels jouent un rôle crucial dans les infrastructures de transport, de fourniture d'eau, d'égouts, d'énergie et d'autres domaines. en les définissant, en retraçant leur évolution historique et en examinant les divers types existants. Nous avons également abordé quelques-unes des méthodes de calcul employées pour leur conception et leur construction, tout en mettant l'accent sur les soutènement qui forme l'élément crucial de

ce type de construction. Les types, le rôle ainsi que le fonctionnement de cette structure ont été bien détaillés.

Une exposition des mouvements et déplacement horizontaux a été présentée pour clarifier ce comportement.

En résumé, les tunnels demeurent des infrastructures essentielles en constante évolution, façonnées par les avancées technologiques et les besoins de la société. Ainsi, une étude approfondie dès les phases initiales est cruciale pour relever les défis et les complexités, notamment dans les environnements urbains où les interactions avec d'autres structures sont inévitables.

Dans le chapitre suivant, il serait question présenter les bétons en général et les bétons renforcés par des fibres en détails.

## **Chapitre 2. Synthèse sur le Béton armé et le Béton renforcé par des fibres**

---

## Chapitre 2

***Synthèse sur le Béton armé et le Béton renforcé par des fibres*****2.1 INTRODUCTION**

Le béton occupe la première place en termes d'utilisation des matériaux à l'échelle mondiale depuis son invention. Son intérêt tient à sa très grande facilité d'utilisation, sa résistance à la compression et sa durabilité.

Toutefois, il est considéré bien imparfait à cause de son hétérogénéité, et ne peut être mis en œuvre qu'additionné d'eau en excès, d'où sa propension au retrait et au fluage. Sa résistance à la traction est très faible, ce qui empêche son utilisation en flexion. Le constructeur doit donc s'accommoder de ses imperfections et chercher à les atténuer par des additions qui modifient ses caractéristiques...

En répondant à ce souci, le béton armé procure une résistance à la traction grâce aux armatures disposées à l'intérieur de ce matériau qui renforce sa résistance. Cependant, même armé, le béton reste fragile, les armatures ne peuvent en effet s'opposer à la fissuration ou la corrosion.

D'où, s'est créé le besoin d'utiliser une nouvelle substance pour faire face à ces inconvénients : les fibres. Il a été prouvé que l'ajout des fibres apporte une meilleure réponse au problème de fragilité du béton : Le béton devient apparemment plus ductile et les fissures sont mieux réparties, sa résistance à la traction augmente de même [19].

Cette amélioration du comportement du béton a été mise à profit dans de nombreuses applications comme les pieux forés, les dallages industriels, les revêtements de tunnels, etc.

Ce chapitre a été préparé en vue de présenter ces matériaux et les définir. Nous débuterons alors ce chapitre par présenter le béton ordinaire, ensuite nous présenterons le béton armé et le béton renforcé par des fibres. L'accent sera mis surtout sur le béton renforcé par des fibres vue que c'est le point crucial de ce travail de mémoire.

## 2.2 NOTIONS SUR LE BETON ORDINAIRE

Les Romains sont reconnus comme les premiers découvreurs du béton et les pionniers dans son utilisation comme matériau de construction. Ils fabriquaient leur propre béton en mélangeant de la chaux, de la céramique écrasée et du sable volcanique, qu'ils appelaient chaux aérienne en raison de sa capacité à durcir au contact de l'air [20].

Le béton (figure 2.1), un matériau de construction composé de ciment, de granulats, d'eau et parfois d'adjuvants et d'ajouts minéraux, offre une résistance supérieure à celle des roches naturelles une fois durci. Bien qu'il résiste bien à la compression, sa faible résistance à la traction a été surmontée par l'invention du béton armé en 1784.

Une avancée majeure est survenue en 1930 avec le béton précontraint, répartissant les contraintes et augmentant sa résistance à la traction. En 1970, des recherches ont amélioré ses propriétés, notamment avec les bétons à haute performance, atteignant les 100 MPa de résistance à la compression [21].



**Figure 2.1** Béton ordinaire [39]

Dans le domaine du génie civil, le béton est renforcé de deux manières principales : d'une part, par l'incorporation d'armatures en acier, et d'autre part, par l'ajout des fibres, pouvant être métalliques, organiques ou minérales (tableau 2.1). En ce qui suit, ces deux catégories de béton vont être présentées et détaillées.

### 2.3 GENERALITES SUR LE BETON ARME

Le béton armé est une association de deux matériaux le béton et les armatures en acier précisément disposées.

Son fonctionnement normal nécessite une fissuration fine des zones de contraintes, ce qui ne compromet pas sa durabilité si l'ouverture de fissure est inférieure à 0,10 mm en milieu agressif et inférieure à 0,30 mm en milieu non agressif [22].

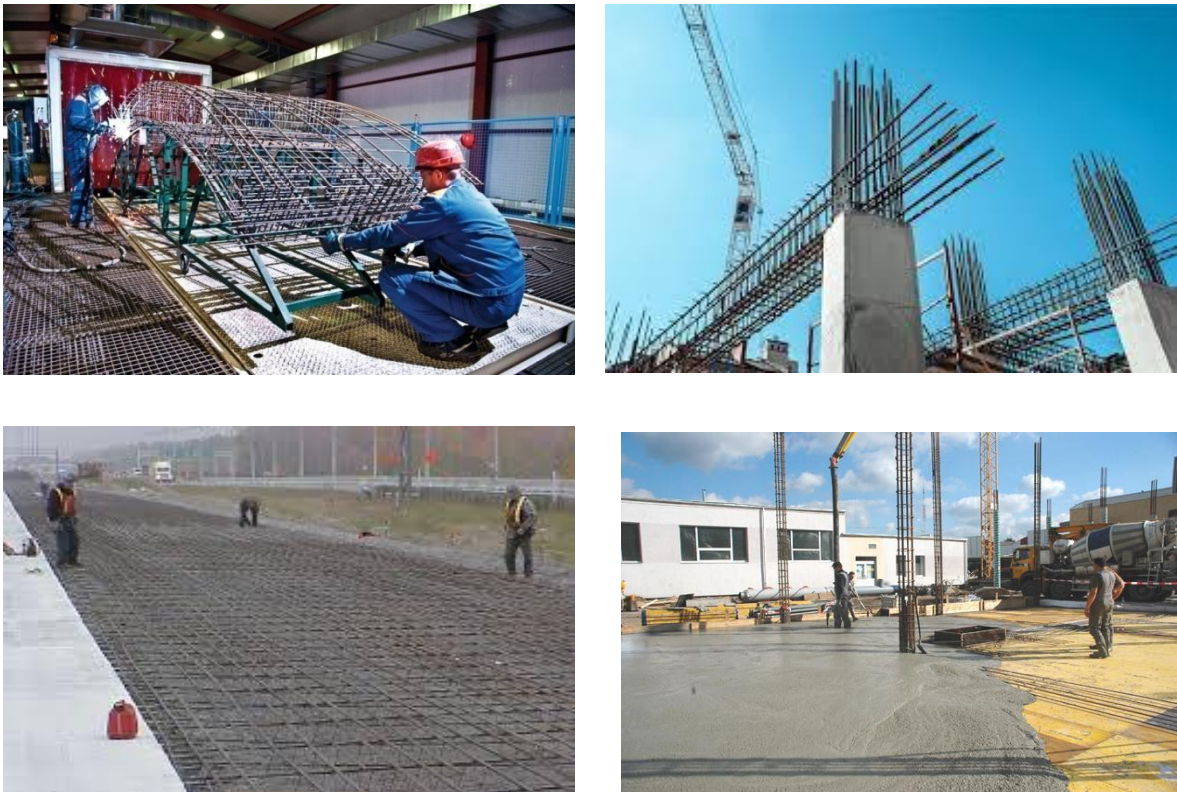
Sa résistance résulte de la collaboration entre ces deux matériaux. En incorporant des armatures en acier, sa capacité à résister à la traction est renforcée.

Cette union permet la construction de structures stables et pérennes, capables de supporter des charges considérables et de faire face à des contraintes extérieures capitales. Les armatures d'acier, tels que les barres d'armature ou les treillis soudés (figure 2.2), ont une importance fondamentale dans la structure du béton armé. Ils assurent sa résistance à la traction.



**Figure 2.2** Béton Armé [39]

Cette association procure au béton armé une meilleure capacité à résister aux déformations et aux forces horizontales, de traction, de flexion et de compression par rapport au béton ordinaire. Elle permet la construction d'une multitude de projets d'ingénierie civile et de construction, comme les soutènements des tunnels, les bâtiments, les chaussées...etc. (figure 2.3) [40].



**Figure 2.3** Utilisations du Béton Armé [23]

#### **2.4 BETON RENFORCE PAR DES FIBRES**

La conception des bétons renforcés de fibres métalliques en tant que matériau de construction véritable peut être située au début des années 60. Les travaux pionniers de Romualdi (1963) sur l'arrêt de la propagation des fissures dans une matrice fragile par l'incorporation de fibres ont marqué le point de départ et ont abouti au dépôt d'un brevet.

Ces fibres agissent comme des renforts dispersés dans le béton, augmentant ainsi sa résistance à la fissuration et sa capacité à absorber les contraintes.

Depuis lors, les chercheurs se sont principalement penchés sur le comportement des fibres et leur interaction avec la matrice. Ces efforts de recherche ont été efficacement complétés par les industriels fabricants des fibres, qui ont développé des géométries et des matériaux constitutifs plus performants. Il est rapidement devenu évident que les propriétés obtenues pouvaient varier de manière significative en fonction du type de fibre utilisé, de son dosage, de la qualité de la matrice et des techniques de mise en œuvre employées.

Selon un rapport technique publié par l'Association Internationale des Tunnels et de l'Espace Souterrain [25], les segments des tunnels en béton préfabriqué renforcés avec des barres d'acier sont typiquement vulnérables à la corrosion, ce qui peut entraîner l'écaillage du béton et une perte de sa capacité structurelle.

De plus, ces voussoirs sont soumis à des tensions lors des phases transitoires, ce qui peut favoriser l'apparition de fissures et réduire la fiabilité de l'entretien.

Ces problèmes peuvent être atténués avec le béton renforcé par des fibres d'acier, car le renforcement par des fibres peut augmenter la résistance, améliorer le contrôle des fissures et par conséquent, renforcer la résistance à la corrosion.

En outre, la résistance peut être améliorée avec une ductilité acceptable. Par conséquent, le remplacement partiel ou même complet des barres d'acier conventionnelles par des fibres d'acier montre une applicabilité et une popularité dans les pratiques d'ingénierie d'un point de vue économique et technique [24].

En exploitant leurs propriétés mécaniques, les fibres permettent une meilleure utilisation de la résistance naturelle du béton, facilitant la réalisation de pièces minces de grandes dimensions tout en offrant au concepteur une plus grande liberté architecturale. La distribution des fibres doit représenter environ 0,5 à 2 % du volume total de béton.

### 2.4.1 Définition et Composition du béton renforcé par des fibres

Nous savons que le béton est composé de ciment, d'eau et de granulats pour produire un matériau homogène, dont les caractéristiques dépendent de la proportion et du type d'ingrédients incorporés.

Le béton fibré est un mélange des mêmes composants, avec l'ajout de fibres, ce qui a un effet marquant sur les propriétés du composite obtenu.

Ceci nous permet de dire tout simplement que le béton fibré est une variante du béton ordinaire, renforcée par l'ajout des fibres métalliques, organiques, minérales, afin d'améliorer ses performances et sa résistance, tout en limitant la fissuration (figure 2.4).

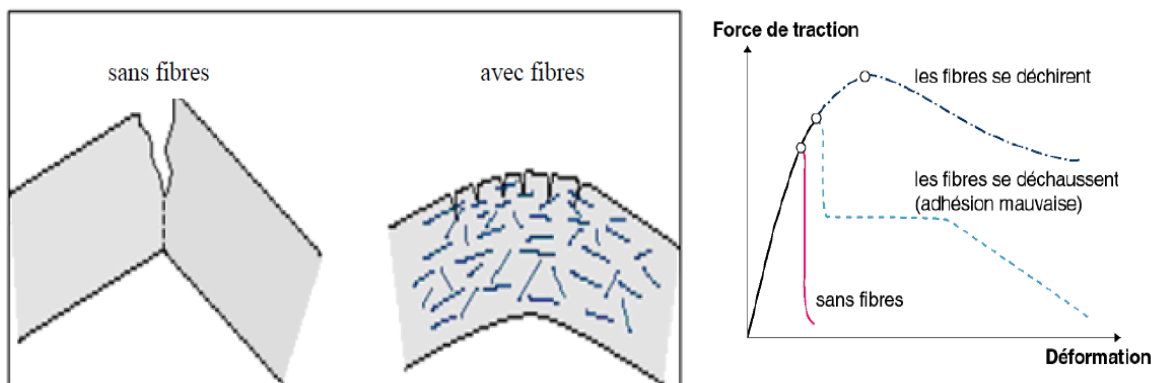


Figure 2.4 Effet des fibres sur le béton [36]

### 2.4.2 Types de fibres

Les fibres utilisées dans le béton fibré peuvent être classées en plusieurs types en fonction de leur matériau de fabrication. Les fibres disponibles s'élargit régulièrement : il y'a les fibres métalliques, les fibres organiques, les fibres minérales, les fibres longues, courtes, flexibles, ondulées, inoxydables... et offre un vaste choix de caractéristiques, de performances alors de domaines d'emploi.

Ces fibres sont partagées en 3 grandes familles de fibres selon la nature des matériaux qui les composent:

**Tableau 2.1** Types de fibres [42]

<b>Fibres métalliques</b>	<b>Fibres organiques</b>	<b>Fibres minérales</b>
acier ; inox ; alliage amorphe.	polypropylène ; polyéthylène ; polyamide (nylon) ; acrylique ; polyester ; mélange polypropylène/polyéthylène ;	Verre Carbonne

Chaque type de fibre a un effet distinct sur le comportement du béton, l'acier améliorant la ténacité, la ductilité et les qualités d'usure du béton et offre une robustesse mécanique élevée, tandis que celles organiques, minérales apportent des propriétés telles que la résistance à la corrosion et la légèreté. En plus, les fibres organiques améliorent la résistance aux chocs et la flexibilité du béton.

La quantité de ces fibres dans le béton doit être calculée correctement car une quantité supérieure peut conduire à une augmentation du coût des matériaux sans amélioration significative des propriétés, et une quantité inférieure peut avoir une efficacité réduite sur les propriétés destinées à être modifiées. [42]

La fibre peut adopter une configuration cylindrique, présentant un diamètre de quelques millimètres et une longueur plusieurs fois supérieure à ce diamètre. Il est également possible de catégoriser des fibres de taille réduite, appelé fibres courtes, ayant une longueur comprise entre 20 et 150 mm, ainsi que des fibres de grande taille.

#### **2.4.2.1 Les fibres métalliques**

Dans cette catégorie, existe : les Acier (figure 2.5), l'Inox ainsi que la Fonte. Le type de fibre en acier sera détaillés plus que les autres dans ce chapitre puisqu'on la utilisé dans nos analyses.

Les fibres métalliques, principalement en acier, sont ajoutées dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques du béton, notamment sa résistance à la traction, au cisaillement,

en flexion et au choc. De même, une plus grande résistance à la rupture et à la fatigue est remarquée.



**Figure 2.5** Fibre métallique-Béton fibré (fibres métalliques)

La performance mécanique du béton renforcé par des fibres dépend principalement de l'adhérence entre la fibre et la matrice. Les fabricants de fibres d'acier ont développé différentes fibres en ajustant la surface pour améliorer cette adhérence. Cela a conduit à une variété de fibres avec différents diamètres, sections (ronde, carrée, rectangulaire), longueurs et modes d'opération. Les diamètres des fibres d'acier varient généralement de 0,1 à 0,7 mm, avec des longueurs allant de 10 à 70mm [26].

Chaque type de fibre possède des caractéristiques distinctes, notamment en termes de dimensions (diamètre, longueur), de formes (lisse, rugueuse, plate, ondulée), de résistance à la traction et d'adhérence au béton. Ces propriétés confèrent à chaque fibre un comportement mécanique spécifique, ce qui influence le renforcement et la performance des structures en béton renforcé par des fibres.

**Tableau 2.2.** Propriétés physiques et mécaniques des fibres d'acier [27]

Fibre	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse volumique (Kg/dm <sup>3</sup> )	Résistance en traction (Mpa)	Module D'élasticité (Mpa)	Coefficient de dilatation (Micro/m)
Acier	0.2 à 0.5	20 à 50	7.8	1000 à 3000	200000	11

### 2.4.2.2 Fibres de polypropylène

Le polypropylène est un polymère thermoplastique largement utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (figure 2.6).



**Figure 2.6** Fibres polypropylène [43]

Elles se caractérisent par leur faible densité et sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes à la chaleur (température de fusion 160°C). Elles se répartissent de manière multidirectionnelle dans le béton.

Le polypropylène présente plusieurs caractéristiques avantageuses, notamment une résistance élevée à la traction, une bonne résistance à la corrosion et à l'humidité, une faible densité, une excellente résistance à la fatigue et une bonne résistance chimique. Il permet aussi de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais et améliorent la maniabilité et la cohésion du béton.

**Tableau 2.3** Propriétés physiques et mécaniques des fibres de propylène [27].

Fibre	Diamètre (mm)	Longueur (mm)	Masse Volumique (Kg/dm <sup>3</sup> )	Résistance En traction (Mpa)	Module D'Elasticité (Mpa)
Polypropylène	0.5 à 4	5 à 75	0.9	400 à 800	4000 à 8000

### 2.4.2.3 Fibres de verre

Les fibres de verre (figure 2.7) sont des renforts très efficaces du béton, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, Elles se dispersent facilement dans la matrice

cimentaire, ce qui permet de réaliser des produits de formes très variées présentant des moulages précis.

En s'opposant à la propagation des microfissures dans le béton, elles améliorent la résistance en traction du béton et sa ductilité. Leur résistance à la corrosion et aux attaques chimiques est bonne. Les fibres de verre ont une très haute résistance au feu (jusqu'à 800 °c).



**Figure 2.7** Fibres en verre [43]

En ce qui suit, nous présentons plus de détails sur le béton renforcé par des fibres métalliques vu son utilisation dans les modélisations dans ce mémoire.

### **2.4.3 Béton renforcé par des fibres métalliques**

De nombreux travaux de recherches ont été consacrés aux bétons renforcés par des fibres métalliques. Des études et des applications ont mis en lumière l'intérêt de ces matériaux pour la fabrication d'éléments préfabriqués, grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques comparativement au béton ordinaire.

Les fibres métalliques présentes dans ces bétons confèrent une résistance post-fissuration et réduisent la fragilité du matériau en limitant l'ouverture et la propagation des fissures.

L'utilisation des armatures traditionnelles est modifiée, voire même réduite voire supprimée, ce qui permet de diminuer voire d'éliminer le besoin de renforcement secondaire.

Les fibres en acier ont démontré une résistance élevée à la traction, variant de 900 MPa à 1800 MPa. Elles présentent diverses géométries telles que droites, avec des crochets aux extrémités, ou encore ondulées.

En pratique, les bétons renforcés par des fibres métalliques sont classés selon la compacité de leur matrice : le béton de fibres métalliques conventionnel correspond à un béton ordinaire avec une résistance inférieure à 60 MPa, le béton fibré à hautes performances présente une matrice à haute performance, des granulats plus fins et une résistance comprise entre 60 et 110 MPa. Le béton fibré à ultra-hautes performances se caractérise par une matrice composée de granulats très fins et d'un faible rapport eau/liant, offrant une résistance supérieure à 130 MPa.

Le béton fibré occupe une place cruciale dans la construction moderne en offrant des avantages significatifs par rapport au béton armé (figure 2.8).



Musée océanographique (Espagne)



Musée MUCEM à Marseille (France)

**Figure 2.8** Structures en béton renforcé par fibres métalliques [12]

Le béton fibré (BF) se distingue du béton armé (BA) classique (appelé conventionnel) de plusieurs façons. Il est composé de béton ordinaire mélangé à de fines fibres acier, qui a la capacité de remplacer les barres d'armature traditionnelles et de fonctionner comme de petites armatures, renforçant ainsi la résistance à la traction et comblant les fissures.

#### 2.4.4 Avantages du béton renforcé par des fibres

À une échelle structurelle, les bétons renforcés par des fibres diffèrent notablement du béton armé en ce qu'ils ne peuvent être considérés comme des matériaux homogènes ou isotropes.

En intégrant des fibres dans sa composition, le béton fibré présente une résistance accrue à la traction, contrôle mieux la formation des fissures et offre une durabilité améliorée face aux conditions environnementales et aux charges de service que celui armé.

Ces propriétés améliorées se traduisent par une réduction des coûts de maintenance, une augmentation de la sécurité des structures, une plus grande flexibilité de conception et des délais de construction réduits comparé au BA.

Les fibres peuvent être utilisées comme renfort seules ou en combinaison avec des armatures conventionnelles en barres d'acier. Les fibres travaillent en tension à travers les fissures du béton et fournissent ainsi une capacité de flexion résiduelle pour le béton fissuré.

En outre, le béton fibré joue un rôle essentiel en améliorant la qualité, la durabilité et la performance des infrastructures construites.

Par rapport à l'armature des barres, les caractéristiques de l'armature des fibres sont les suivantes :

- Elles sont réparties dans toute la section transversale, tandis que les barres d'armature traditionnelles sont placées à des emplacements précis et nécessitent un coffrage en béton des faces du segment.
- Elles sont petites, courtes et rapprochées, tandis que les barres d'armature traditionnelles sont plus grandes, continues et moins rapprochées.
- Il n'est généralement pas possible d'atteindre le même poids par  $1\text{m}^3$  d'armature avec des fibres qu'avec des barres d'armature.

## 2.5 CONCEPT DU BETON FIBRE ET SON UTILISATION DANS LE GENIE CIVIL

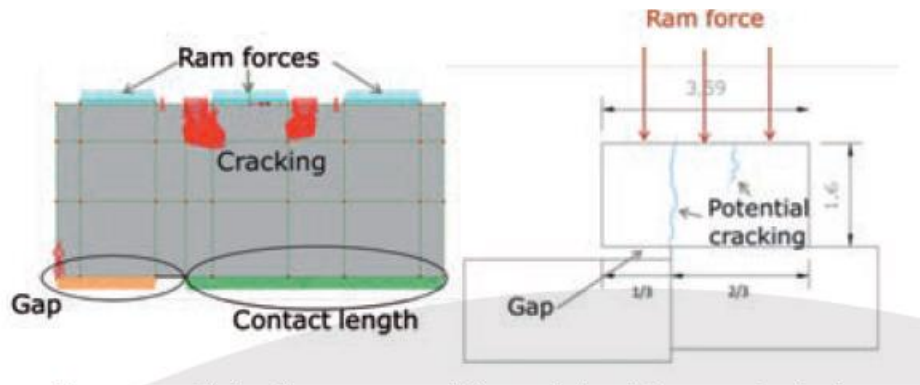
Le concept de béton fibré et son application en Génie Civil et minier ont été un sujet d'intérêt, et des recherches approfondies sur le comportement et les propriétés du béton fibré existent. L'objectif principal est de développer des méthodes de conception pour le béton fibré qui permet de prédire le comportement du béton fibré dans des situations complexes.

Un programme expérimental a été entrepris en utilisant des fibres pour identifier les propriétés de certains bétons modernes à haute résistance, dont la résistance varie de 70 à 90 MPa.

L'utilisation du béton fibré est en constante augmentation, notamment dans les secteurs des chaussées, du béton projeté et des éléments préfabriqués. Le remplacement total ou partiel du renforcement traditionnel par du FRC présente de nombreux avantages, non seulement en termes de réduction des coûts, mais aussi en améliorant la qualité et les performances structurelles. Ces bénéfices sont particulièrement pertinents pour l'industrie du préfabriqué [28].

Des essais de traction ont été réalisés à l'aide d'éprouvettes entaillées pour déterminer la résistance à la traction et le comportement du pic de poteau du béton. Il a été constaté que le type de combinaison de fibres et de matrices influence grandement les performances de traction du Béton, bien que tous les types de béton testés aient montré des propriétés de ténacité améliorées par rapport à leurs équivalents en béton armé.

De même, les modélisations numériques à l'aide de logiciels deviennent de plus en plus populaires dans la conception de segments de tunnel, un modèle numérique peut être utile pour générer des estimations plus précises des actions de contrainte et des déformations (figure 2.9). [25]



**Figure 2.9.** Modélisation par éléments finis des joints des voussoirs, montrant le développement de fissures [25]

## 2.6 IMPORTANCE DU BETON FIBRE DANS LE SOUTÈNEMENT DES TUNNELS

Le soutènement des tunnels est réalisé par des barres d'armature conventionnelles placées pour résister aux contraintes de traction. La durabilité est devenue ces dernières années d'une importance vitale, surtout pour les infrastructures souterraines.

La durabilité est un terme lié à la protection des barres d'armature contre la corrosion. Ceci, peut être remporté en réduisant la porosité du béton et la largeur des fissures. Le premier peut être obtenu en utilisant une matrice à faible rapport eau/ciment tandis que le second peut être obtenu en utilisant un renfort diffusé ; à cet effet, un renfort fibreux discret peut représenter une solution optimale. [29]

L'utilisation des fibres d'acier améliore non seulement la ténacité du matériau, la résistance aux chocs et à la fatigue du béton, mais il augmente également la résistance du matériau à la fissuration et, par conséquent, à la pénétration d'eau, avec une amélioration significative de la durabilité des structures en béton surtout lorsque les tunnels sont construits sous la nappe ou sous la mer.

Par conséquent, l'utilisation de ce matériau dans les soutènements des tunnels représente une solution technique efficace comparant aux armatures conventionnelles,

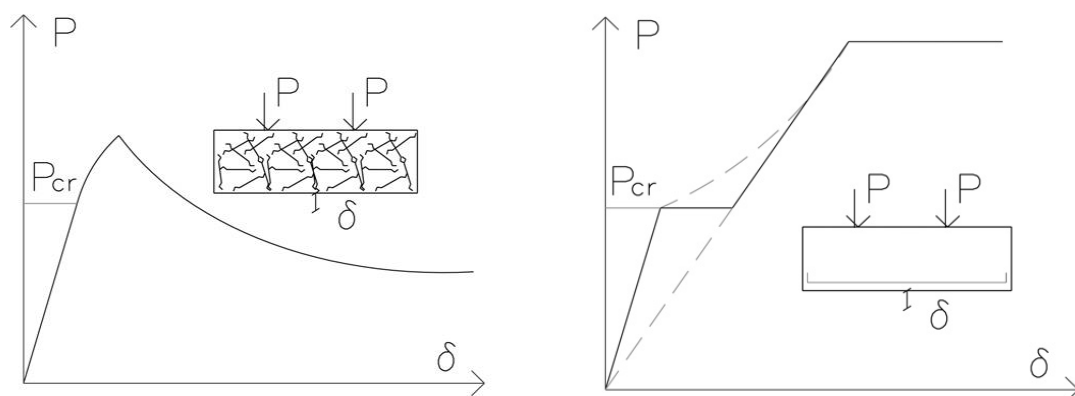
car elle réduit à la fois les coûts de main d'œuvre et les coûts de construction, sans oublier le risque de cassure lors du transport et de la pose.

Pour ces raisons, plusieurs projets pilotes européens ont été entrepris pour évaluer la fiabilité du béton renforcé par des fibres dans les soutènements de tunnel, par exemple le 2<sup>ème</sup> tunnel de Heine Noord et les deux soutènements de tunnel à Essen et dans la région de la Ruhr (Allemagne). Ces exemples ont montré un développement réduit de fissures et un risque moindre de fuite et de chute de béton, ce qui représente souvent un problème concret pour les tunnels routiers. [29]

De plus, il a été prouvé que l'utilisation des bétons renforcés par des fibres d'acier a montré une ductilité plus élevée sous une force localisée des joints des voussoirs (TBM).

La figure (2.10) montre le comportement après fissuration d'une poutre en BF. La réaction est absolument différente de celui des structures conventionnelles: Après le début de la fissuration, les structures en BF présentent un comportement nettement non linéaire dans la mesure où un comportement d'adoucissement sous contrainte peut se produire (Figure 2.10a).

Cependant, le soutènement conventionnel garde un comportement quasiment linéaire jusqu'à ce que le soutènement se rompe (figure 2.10b) [30].



**Figure 2.10.** Réponse typique d'un essai de flexion sur :

a. Avec fibres – b. Sans fibre [30]

Un nombre important de projets de référence internationaux ont démontré qu'un revêtement de tunnel de haute qualité peut être réalisé à l'aide de voussoirs renforcés de fibres. Cependant, l'absence de normes liées à la conception avait tendance à décourager certains concepteurs d'accepter des propositions de conception basées sur le béton renforcé de fibres (Cas de la France).

## **2.7 FONCTIONNEMENT TYPIQUE D'UN SOUTÈNEMENT EN VOUSOIR EN BF**

Les voussoirs préfabriqués utilisés pour le revêtement des tunnels, généralement en béton armé, sont conçus pour assurer la stabilité de l'anneau face aux charges permanentes et aux sollicitations pendant la construction.

Les charges permanentes définissent la forme de l'anneau et du voussoir, tandis que les armatures sont souvent dimensionnées pour supporter les charges durant la construction. Cependant, la nature de ces charges, combinée au risque de placement imprécis des voussoirs, entraîne souvent un besoin important en armature. Cela peut rendre la conception complexe (avec des nappes d'armatures courbées), coûteuse environ 80 à 100 kg/m<sup>3</sup>. [31]

La fabrication de ces armatures demande un temps énorme, ce qui fait élever les coûts élevés en main-d'œuvre, en stockage et en temps d'exécution. En outre, les voussoirs en béton armé nécessitent un enrobage important, augmentant ainsi le diamètre de l'anneau et le coût du creusement.

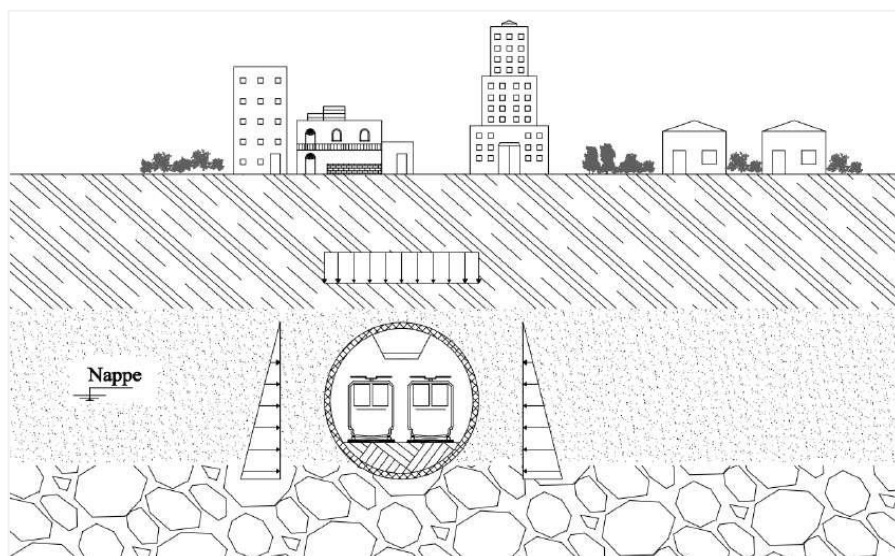
En plus, le fait de réduire l'épaisseur de l'anneau peut provoquer une concentration de contraintes en raison de la faible hauteur de la cage d'armature, augmentant ainsi le risque d'ovalisation.

En raison de ses caractéristiques, le béton renforcé par des fibres métalliques présente une solution novatrice et prometteuse pour les voussoirs préfabriqués de tunnels. Les fibres métalliques retardent de manière significative l'apparition de fissures dans le

vousoir, tout en offrant une capacité portante comparable à celle d'une structure en béton armé présentant une fissuration prononcée et une ductilité supérieure de 60%.

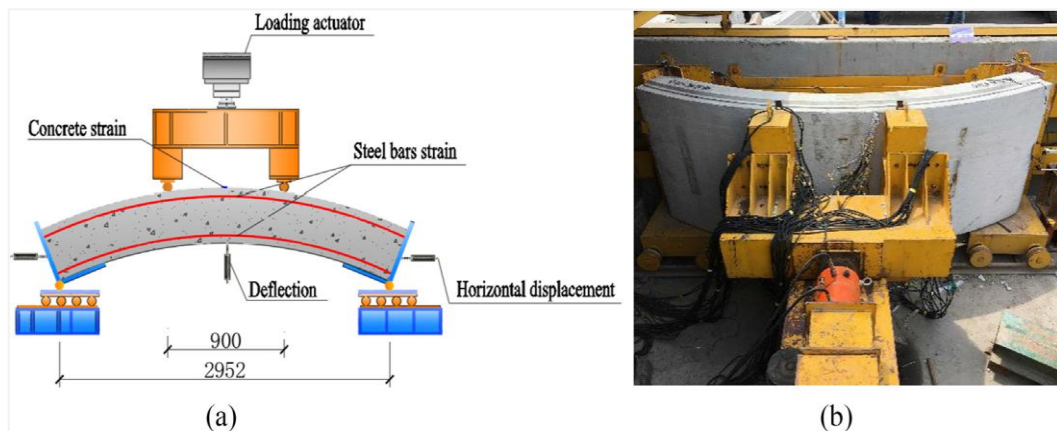
Des essais par [31] sur des voussoirs en béton armé et en béton renforcé de fibres métalliques, dans le cadre d'un projet en France appelé BEFIM [32], ont prouvé la possibilité de remplacer intégralement les armatures (longitudinales et transversales) par des fibres [12].

La figure (2.11) montre les charges permanentes qui sont appliquées sur les tunnels. Le rôle du soutènement est de stabiliser le tunnel vis-à-vis de les charges qui lui sont appliquées par le sol due aux contraintes géotechniques et au chargement des constructions voisines mais aussi sous l'effet de l'activation mécanique et chimique des nappes d'eau, la charge mobile des métros et le poids propre du système d'exploitation. Ces efforts permanents compriment en général la totalité du revêtement, comme présenté dans la figure (2.11).



**Figure 2.11** Actions permanentes s'exerçant sur le revêtement du tunnel [12]

Les voussoirs préfabriqués en béton armé utilisés pour le revêtement des tunnels sont conçus pour garantir la stabilité des voussoirs (TBM) aux charges permanentes.



**Figure 2.12** Test sur les voussoirs [34]

Lorsque la géométrie de ces voussoirs est influencée par les charges permanentes, il est courant que les armatures soient dimensionnées afin de répondre aux sollicitations lors de la construction.

Selon [31], l'intensité de ces demandes, combinée avec le risque de l'imprécision du placement des voussoirs, entraîne un ferrailage potentiellement important, difficile à réaliser et coûteux [31].

Quelques projets internationaux ont utilisé le béton de fibres métalliques pour les revêtements de tunnel préfabriqués, tels que la ligne 9 du métro de Barcelone - Cam Zan Stretch en Espagne, le 2nd Heine Noord tunnel aux Pays-Bas, le tunnel Kei Line au Japon ou plus récemment le tunnel Cross rail en Angleterre [29]. Ces projets mettent en évidence les possibilités de ce matériau pour ce genre d'utilisation.

En France, le Grand Paris Express sera le premier projet à utiliser de manière significative le béton de fibres métalliques dans ses voussoirs de tunnel (lignes 16 et 18) en complément des voussoirs de tunnel en béton armé traditionnel.

L'ensemble des 19,6 km du lot 1 de la ligne 16 est couvert par des voussoirs préfabriqués entièrement en béton de fibres métalliques. Les travaux de creusement sont en cours depuis juillet 2020 avec 6 tunneliers.

La mise en place de cette innovation sur les voussoirs de plusieurs lignes du futur métro, qui sont traditionnellement construits en béton armé (béton moulé avec précision autour de cages d'armatures métalliques importantes et techniques), représente une première mondiale pour un projet d'infrastructure d'une telle envergure et pour l'industrie du béton.

Grâce à cette nouvelle technologie, il est possible d'effectuer une économie considérable de coûts et de ressources (pour le béton fibré, la quantité d'acier est divisée environ par deux). Les performances techniques des voussoirs sont améliorées, leur épaisseur est réduite de 2 à 3 cm, et leur comportement "naturel" face aux éventuelles fissures favorise la durabilité des ouvrages.

Cette innovation joue un rôle essentiel dans la stratégie nationale de réduction du carbone. Les voussoirs en béton fibré permettent une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub>, avec une moyenne de 10 000 tonnes de CO<sub>2</sub> évitées pour 10 km de tunnels.

Les résultats obtenus, extrêmement satisfaisants, encouragent les responsables à continuer à mettre en place des infrastructures similaires.

Plusieurs projets de référence internationaux ont prouvé qu'il est possible de créer un revêtement de tunnel de grande qualité en utilisant des voussoirs de fibres renforcés. Malheureusement, le manque de normes ou de lignes directrices communes en matière de conception avait tendance à dissuader certains clients d'accepter des propositions de conception basées sur le béton renforcé de fibres.

## **2.8 CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons dressé les deux grandes familles de béton (BA et BF), l'un comme l'autre ont des avantages et des inconvénients. Nous avons présenté des généralités et des notions de base sur ces thématiques, le béton renforcé par des fibres est plus détaillé que ce n'est un matériau innovant. L'importance du béton fibré dans le

creusement des tunnels est présentée en parallèle pour montrer l'intérêt porté à ce sujet. Et enfin, nous avons terminé par citer le fonctionnement typique d'un voussoir en BF utilisé dans la technique de creusement TBM.

Pour compléter cette partie bibliographique, le chapitre suivant présentera une série d'analyses numériques réalisées à l'aide du logiciel éléments finis Plaxis 2D. Les simulations porteront sur l'étude de l'effet l'utilisation des fibres métalliques sur le comportement du sol et du soutènement. Nous ferons des comparaisons avec le béton armé.

Chapitre 3.

## **Béton fibré vis-à-vis Béton armé dans les soutènements des tunnels**

---

## Chapitre 3

## ***Béton fibré vis à vis Béton Armé dans les soutènements des tunnels***

### **3.1 INTRODUCTION**

Le béton fibré est une forme innovante de béton renforcé par l'ajout des fibres plus durables et écologiques soit en acier, en verre, ou en polypropylène afin d'améliorer les propriétés mécaniques du béton ordinaire.

Ce chapitre se concentre sur l'application pratique des connaissances présentes dans les chapitres précédents, en examinant l'intérêt que porte l'utilisation du béton renforcé par des fibres dans la réalisation des soutènements des tunnels au lieu du béton armé pour cela le code de calcul plaxis 2D a été utilisé. Les résultats comparés à ceux en BA dans des conditions similaires seront présentés et analysés.

L'objectif principal est de fournir une analyse concrète de l'effet du choix entre béton armé et béton fibré sur la stabilité des soutènements des tunnels et l'impact manifesté.

Les cas suivants seront modélisés et comparés entre eux :

1. Premier Cas : Tunnel soutenu avec un soutènement en béton Armé (BA)
2. Deuxième Cas : Tunnel soutenu avec un soutènement en béton renforcé par des fibres en acier (BF).

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

- Nous débuterons en premier lieu, par la présentation des tassements en surface, des déplacements verticaux en clé du tunnel, des déplacements horizontaux et verticaux au niveau du soutènement, ainsi du moment fléchissant et l'effort axial causés par la construction du tunnel du 1<sup>er</sup> cas (tunnel soutenu par du béton armé). Cette partie sera suivie par des études paramétrique, les paramètres suivants seront modifiés : la profondeur, le diamètre du tunnel (H, D), et l'épaisseur du soutènement (d).
- Ensuite, on passera à la présentation et l'analyse des mêmes résultats mais pour le cas de tunnel soutenu par le béton renforcé par des fibres. Le choix se portera sur des fibres métalliques en acier.
- Une étude comparative sera présentée à la fin entre ces deux catégories de soutènement.

Pour ces deux cas le modèle choisi pour les simulations numériques est celui de [33].

### **3.2 PRÉSENTATION DU CAS D'ETUDE- SOUTÈNEMENT EN BA**

Il s'agit de l'analyse de la réponse du sol et du soutènement au creusement d'un tunnel de diamètre 5m creusé dans un sol sableux homogène à une profondeur de 10m [33]. La technique TBM (TUNNEL BORING MACHINE) a été utilisée. Le sol est modélisé par le modèle de Mohr-Coulomb. Les propriétés mécaniques sont montrées sur la figure (3.1).

Le soutènement est réalisé par des voussoirs, le modèle linéaire élastique a été utilisé. Nous avons adopté un soutènement de type voussoirs constitué d'éléments préfabriqués avec une épaisseur de 35cm, et une rigidité (E) égale à 40GPa. Ensuite, un soutènement en béton renforcé par des fibres en acier avec une épaisseur de 35cm et une rigidité (E) égale à 200GPa (Voir chapitre 2).

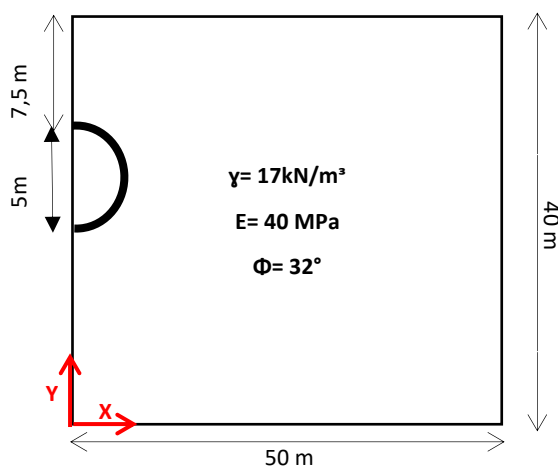


Figure 3.1 Modèle étudié [33]

### 3.2.3 Modélisation et maillage éléments finis du cas d'étude

La modélisation du cas d'étude a été réalisée en utilisant le code de calcul éléments finis Plaxis 2D. La figure (3.2) illustre le maillage et les conditions aux limites adoptés.

Le maillage choisi est composé de 134 éléments triangulaires de 15 nœuds et 1146 nœuds.

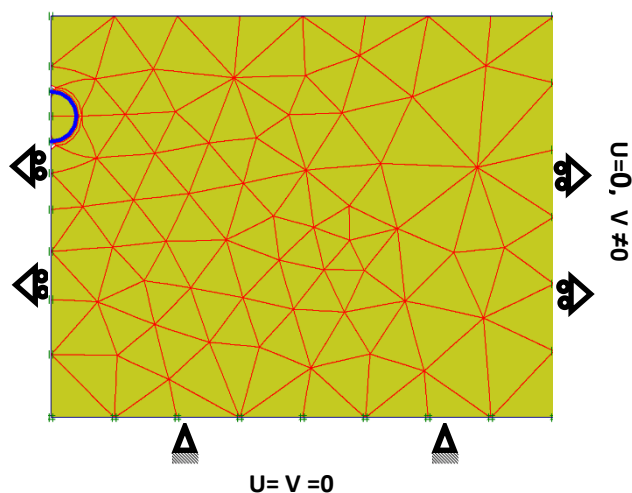


Figure 3.2 Maillage éléments finis

### 3.3 ANALYSES ET RESULTATS NUMERIQUES - CAS DU SOUTÈNEMENT EN BETON ARME (BA)

Le premier cas examiné dans cette première analyse est celui du tunnel soutenu par le béton armé.

1. Nous débuterons en premier lieu, par la présentation des tassements en surface, des déplacements verticaux en clé, des déplacements horizontaux au niveau du flanc du tunnel, ainsi que du moment fléchissant, de l'effort axial, du déplacement horizontal et du déplacement vertical causés au soutènement.
2. Les analyses seront poursuivies par une étude paramétrique, les paramètres suivants seront modifiés :
  - La profondeur du tunnel : H
  - Le diamètre du tunnel : D
  - L'épaisseur du soutènement du tunnel : d

### **3.3.1 Réponse du modèle au soutènement en Béton Armé**

En ce qui suit, nous avons analysé les réactions mécaniques et les sollicitations structurelles du tunnel soutenu par du béton armé.

Nous avons commencé par les déplacements verticaux à la clé du tunnel, ainsi que les tassements observés en surface. En outre, les déplacements horizontaux ont été évalués au niveau du flanc du tunnel (cad à une distance de 2.5m de l'axe vertical du tunnel).

Ensuite, nous avons étudié les moments fléchissant et les efforts axiaux au niveau du soutènement causés par l'excavation. Les déplacement horizontal et vertical ont été aussi analysés.

Ces résultats sont présentés sur la figure (3.3).

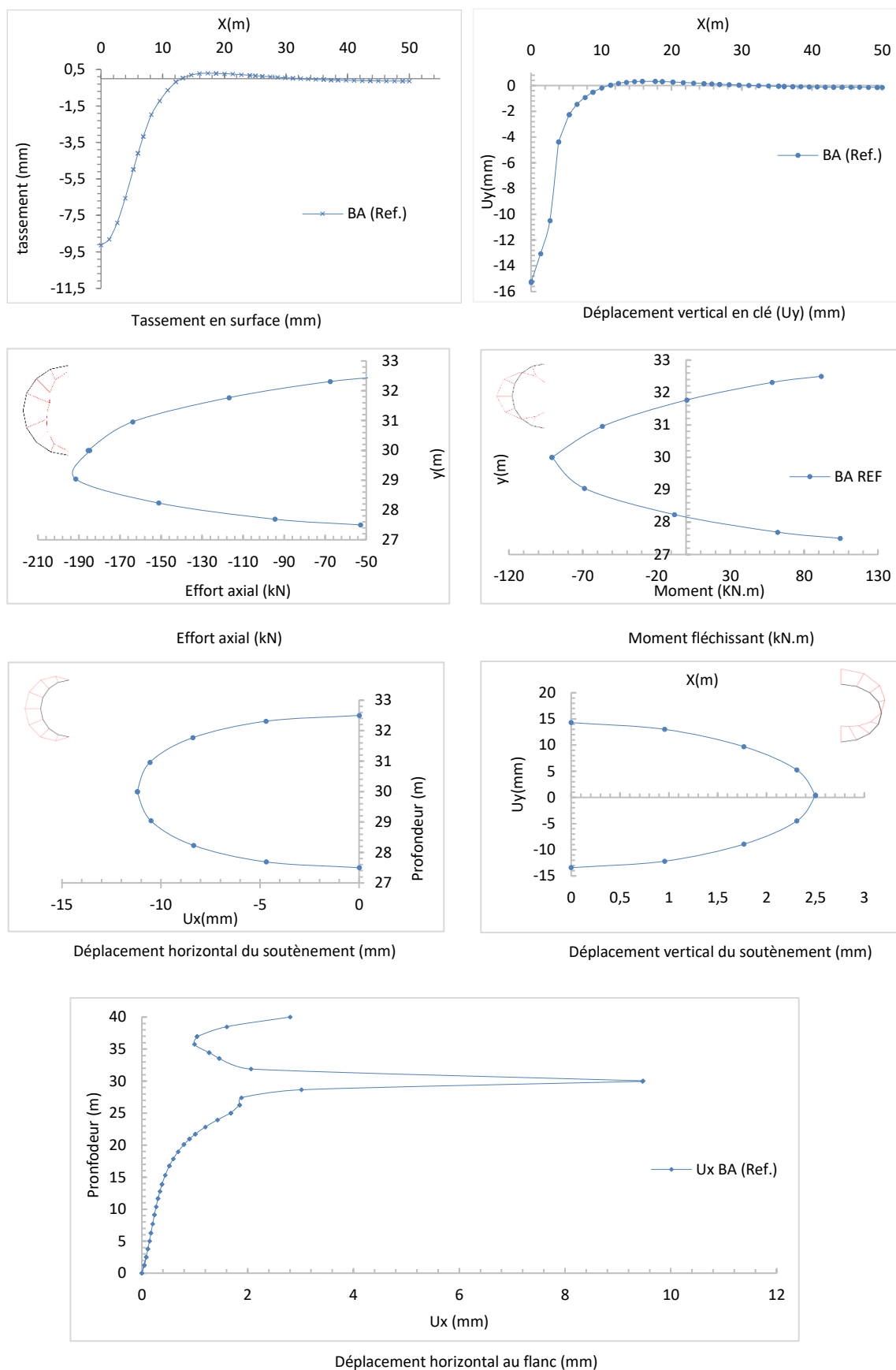


Figure 3.3 Réponses au creusement avec soutènement en BA (Ref.)

En examinant les graphes sur la figure (3.3), les remarques suivantes ont été décelées :

1. Pour le tassement et le déplacement vertical en clé ( $U_y$ ), la forme de la cuvette décrite par [35] est bien lisible. On remarque aussi qu'en s'approchant de la surface, les déplacements diminuent : En clé les déplacements verticaux présentent une valeur de 15mm tandis qu'en surface, le tassement maximum est de l'ordre d'environ 9,5mm. C'est un résultat confirmé par plusieurs auteurs dans la littérature.
2. En examinant la courbe de l'effort axial, nous constatons que la valeur maximale se trouve au niveau du flanc du tunnel avec une valeur de -192kN, il s'agit d'une compression.
3. Selon la courbe du moment fléchissant, il est observé que le moment atteint son maximum en travée au centre de la dalle de soutènement (flanc), et il est tracté. Tandis qu'il présente une compression au niveau de la clé et du radier du tunnel.
4. Les deux dernières courbes du déplacement horizontal et vertical causés au soutènement semblent montrées des résultats opposés : Le déplacement horizontal est maximum au niveau des flancs ( $U_x= 11\text{mm}$ ) et égale à zéro en clé et en radier du tunnel. Contrairement au déplacement vertical obtenu qui est nul au flancs et maximum en radier et en clé (15mm).
5. La dernière figure montre le déplacement horizontal du sol au niveau du flanc en fonction de la profondeur. Une déformation latérale maximale d'environ 10 mm vers l'extérieur au droit du tunnel est détectée. Le déplacement du terrain au radier est quasiment nul, en clé, la valeur est d'environ 2,5mm. Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres auteurs [3].

### 3.4 ETUDE PARAMETRIQUE- CAS DU SOUTÈNEMENT EN BETON ARME (BA)

Nous avons mené une série d'analyses en modifiant successivement trois variables : la profondeur, le diamètre (H, D) et l'épaisseur du soutènement (d) et ceci en vue de voir l'influence de ces variables géométriques sur nos résultats.

Pour la profondeur (H) : nous avons choisi trois valeurs différentes : 10m (ref.), 15m et 20m.

En ce qui concerne le diamètre (D), nous avons également sélectionné trois valeurs distinctes : 5m (ref.), 8m et 10m.

Enfin, pour l'épaisseur (d) : nous avons testé quatre valeurs : 25cm, 35cm (ref.), 40cm et 50 cm.

Chaque combinaison de ces variables a été étudiée pour évaluer son impact sur les résultats.

#### 3.4.1 Influence de la Profondeur du tunnel (H)

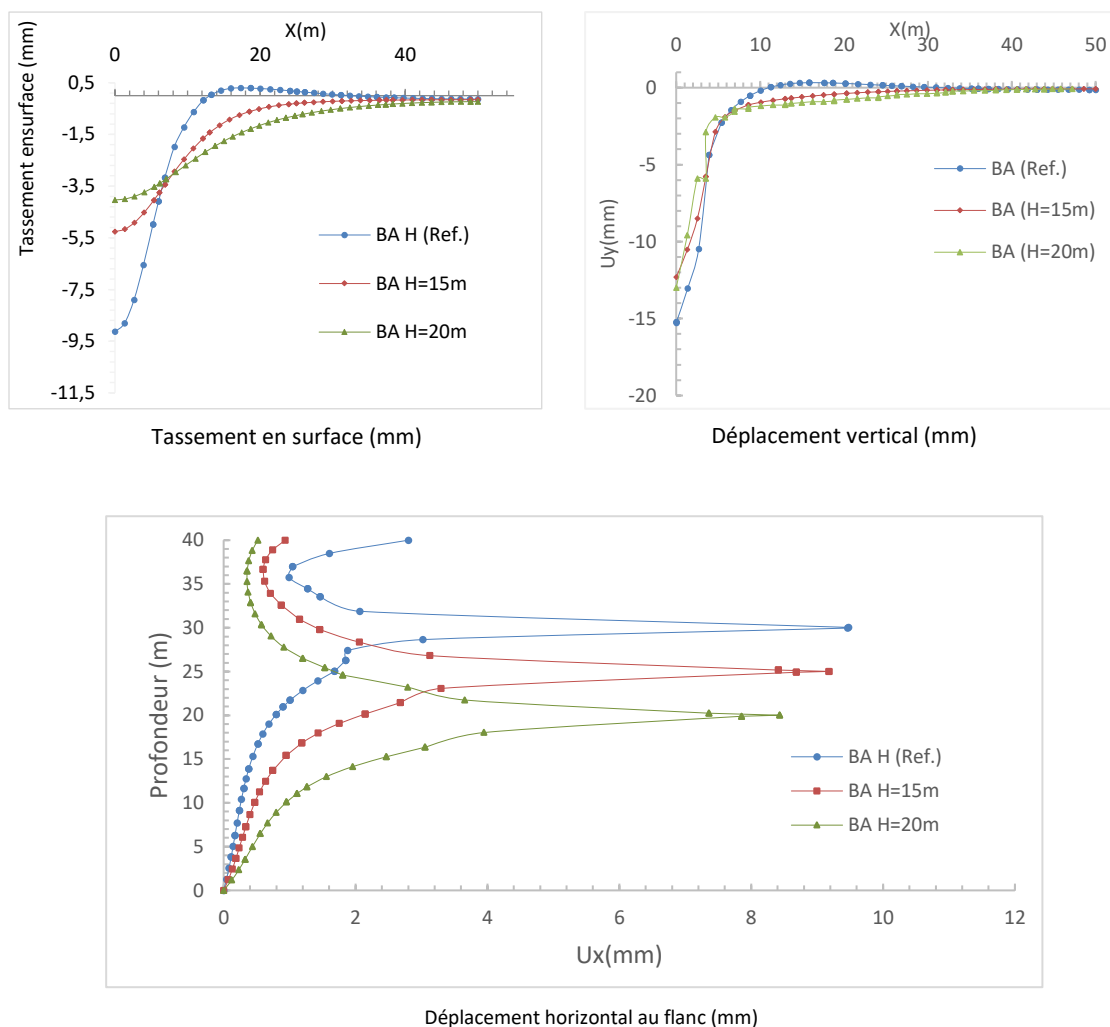
Dans un premier temps, la première variable, la profondeur a été modifiée pour les valeurs : 15m et 20m et comparée avec le modèle de référence (10m),

La figure (3.4) montre les tassements, les déplacements en clé et les déplacements horizontaux.

Nous observons à travers cette figure (3.4) une diminution des tassements en surface, tandis que la largeur de la cuvette est plus importante à mesure que la profondeur augmente. Pour les déplacements verticaux, nous avons remarqué que le modèle de Référence (H=10m) présente le plus de déformations en clé et qu'à partir de 15m ces déplacements coïncident (ces résultats concordent avec les résultats trouvés dans la littérature).

La courbe des déplacements horizontaux montrent une similitude dans les profils. On observe un déplacement latéral vers l'extérieure au droit du tunnel dont les valeurs en clé et au flanc diminuent avec la profondeur (pour le cas de tunnel creusé à 20m :  $U_x(\max)=$

8.5mm, à 15m :  $U_x(\max) = 9.2\text{mm}$ , à 10m (ref.) :  $U_x(\max) = 9.5\text{mm}$ . Le tunnel le moins profond et le plus sollicité en clé.

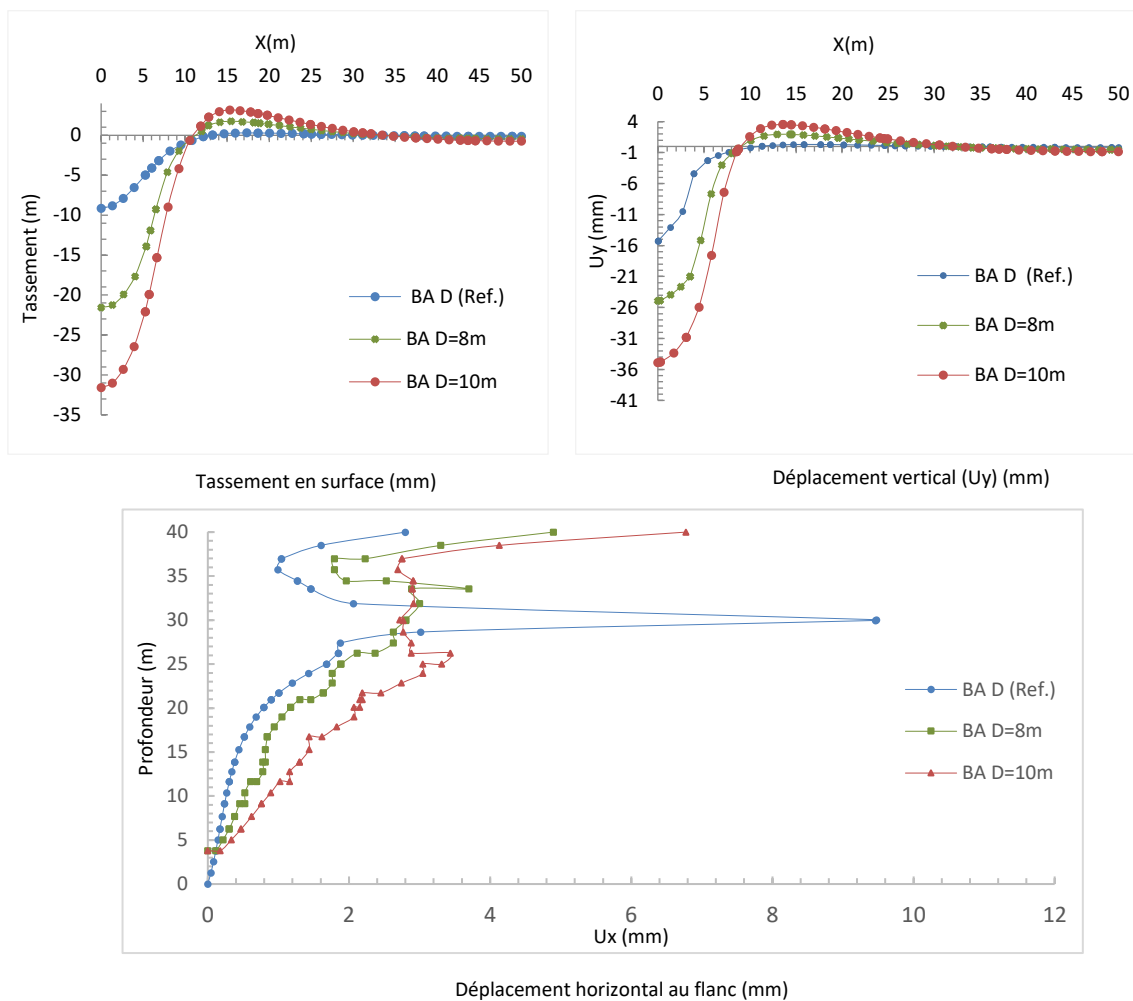


**Figure 3.4** Influence de la profondeur

### 3.4.2 Influence du diamètre du tunnel (D)

La deuxième variable, le diamètre a été modifié pour les valeurs : 8m et 10m et comparés avec le cas de référence (D=5m).

La figure (3.5) montre les tassements en surface, les déplacements en clé et les déplacements horizontaux causés par la variation du diamètre du tunnel



**Figure 3.5** Influence du diamètre du tunnel

Les remarques suivantes ont été décelées :

1. L'augmentation du diamètre à entrainer des tassements, des déplacements verticaux en clé, et des déplacements horizontaux plus importants.
2. Concernant les déplacements horizontaux et la déformation latérale, on observe que le déplacement du terrain au niveau du radier est négligeable, tandis qu'il atteint

quelques millimètres à la surface. Le sol semble toujours être repoussé vers l’extérieur du tunnel dans les trois cas. Cependant, on remarque que le modèle de référence présente la déformation maximum la plus importante, bien qu'il ait le plus petit diamètre ce qui n’est pas cohérent. Cela peut s'expliquer par le fait que nous avons coupé à une distance uniforme de 2,5 m (correspondant au flanc du modèle de référence) par rapport à l’axe vertical du tunnel, et non exactement au flanc de chaque cas.

### 3.4.3 Influence de l’épaisseur du soutènement (d)

A la fin, la dernière variable, l’épaisseur du soutènement a été modifiée pour différentes valeurs : 25cm, 40cm et 50cm. Les résultats sont comparés au modèle de référence (d=35cm).

La figure (3.6) montre les tassements en surface, les déplacements en clé et les déplacements horizontaux obtenus par cette variation

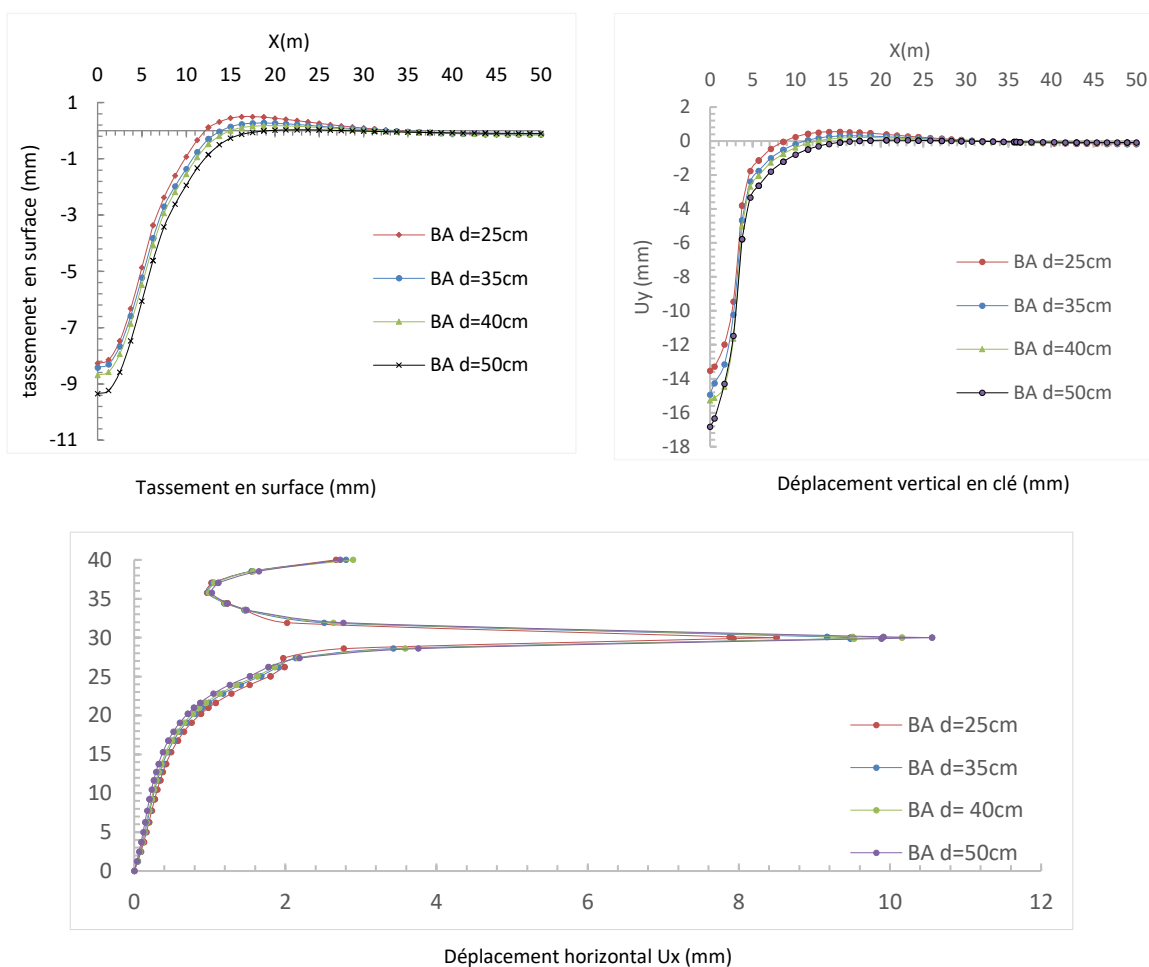


Figure 3.6 Influence de l’épaisseur du soutènement

En ce qui concerne les deux graphiques (tassement en surface et déplacement vertical en clé), il est à noter que l'augmentation de l'épaisseur entraîne une augmentation modérée du tassement maximal et de la largeur. Toutefois, les profils restent très similaires.

En ce qui concerne le déplacement horizontal, on observe que l'augmentation de l'épaisseur du soutènement a entraîné une augmentation de quelques millimètres des déplacements horizontaux maximum. Tandis qu'en clé et en radier, les déformations latérales sont restées les mêmes.

### **3.5 ANALYSES ET RESULTATS NUMERIQUES - CAS DE SOUTÈNEMENT EN BETON FIBRE (BF)**

Pour pouvoir continuer dans la même thématique, les mêmes analyses ont été appliquées au tunnel en béton fibré pour pouvoir comparer par la suite les deux cas d'étude (BA et BF).

Nous avons choisi d'étudier le cas du tunnel soutenu par du béton renforcé par des fibres métalliques en acier. Nous avons opté pour ce choix car nous disposions des données nécessaires.

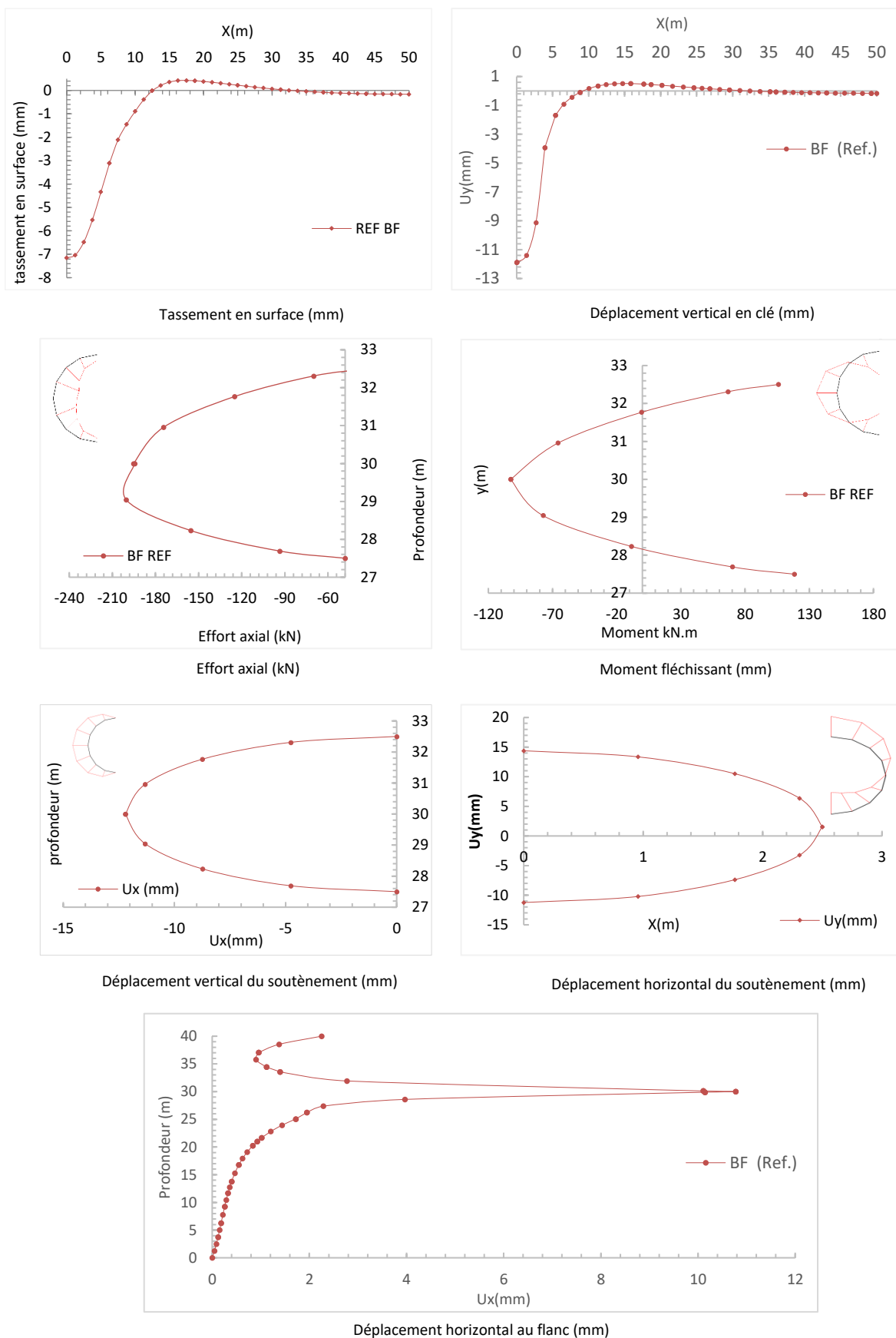
Nous avons présenté les mêmes résultats : tassements en surface, déplacements verticaux en clé, déplacements horizontaux près du soutènement, moments fléchissant et efforts axiaux du soutènement pour pouvoir faire des comparaisons avec le 1<sup>er</sup> d'étude.

Par ailleurs, des études paramétriques suivront ces analyses, les mêmes paramètres que celles utilisés en (BA) seront variés.

- La profondeur du tunnel : H
- Le diamètre du tunnel : D
- L'épaisseur de revêtement du tunnel : d

#### **3.5.1 Réponse du modèle au matériau Béton fibrés (BF)**

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure (3.7)



**Figure 3.7** Réponses au creusement avec soutènement en BF  
Modèle de référence

La figure (3.7) montre que pour les tassements en surface et les déplacements verticaux du terrain, les deux courbes indiquent que les déplacements diminuent à mesure que l'on s'approche de la surface.

À la clé, les déplacements verticaux atteignent une valeur de 12mm, tandis qu'en surface, le tassement maximal est d'environ 7mm, ce qui est inférieur à ceux trouvés dans le cas du soutènement en béton armé.

En outre, selon la courbe des moments fléchissant, il est observé que le moment est en compression en clé et en radier du tunnel avec des valeurs de moment quasiment proches, tandis qu'au flanc du soutènement du tunnel le moment est en traction ( $M=-102,5\text{kN}\cdot\text{mm}$ ).

En examinant la courbe de l'effort normal, nous constatons que la valeur maximale (-201 kN) se trouve au niveau du flanc du tunnel tandis qu'en radier et en clé, les valeurs sont moins importantes.

Concernant la courbe des déplacements horizontaux, on observe que le déplacement horizontal est toujours maximal au niveau des flancs, avec une valeur de 11 mm, indiquant que le sol semble être repoussé vers l'extérieur. Enfin, au niveau du radier, la valeur du déplacement est pratiquement négligeable.

### **3.6 ETUDE PARAMETRIQUE - CAS DU SOUTÈNEMENT EN BETON FIBRE (BF)**

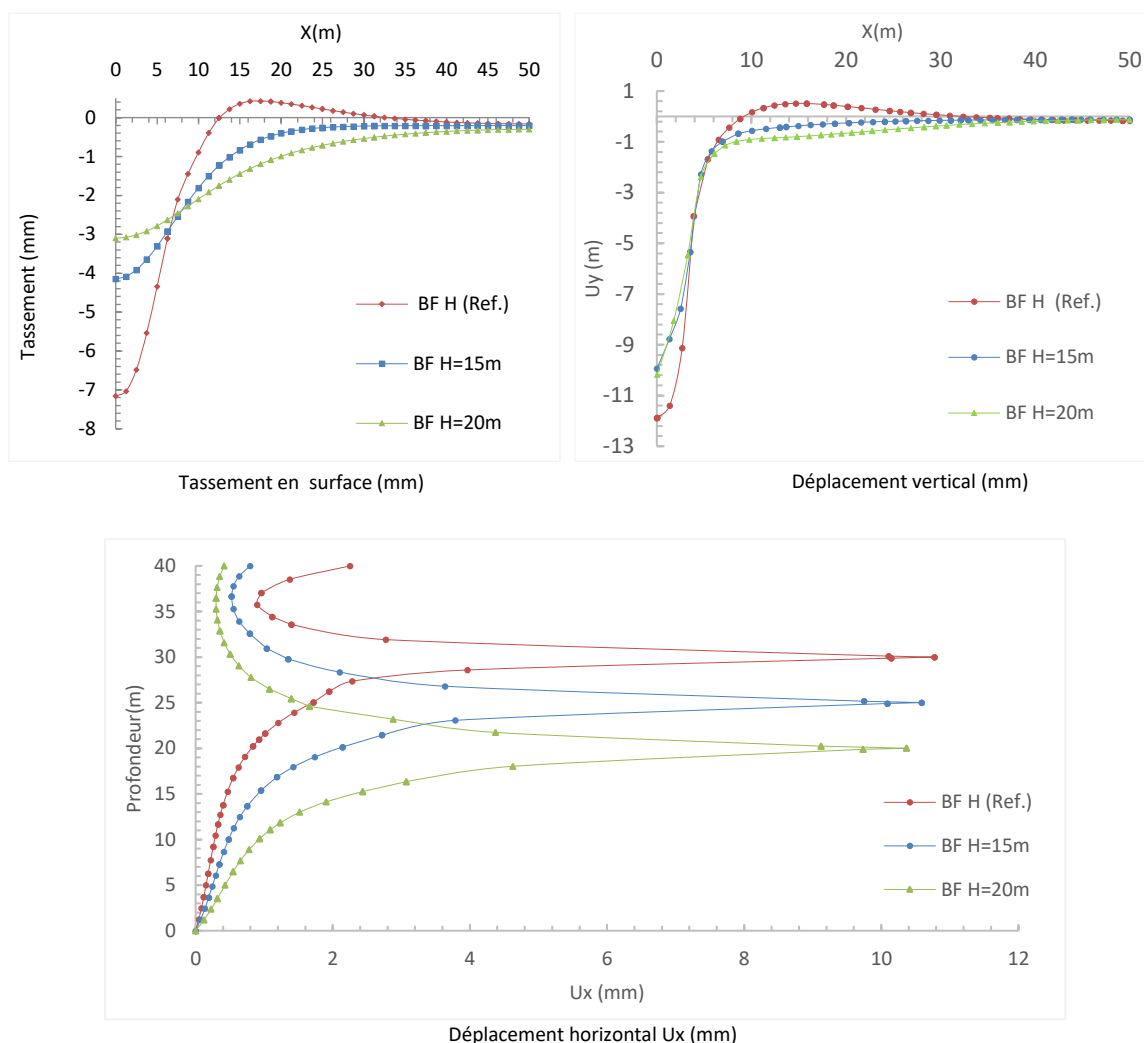
Les mêmes paramètres que ceux modifiés pour le béton armé (BA) ont été adoptés (la profondeur, le diamètre et l'épaisseur). L'objectif est de déterminer l'influence de ces paramètres géométriques dans le cas du béton renforcé par des fibres.

Chaque combinaison de ces paramètres a été étudiée afin d'évaluer son impact sur les résultats.

#### **3.6.1 Influence de la Profondeur du tunnel (H)**

Pareillement au béton armé BA, nous avons fait varier la profondeur pour les mêmes différentes valeurs : 10m, 15m et 20m.

La figure (3.8) montre les tassements en surface, les déplacements en clé et les déplacements horizontaux causés par les travaux d'excavation.



**Figure 3.8** influence de la profondeur du tunnel

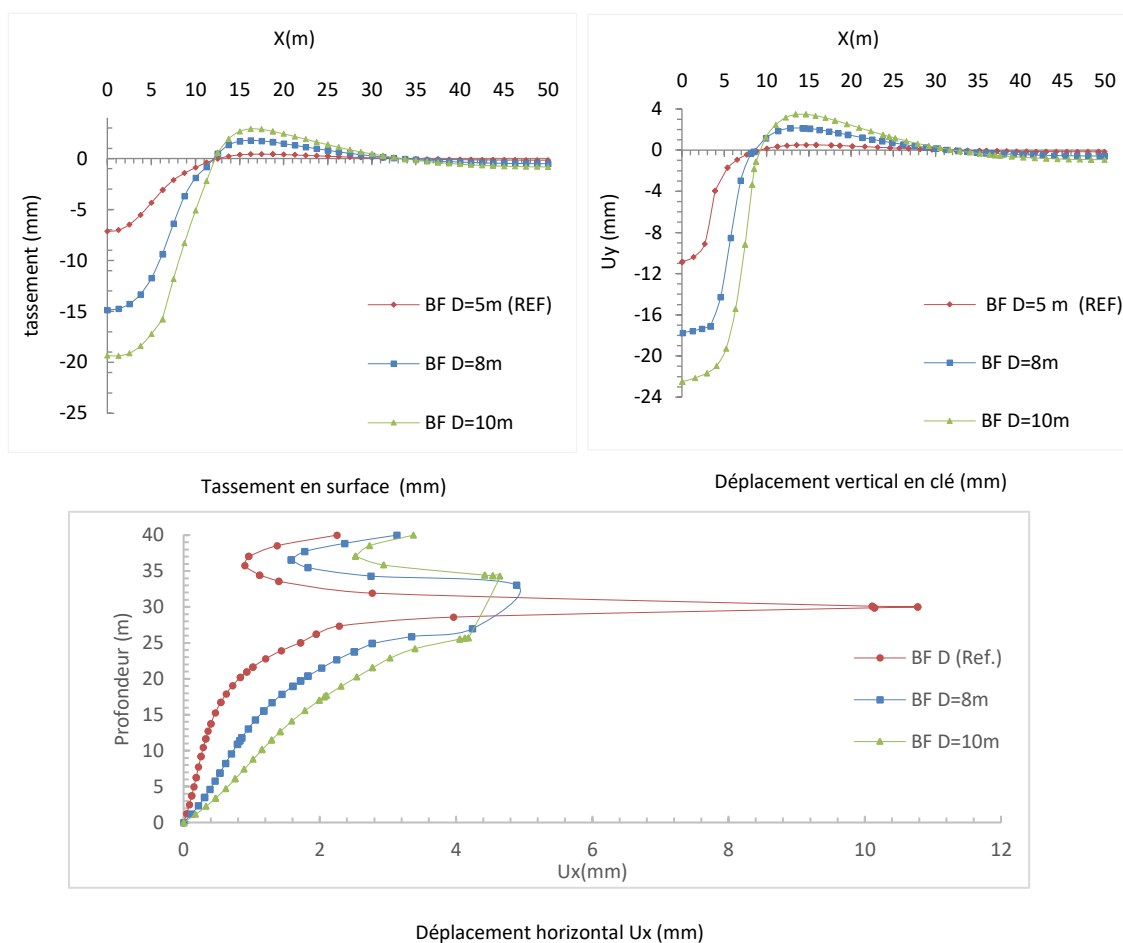
La figure (3.8) montre une diminution des tassements à mesure que la profondeur augmente accompagnée par des largeurs des cuvettes plus importantes (ces résultats concordent avec les résultats trouvés pour le béton armé avec des différences dans les valeurs).

Quant au déplacement vertical, une diminution du déplacement maximum à mesure que la profondeur augmente est lisible sur la figure, aussi, nous remarquons que les deux courbes (H=15m et H=20m) sont cohérentes et concorde parfaitement avec une petite différence avec la courbe de référence.

Les trois courbes de déplacements horizontaux montrent une similitude dans le profil parfaite avec des déplacements maximum au flanc qui diminue à mesure que la profondeur augmente.

### 3.6.2 Influence du diamètre du tunnel (D)

Le diamètre a été modifié pour différentes valeurs : 5m, 8m et 10m dans cette partie. La figure (3.9) montre les tassements, les déplacements en clé et les déplacements horizontaux du sol causés par le creusement.



**Figure 3.9** Influence du diamètre du tunnel

A travers la figure (3.9), nous constatons que l'augmentation du diamètre entraine des tassements et des déplacements verticaux plus importants. Il est de même pour les déplacements horizontaux (en clé et en radier).

On remarque aussi, des refoulements de sol en surface pour les diamètres 8 et 10m. ce résultat est différent de celui trouvé pour le BA.

### 3.6.3 Influence de l'épaisseur du soutènement (d)

Pour ce paramètre les profils des différentes courbes sont identiques. Nous concluons que l'épaisseur du soutènement n'a pas une influence significative sur les déplacements (figure 3.10). Cependant, il est à noter que l'augmentation de d entraîne une certaine augmentation des déplacements maximum.

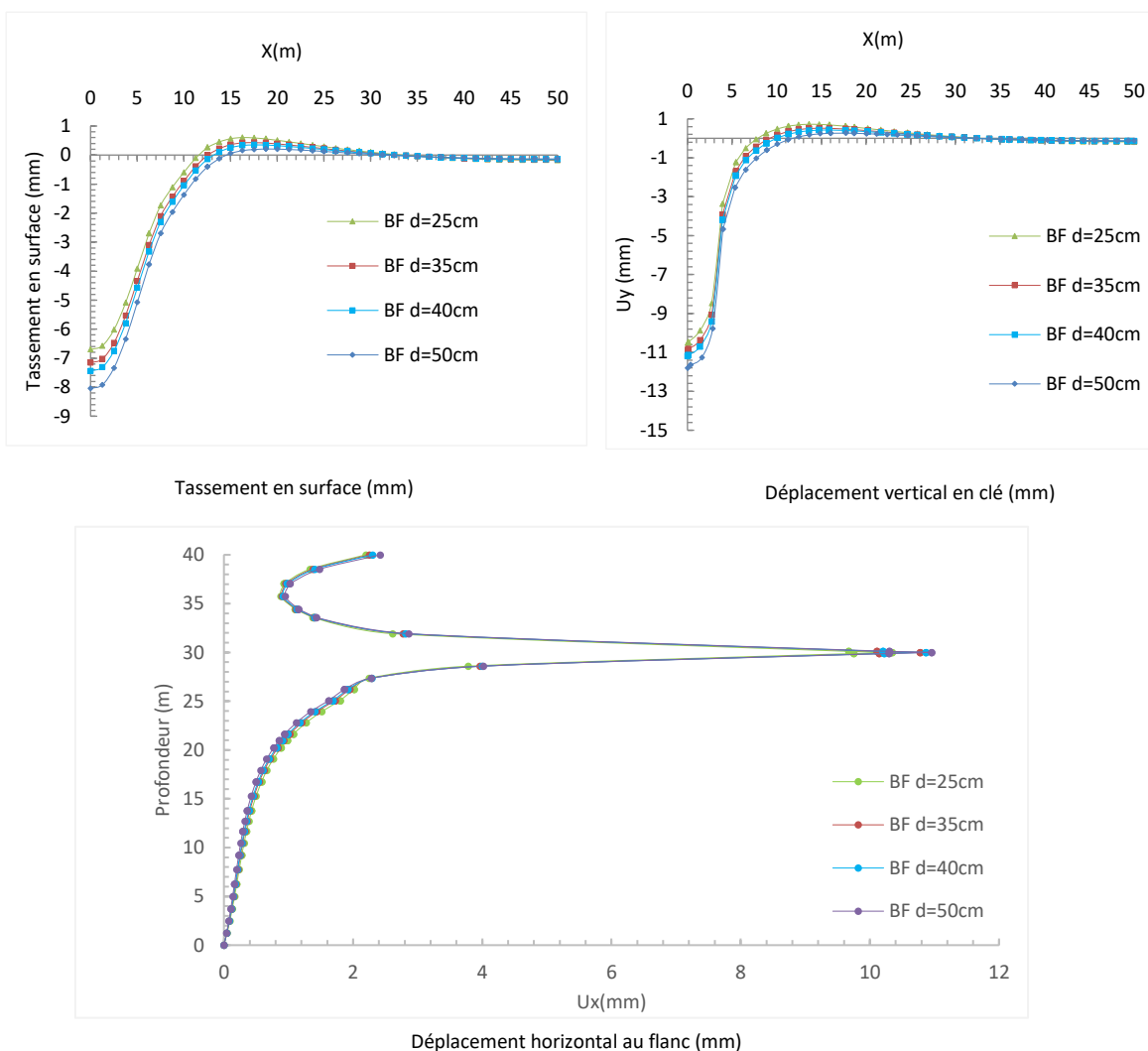


Figure 3.10 Influence de l'épaisseur du soutènement du tunnel

### **3.7 ETUDE COMPARATIVE ENTRE BETON ARME ET BETON FIBRE**

En comparant le béton armé avec des armatures classiques et le béton renforcé par les fibres en acier, on observe plusieurs aspects distincts et complémentaires des deux matériaux.

Ainsi, cette dernière partie est dédiée à la comparaison des différents résultats obtenus dans les sections précédentes pour les deux cas d'études (BA et BF), notamment les tassements, les déplacements horizontaux et verticaux, les moments fléchissant et les efforts axiaux. Tous ces résultats ont été discutés au fur et à mesure de l'avancement.

#### **3.7.1 Résultats des tassements en surface**

Dans ce point, nous avons établi une comparaison entre les différents tassements obtenus pour les deux cas d'études en fonction des variables précédentes (la profondeur, le diamètre (H, D) et l'épaisseur du soutènement (d)). La comparaison a révélé les différences significatives dans le comportement et la performance des deux matériaux. La figure (3.11) présente ces résultats.

Nous remarquons que par rapport au deux variables (le diamètre du tunnel et l'épaisseur du soutènement), plus elles augmentent plus le tassement augmente et ceci est valable pour les deux cas d'études (BA, BF). Cependant, l'augmentation de la profondeur entraîne une diminution des tassements pour les deux cas d'études (BA, BF).

Les résultats ont montré aussi que le béton renforcé par des fibres présente moins de tassements générés au massif encaissant. Ce qui montre son efficacité à réduire les déformations en surface.

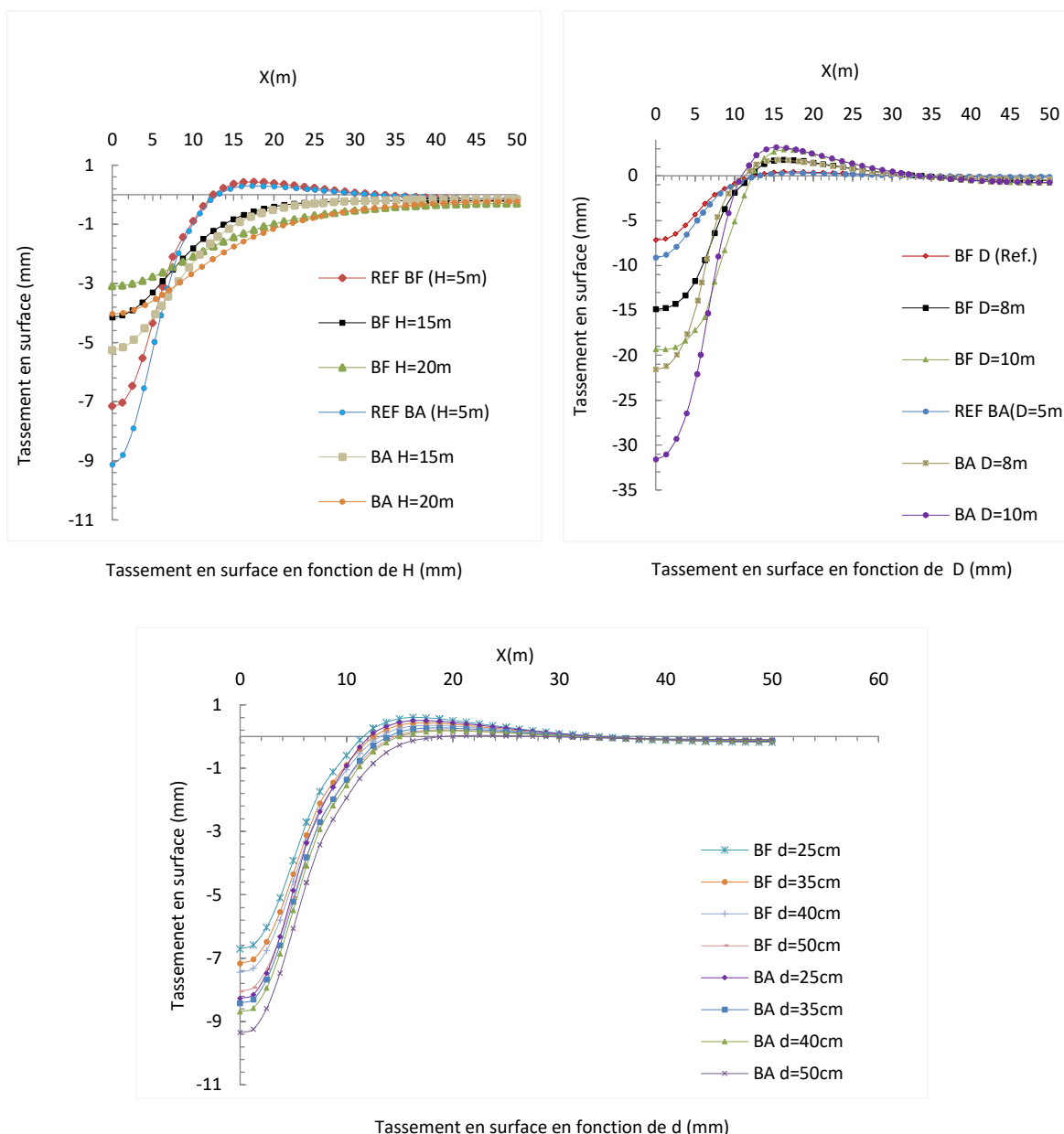
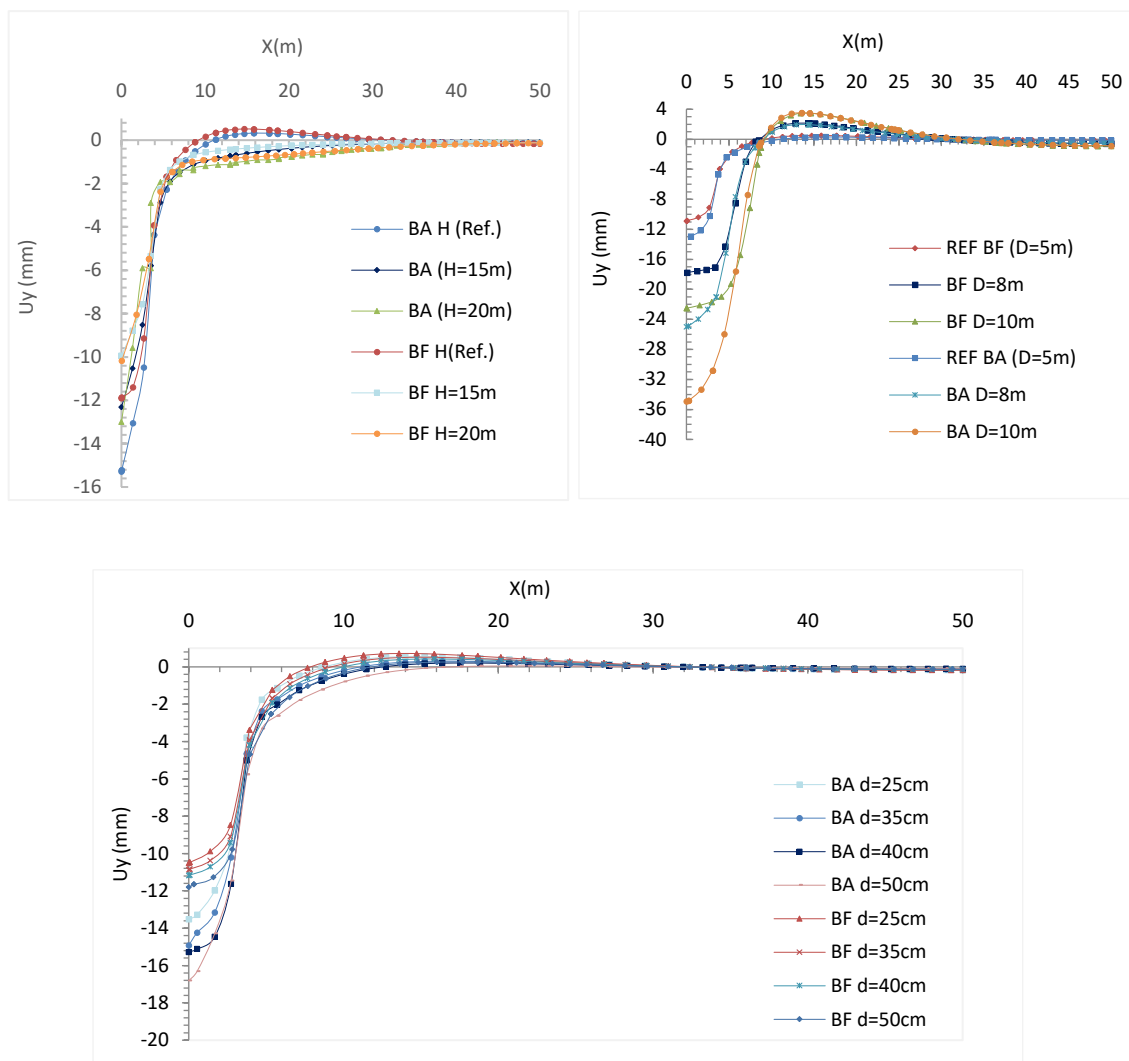


Figure 3.11 Comparaison des cuvettes de tassement en surface

### 3.7.2 Résultat des déplacements verticaux en clé

Nous avons établis une deuxième comparaison concernant les déplacements verticaux en fonction des trois mêmes variables (la profondeur, le diamètre du tunnel (H et D) et l'épaisseur du soutènement (d)). La figure (3.12) contient les résultats obtenus.

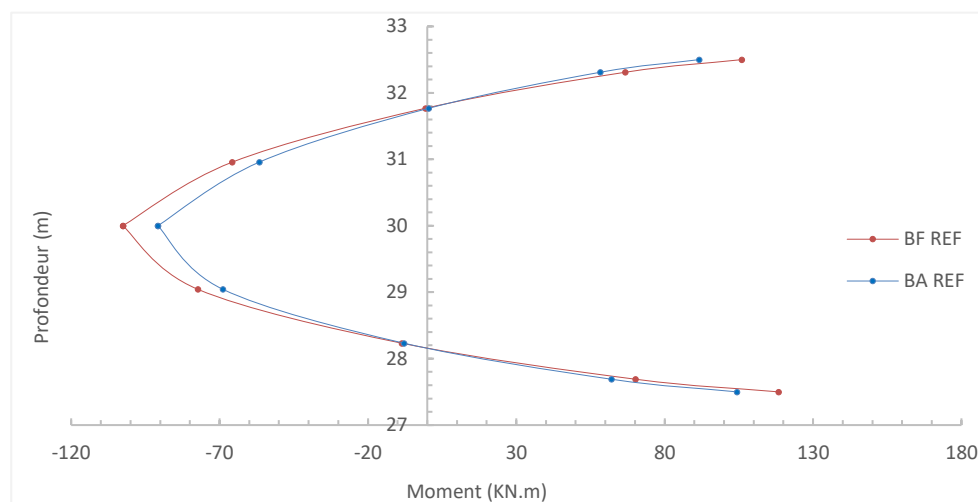


**Figure 3.12** Comparaison des déplacements verticaux en clé

A travers la figure (3.12) des déplacements verticaux, nous observons que le béton renforcé par des fibres présente moins de déplacements verticaux.

### 3.7.3 Résultats des moments fléchissant

Les résultats des moments fléchissant des deux cas d'études sont présentés sur la figure (3.13) pour les deux modèles de référence.



**Figure 3.13** Comparaison des Moments fléchissant

On voit bien (figure 3.13) que le moment fléchissant du béton fibré est supérieure à celui du béton armé. Ceci peut être expliqué par la flexibilité du BF qui a une grande déformabilité ce qui lui procure une résistance plus élevée et un moment plus important élevée contrairement au BA qui est moins flexible donc moins important. Ces résultats ont été confirmés par [33].

#### 3.7.4 Résultats des efforts axiaux

Nous présentons dans ce point, les deux courbes de l'effort axial des deux cas d'études (béton armé BA et béton fibré BF) pour les deux modèles de référence.

La figure (3.14) montre le même résultat que celui du moment. L'effort axial causé au soutènement en BF est supérieur à celui en BA. Un résultat qui nous semble tout à fait logique vu que la flèche est la dérivée deuxième du moment. C'est-à-dire si l'effort augmente, le moment augmente avec.

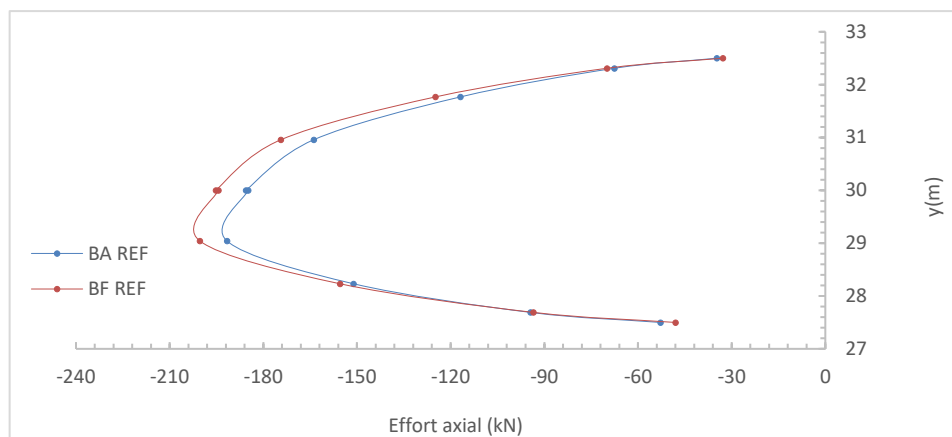


Figure 3.14 Comparaison des efforts axiaux

### 3.7.5 Résultats des déplacements horizontaux

Les résultats des déplacements horizontaux comparés entre eux pour les deux cas d'études (BA et BF) pour les trois paramètres (H, D, d) sont représentés sur la figure (3.15) en vue d'une comparaison.

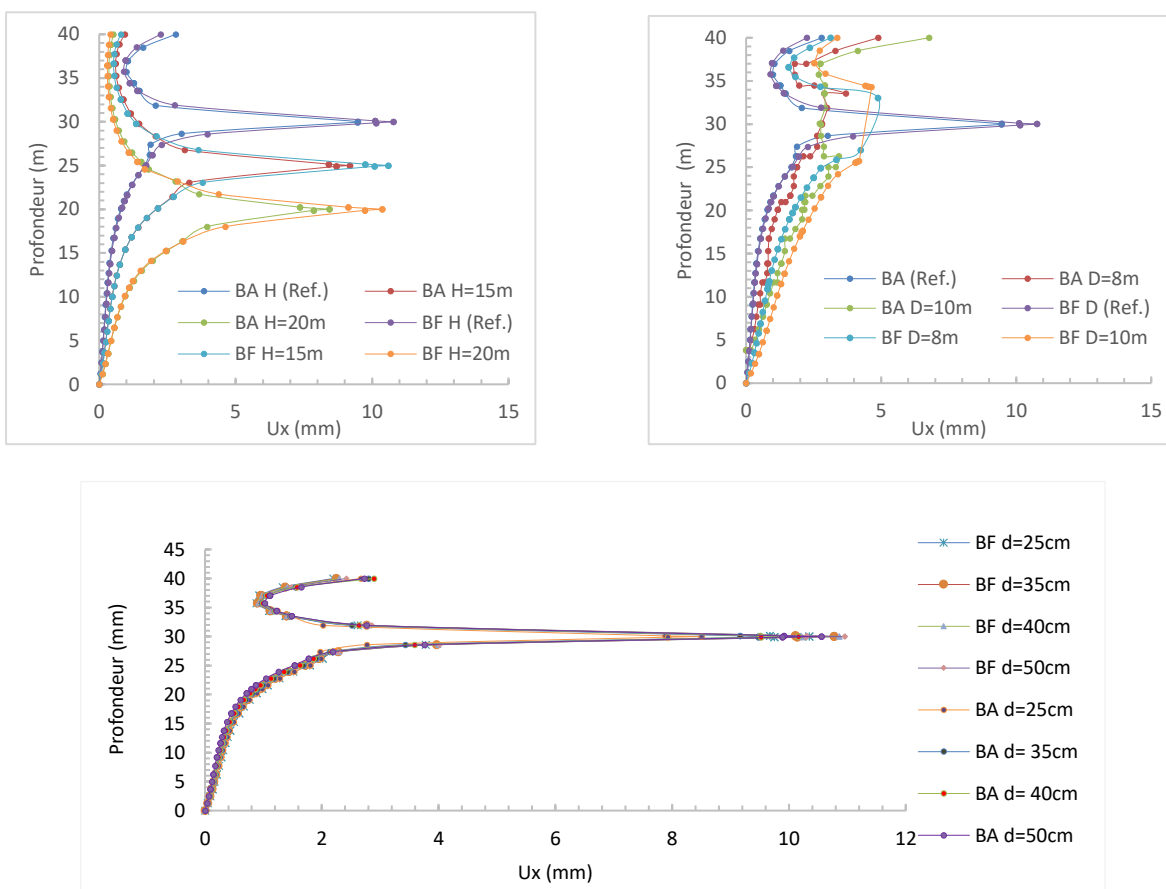


Figure 3.15 Comparaison des déplacements horizontaux

Nous observons que les bétons renforcés par des fibres sont plus sollicités par les déformations latérales dans les trois cas de figure (H, D, d).

### 3.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté des simulations numériques utilisant le code éléments finis plaxis 2D pour analyser l'effet de l'utilisation des fibres pour le renforcement des soutènements des tunnels, le choix s'est porté sur des fibres métalliques (acier). Pour cela des études ont été menées sur un cas de tunnel soutenu par du béton armé traditionnel puis par du béton renforcé par des fibres en vue de faire des comparaisons et voir les avantages obtenus.

Les résultats portaient sur l'analyse des tassements, des déplacements verticaux en clé, et des déplacements horizontaux, ainsi que sur les moments fléchissant et les efforts axiaux subis par le soutènement.

En outre, des études paramétriques ont été menées on parallèle en faisant varier trois variables, la profondeur, le diamètre du tunnel (H et D), et l'épaisseur du soutènement (d). En dernier, une étude comparative entre ces deux catégories de béton a été présentée et analysée.

Nous avons obtenu des résultats très intéressants qui démontrent les avantages du béton renforcé par des fibres métalliques par rapport au béton renforcé par des armatures traditionnelles.

Les conclusions suivantes ont été aperçues :

1. Les tassements en surface, les déplacements verticaux ainsi que les déplacements latéraux diminuent avec la profondeur que ce soit pour le BA ou le BF.
2. L'augmentation du diamètre et de l'épaisseur a entraîné des tassements, des déplacements verticaux en clé, et des déplacements horizontaux plus importants pour les deux cas d'études.

3. Le moment fléchissant du béton fibré est supérieure à celui du béton armé. Ceci peut être expliqué par la flexibilité du BF qui a une grande déformabilité ce qui lui procure une résistance plus élevée et un moment plus important contrairement au BA qui est moins flexible donc moins important.
4. L'effort axial causé au soutènement en BF est supérieur à celui en BA. Un résultat qui nous semble tout à fait logique vu que la flèche est la dérivée deuxième du moment. C'est-à-dire si l'effort augmente, le moment augmente avec.
5. Les bétons renforcés par des fibres sont moins sollicités par les tassements et les déplacements verticaux comparés au Béton armé. Cependant, ils sont plus sollicités par les déformations latérales dans les trois cas de figure (H, D, d).

Pour conclure, nous pouvons dire que le béton renforcé par des fibres présente moins de tassements et moins de déplacements verticaux générés au massif encaissant. Ce qui prouve son efficacité à réduire les déformations en surface. D'où son utilisation dans les constructions souterraines serait bénéfique et économique et apporterait plus de stabilité à l'ouvrage et aux structures sus-jacentes. Cependant, il est plus sollicité par les déformations latérales. Donc, il faudrait faire attention aux structures à proximité comme le cas de tunnels jumeaux par exemple.

## **Conclusion Générale**

---

## Conclusion Générale

Les résultats de ce mémoire soulignent l'importance des études dédiées à l'analyse des effets de l'utilisation du béton renforcé par des fibres spécifiquement métalliques sur le comportement des soutènements des tunnels. Le mémoire se structure en trois chapitres, chacun traitant des aspects essentiels de cette problématique afin de les approfondir. Il comprend une section bibliographique et une section numérique complémentaire. La partie bibliographique est répartie sur deux chapitres, suivis d'un chapitre consacré à l'analyse numérique.

Nous avons utilisé le logiciel de calcul Plaxis 2D pour réaliser une série de simulations numériques basées sur un modèle proposé par Liu en 1997. Les analyses ont porté sur l'étude de l'effet du choix entre béton armé et béton fibré sur la stabilité du massif encaissant le tunnel et son soutènement. Deux cas d'étude ont été traités se référant à un modèle tiré de la littérature celui de Liu (1997). Les cas modélisés incluaient un tunnel soutenu par du béton armé (BA) et un autre par du béton renforcé par des fibres métalliques (BF). Les résultats obtenus ont été analysés et discutés au fur et à mesure.

Nos résultats ont porté sur les tassements en surface, les déplacements verticaux en clé, les déplacements horizontaux du dol et au niveau du soutènement, ainsi que sur le moment fléchissant et l'effort axial appliqués sur les voussoirs des tunnels. Par ailleurs, des études paramétriques ont été menées pour les deux cas étudiés, incluant la profondeur et le diamètre du tunnel ainsi que l'épaisseur du soutènement. Enfin, une étude comparative a été réalisée pour évaluer l'intérêt de chaque type de soutènement par rapport à l'autre. Les résultats obtenus sont prometteurs et méritent d'être pris en compte. Ils montrent l'intérêt que peut porter l'ajout des fibres métalliques au béton ordinaire. C'est une solution novatrice et prometteuse pour les voussoirs préfabriqués de tunnels qui peut réduire les mouvements causés par ce type de construction et qui sont capitales dans ce type de projets surtout dans les milieux urbains.

Pour poursuivre ce travail, nous proposons les perspectives suivantes :

1. Étudier l'effet d'autres types de fibres sur les tunnels.
2. Analyser l'impact de l'eau sur les résultats.

## **Bibliographie**

---

## Bibliographie

- [1] Amara I., (2018). Etude de comportement d'un tronçon du tunnel d'Ait Yahia Moussa. Mémoire de master en génie civil. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.
- [2] Benali M., Hobaya H., (2023). Analyse de l'influence du creusement Des tunnels sur les déformations des pieux. Mémoire de Master en Génie Civil. Université de Tlemcen.
- [3] Dolkhenzo N., (2002). Etude expérimentale et numérique de modèle réduit Bidimensionnel du creusement d'tunnel. Thèse de doctorat. Génie civil. Lyon, INSA URGC - Unité de Recherche en Génie Civil (Lyon, INSA).
- [4] Filliat G., (1981). La pratique des sols et fondations, Chapitre 18 : Stabilité des cavités souterraines, Edition du Moniteur, Paris.
- [5] El Houari N., (2015). Contribution à l'étude mécanique et hydraulique des tunnels en configuration tridimensionnelle. Thèse de Doctorat. Université Aboubekr Belkaid. Tlemcen, Algérie.
- [6] Gana H., (2014). Les différents méthodes d'évaluation de la pression du terrain Autour, d'un tunnel métropolitain (cas du métro d'Alger-tronçon Ain Naadja). Ecole nationale polytechnique d'Alger. Mémoire de Master.
- [7] Solid G., (2012). Changer l'équipement de foration de tunnels en fonction des conditions de roche peut se révéler couteux et chronophage. Une nouvelle machine à attaque ponctuelle prouve qu'adaptabilité est synonyme de rendement.
- [8] Thames M., (2024). Grand Paris Express: Final TBM breaks through to complete line.
- [9] El Houari N., (2021). Effet du soutènement sur les ouvrages souterrains. International Conference: New Trends on Innovative Construction Materials ESSA-Tlemcen (Algeria).
- [10] Bernard E.S, A.H. Thomas. Marc B. The Thames Tunnel: exposition of facts and circumstances relating to the tunnel under the Thames; its object, its progress, and its completion, as the same was most respectfully submitted to the King by Mr. Brunel, A. J. Valpy, Londres, 1833. Fibre reinforced sprayed concrete for ground support. A Technologies in Structural Engineering Pty Ltd, U4, 1-3 Burns Rd, Wahroonga, NSW 2076, Australia b All2plan Consulting ApS, Copenhagen, Denmark.
- [11] Trompille V., (2003). Etude expérimentale et théorique du comportement d'un tunnel renforcé par boulonnage frontal. Thèse Doc. Lyon : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 219 p.
- [12] Duc-Tam Vu., (2022). Modélisation numérique du comportement des bétons de fibres métalliques sous des sollicitations multiaxiales tenant compte l'effet de l'orientation des fibres : application aux voussoirs du tunnel. Génie civil. Université Gustave Eiffel. France. Thèse de doctorat.
- [13] AFTES, (2000). Tunnels et Ouvrages Souterrains -N°159-Mai-Juin 2000.

- [14] Dudouit., Burger., (2010). Modélisation physique théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés. Thèse, HAL open science.
- [15] Berthoz N., (2012). Modélisation physique théorique du creusement pressurisé des tunnels en terrains meubles homogènes et stratifiés. Thèse, HAL open science.
- [16] El Houari (2008). Numerical modeling of the mechanical response in the vicinity of tunnels in soils saturated by Plaxis. Magister in Civil Engineering Abou Bekr Belkaid University of Tlemcen, Tlemcen, Algeria.
- [17] Clough et smith.(1981),O'Reilly et New(1982) et Mair et al (1993). Tunnels en milieu urbain : Prévisions des tassements avec prise en compte des effets des pré-soutènements (renforcement du front de taille et voute-parapluie). Thèse, HAL open science.
- [18] Justin B., (2018). Modélisation physique de l'impact du creusement d'un tunnel par tunnelier à front pressurisé sur des fondations profondes. Géotechnique. Université de Lyon, 2018. France.
- [19] Casanova P., (1995). Bétons renforcés de fibres métalliques : du matériau à la structure. Etude expérimentale et analyse du comportement de poutres soumises à la flexion et à l'effort tranchant. Thèse de doctorat Pnt et Chassée. France.
- [20] Larouci B., (2017). Contribution à l'étude du comportement mécanique de béton des fibres métalliques (les copeaux de récupération). Mémoire de fin d'étude. Université de Biskra.
- [21] Abdelmadjid B., (2021). Etude de comportement mécanique d'un béton a base des fibres métalliques. Mémoire de fin d'étude.
- [22] Pauchet W., (2021). Technique de l'ingénieur. Le principe du béton armé.
- [23] FRC (2014). Joint ACI-fib International Workshop Fiber Reinforced Concrete: From Design to Structural Applications.
- [24] Chenjie G., Wenqi D., Khalid M. Mosalam, Selim G., Kenichi S. (2017). Comparison of the structural behavior of reinforced concrete and steel 3 fiber reinforced concrete tunnel segmental joints.. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 68, 38-57.
- [25] ITAtech (2016). Guidance For Precast Fibre Reinforced Concrete Segments- Vol.1: Design Aspects. N° 7.
- [26] Chanafi H., Bourokba A., (2021). Influence de la géométrie des fibres métalliques sur le comportement mécanique de bétons à hautes performances. Université Badji - ANNABA, Mémoire de fin d'étude.
- [27] Benali R., (2022). Etude du comportement mécanique et rhéologique de la pâte du ciment, mortier et béton avec différentes fibres. Mémoire de Magister. Génie Civil. Université de Biskra.
- [28] Di Carlo F., (2016). Procedure Of Precast Fibre Reinforced Concrete Segments for Tunnel Lining Construction.

- [29] Tiberti G., (2014). Reinforcement optimization of fiber reinforced concrete linings for conventional tunnels. Department of Civil Engineering, Architecture, Land, Environment and of Mathematics, University of Brescia, Italy.
- [30] Sorelli T., (2005). On The Design of Steel Reinforced Concrete Tunnel Lining Segments. Department of Civil Engineering. University of Brescia (Italy) Structural Division. Laboratoire Central des ponts et Chaussées (France).
- [31] Toutlemonde F., (2004). Analyse des résultats des essais de voussoirs de tunnel par des méthodes de dimensionnement approchées. 2000, National Project BEFIM, report, LCPC.
- [32] Rossi P., (2002). Les bétons de fibres métalliques : Méthodes de dimensionnement des Essais de Caractérisation, de convenance et de contrôle Association Française des Recherches et Essais sur les matériaux et les Constructions (AFREM): 1995, Saint Remy Les Chevreuse. p. 73.
- [33] Liu G. (1997). Numerical modelling of damage to masonry buildings to tunnelling. Thèse de doctorat: Université d'Oxford. Grande Bretagne.
- [34] Liu X., Sun Q., Yuan Y., Taerwe L. (2020). Comparison of the structural behavior of reinforced concrete tunnel segments with steel fiber and synthetic fiber addition. Tunnelling and Underground Space Technology 103 (2020) 103506.
- [35] Peck, R.B., (1969). Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground", State-of the-Art, Proceeding of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, Mexico, pp. 225-290.
- [36] Fritih Y. (2009). Apport d'un renfort de fibres sur le comportement d'éléments en béton autoplaçant armé. Thèse de doctorat. Université de Toulouse. France.

## Webographie

- [37] Hémond G. à l'EPFL et R.M. Faure à l'ENTPE. ([https://](https://pentest-tunnels.eu) Didacticiel sur les Tunnels) ([pentest-tunnels.eu](https://pentest-tunnels.eu)). Didacticiel sur les Tunnels ([pentest-tunnels.eu](https://pentest-tunnels.eu))
- [38] TPE : Les tunnels. (2015). TPE : Les tunnels ([wordpress.com](https://wordpress.com))
- [39] Le guide de la Maçonnerie ([bilp.fr](https://bilp.fr))
- [40] Le béton armé : composition, avantages, inconvénients ([je-construis.co](https://je-construis.co))
- [41] Le béton fibré : types, avantages et utilisations – Tout sur le béton ([toutsurlebeton.fr](https://toutsurlebeton.fr)).
- [42] Patrick Guiraud., (2018). Les bétons fibrés : un vaste choix de solutions constructives (<https://www.infociments.fr/betons/betons-fibres#comment-3711>)
- [43] Applications et avantages de l'utilisation de fibres de polypropylène ([texdelta.com](https://texdelta.com))(<https://www.texdelta.com>)
- [44] Béton Direct (2017-2022). (<https://www.toutsurlebeton.fr>)