



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa
معهد المناجم
Institut des mines
قسم المناجم والجيوتكنولوجيا
Département des mines et géotechnologie



Niveau : 2^{ème} Master académique

Filière : Génie minier

Option : Géotechnique

Intitulé du projet de fin d'étude :

**Fabrication de capteurs de déplacements
pour les tunnels et les ouvrages
souterrains**

Préparé par:

FARES Taki Allah

Encadré(e) par:

HAMDANE Ali

BENGHAZI Ziad

SOUDANI Mouhamed Salah

Promotion 2024-2025

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mon père, source de soutien, de sagesse et de motivation. Merci pour tous les sacrifices et les encouragements qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

À ma mère, pour son amour infini, sa tendresse et ses prières qui m'ont toujours accompagné tout au long de mon parcours.

À mes frères et sœurs, pour leur soutien, leur affection et leur présence constante à mes côtés.

À toute ma famille, qui m'a toujours encouragé et soutenu dans mes études.

Je dédie également ce travail à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce mémoire.

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu le Tout-Puissant de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour mener à bien ce travail

. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur M. HAMDANE Ali, pour son accompagnement, ses conseils précieux et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent également à M. SOUDANI Mohamed Saleh et M. BENGHAZI Ziad pour leur aide, leurs orientations et leurs remarques constructives.

Je remercie aussi l'ensemble des enseignants de l'Institut des Mines de l'Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi – Tébessa, qui ont contribué à ma formation durant mon parcours universitaire.

Je tiens également à remercier ma famille pour leur soutien moral et leurs encouragements permanents.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

الملخص بالعربية

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة سلوك التربة والإنشاءات المحيطة أثناء حفر الأنفاق والمنشآت تحت الأرض، مع التركيز على التشوهات الناتجة عن عمليات الحفر وضرورة مراقبتها باستخدام وسائل المراقبة الحديثة. يتناول الفصل الأول عرضاً حالة لطرق حفر الأنفاق، سواء التقليدية مثل الطريقة النمساوية الجديدة (NATM) أو الميكانيكية باستخدام آلات الحفر (TBM ، EPB ، Slurry Shield) مع تحليل آليات التفاعل بين التربة والنفق، وأنواع التشوهات مثل التقارب، الهبوطات السطحية، والحركات الجانبية، إضافة إلى العوامل المؤثرة عليها والنماذج التحليلية والعددية المستعملة في التنبؤ بها. يركز الفصل الثاني على مراقبة الأنفاق، من خلال عرض أهداف المراقبة الجيوتقنية، وطرق القياس المختلفة مثل الأجهزة الميدانية، القياسات الطبوغرافية، وأنظمة المراقبة الآلية في الزمن الحقيقي، مع التطرق إلى المعايير والتنظيمات التقنية والتحديات التشغيلية. أما الفصل الثالث فيُخصص لـ تصنيف وتصنيف حساسات الإزاحة الجيوتقنية، حيث يتم شرح مبادئ عمل الحساسات، اختيار المواد، تقنيات التصنيع، طرق المعايرة، والصعوبات المرتبطة بالعمل تحت الأرض من حيث الرطوبة، الضغط، والاهتزازات. وتخلص هذه المذكرة إلى أن الدمج بين النمذجة الجيوتقنية و المراقبة الدقيقة باستخدام حساسات موثوقة يعدّ عنصرًا أساسيًا لضمان سلامة وديمومة الأنفاق والمنشآت الجوفية.

Résumé en français

Ce mémoire porte sur l'étude du comportement géotechnique des sols et des ouvrages souterrains lors du creusement des tunnels, en mettant l'accent sur les déformations induites et la nécessité d'une auscultation rigoureuse pour assurer la sécurité et la durabilité des structures. Le premier chapitre présente un état de l'art des méthodes de construction des tunnels, incluant les méthodes traditionnelles (NATM, tranchée couverte) et mécanisées (TBM, EPB, SlurryShield). Il analyse les mécanismes d'interaction sol-tunnel, les différents types de déformations (convergence, tassements de surface, déplacements latéraux), ainsi que les facteurs influençant ces phénomènes et les modèles empiriques et numériques utilisés pour leur prédiction. Le deuxième chapitre est consacré à l'auscultation des tunnels, en décrivant les objectifs de la surveillance géotechnique, les méthodes in situ et topographiques, les systèmes de monitoring automatisés, ainsi que les normes applicables et les enjeux techniques liés à la précision, à la fiabilité et à la gestion des données. Le troisième chapitre traite de la fabrication et de la caractérisation des capteurs géotechniques de déplacement, en détaillant les

principes physiques, le choix des matériaux, les procédés de fabrication, les méthodes d'étalonnage et les contraintes de déploiement en milieu souterrain. En conclusion, ce travail met en évidence l'importance de l'instrumentation intelligente et de la surveillance continue comme outils indispensables pour la maîtrise des risques et l'optimisation des projets de tunnels et d'ouvrages souterrains.

Abstract in English

This thesis focuses on the geotechnical behavior of soils and underground structures during tunnel excavation, with particular emphasis on induced deformations and the importance of systematic monitoring to ensure structural safety and long-term performance. The first chapter presents a state-of-the-art review of tunnel construction methods, including traditional techniques (NATM, cut-and-cover) and mechanized methods (TBM, EPB, slurry shield). It analyzes soil-tunnel interaction mechanisms, different types of ground movements such as tunnel convergence, surface settlements, and lateral displacements, as well as the main influencing factors and empirical and numerical models used for deformation prediction. The second chapter addresses tunnel instrumentation and monitoring, describing the objectives of geotechnical monitoring, in-situ and topographic measurement techniques, automated real-time monitoring systems, and the applicable standards and technical challenges related to data accuracy and reliability. The third chapter is dedicated to the manufacturing and characterization of geotechnical displacement sensors, detailing their operating principles, material selection, fabrication processes, calibration methods, and the constraints associated with underground environments such as humidity, pressure, and vibrations. The study concludes that the integration of reliable sensors with advanced monitoring systems is essential for effective risk management and the sustainable design of tunnels and underground structures.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre 1 – État de l’art sur la construction des tunnels et les déformations induites	3
1. Introduction	4
1.1 Présentation du context général	4
1.2 Objectifs du chapitre	5
2. Méthodes de construction des tunnels	6
2.1 Méthodes traditionnelles	6
Méthode autrichienne (NATM)	6
Méthode du bouclier (TBM)	7
Méthode des tranchées couvertes	8
2.2 Méthodes mécanisées	9
Tunneliers à pression de terre (EPB)	9
Tunneliers à pression de boue	11
Microtunneling	12
2.3 Choix de la méthode	13
3. Interactions sol-tunnel	14
4. Types de déformations	14
5. Facteurs influençant	17
6. Modèles d’analyse	18
7. Conclusion	19
Chapitre 2 – L’auscultation des tunnels	20

1. Introduction	21
2. Objectifs	22
3. Méthodes d'auscultation	22
4. Localisation des instruments	26
5. Schéma type	28
6. Normes	28
7. Enjeux techniques	29
8. Évolutions technologiques	29
9. Conclusion	30
Chapitre 3 – Fabrication et caractérisation des capteurs	32
Objectifs	32
Contenu	33
1. Principe de fonctionnement	34
2. Choix des matériaux	34
3. Procédés de fabrication	35
4. Étalonnage	36
5. Contraintes in situ	37
Conclusion générale	37
Références bibliographiques	38
Références de figure	33

Liste de figure

Figure 1. tunnel	4
Figure 2 .Nouvelle méthode autrichienne de tunnelage (NATM)	6
Figure 3 . Tunnel Boring Machine (TBM))	7
Figure 4.Cut and cover tunneling using different construction sequences:	8
Figure 5. Tunneliers à pression de terre (EPB)	9
Figure 6 . Tunneliers à pression de boue (slurryshield)	10
Figure 7 .Microtunneling	11
Figure 8 . Déformations en fonction du temps dans tunnel	13
Figure 9 .tassement de terrain	14
Figure 10 . AUSCULTATION ET SUIVI D'OUVRAGES	18
Figure 11. Monitoring for tunnels Leica Geosystems	19
Figure 12. essai de pénétration statique	20
Figure 13 . le nivellement	21
Figure 14 . station totale	21
Figure 15 . Laser-scanner 3D	22
Figure 16 . fabrication des capteurs	27

Introduction générale

Le développement rapide des infrastructures modernes et l'expansion continue des zones urbaines ont conduit à une utilisation croissante du sous-sol pour la réalisation de nombreux ouvrages tels que les tunnels de transport, les réseaux souterrains, les galeries minières et les ouvrages hydrauliques. Ces structures jouent un rôle stratégique dans l'amélioration de la mobilité, la gestion des ressources et l'optimisation de l'espace urbain, notamment dans les zones fortement urbanisées où les contraintes d'aménagement en surface sont importantes.

Cependant, la construction et l'exploitation des tunnels et des ouvrages souterrains représentent un défi majeur en raison de la complexité du comportement géotechnique des sols et des roches. Le creusement d'un tunnel modifie l'état initial des contraintes dans le massif environnant et entraîne une redistribution des efforts pouvant provoquer différents types de déformations, tels que la convergence du tunnel, les tassements en surface ou encore les déplacements latéraux du terrain. Ces phénomènes peuvent affecter la stabilité de l'ouvrage et engendrer des impacts significatifs sur les infrastructures voisines, notamment les bâtiments, les routes et les réseaux enterrés.

Dans ce contexte, l'auscultation géotechnique constitue un outil indispensable pour assurer la sécurité et la durabilité des ouvrages souterrains. Elle repose sur l'utilisation de techniques de mesure et d'instrumentation permettant de suivre l'évolution du comportement du terrain et des structures pendant les phases de construction et d'exploitation. Les données issues de ces systèmes de surveillance permettent de vérifier les hypothèses de conception, d'anticiper les risques potentiels et d'optimiser les stratégies de maintenance.

Parmi les dispositifs d'instrumentation les plus importants figurent les capteurs de déplacement, qui permettent de mesurer avec précision les variations de position et les déformations du terrain ou du revêtement du tunnel. Le développement de capteurs performants, capables de fonctionner dans des environnements

souterrains contraignants caractérisés par l'humidité, les variations de pression, les vibrations et les conditions géologiques complexes, représente aujourd'hui un enjeu important dans le domaine de l'ingénierie géotechnique.

Dans cette optique, le présent mémoire s'inscrit dans une démarche visant à étudier la fabrication et la caractérisation de capteurs de déplacement destinés à la surveillance des tunnels et des ouvrages souterrains. L'objectif principal de ce travail est de présenter les principes de conception de ces capteurs, les matériaux utilisés, les procédés de fabrication ainsi que les méthodes de calibration permettant de garantir la précision et la fiabilité des mesures.

- Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art sur les méthodes de construction des tunnels ainsi que sur les mécanismes de déformations induites dans le sol et les structures environnantes.

Le deuxième chapitre est consacré à l'auscultation des tunnels et aux différentes techniques d'instrumentation utilisées pour la surveillance géotechnique.

Enfin, **le troisième chapitre** traite de la fabrication et de la caractérisation des capteurs géotechniques de déplacement, en mettant en évidence les défis techniques liés à leur conception et à leur utilisation dans les environnements souterrains.

Chapitre 1 :
État de l'art sur la construction des tunnels et les
déformations induites

Chapitre 1 – État de l’art sur la construction des tunnels et les déformations induites

1. Introduction :

L’estimation des déplacements induits par le creusement au tunnelier sur des constructions avoisinantes (immeubles, ouvrages d’art, tunnels, réseaux...) est une étape essentielle des projets d’ouvrages souterrains en zones urbaines. De cette estimation sont, en effet, déduits ou adaptés des choix forts de conception tels que le tracé du tunnel, le dimensionnement du tunnelier (surcoupe, conicité...) et le choix de ses paramètres de pilotage (pression frontale, pression de bourrage...).

Cet article présente des comparaisons entre les résultats de calculs éléments finis 2D et six sections instrumentées d’ouvrages réels. L’ensemble des paramètres nécessaires à la modélisation (modèle géotechnique et paramètres de creusement du tunnelier) est décrit de manière explicite. Ces rétro-analyses permettent de mieux cerner les paramètres clés du problème, en particulier le rôle majeur des pertes de volume induites le long de la jupe du tunnelier.[1]



Figure 1. Tunnel [2]

1.1. Présentation du contexte général :

L'extension des villes et la demande croissante de mobilité, couplées à la volonté de limiter les impacts environnementaux, conduisent à une utilisation de plus en plus fréquente du sous-sol pour y développer des infrastructures souterraines. Dans les terrains meubles, omniprésents en zone urbaine, la limitation des impacts du creusement des tunnels sur les constructions avoisinantes (bâtiments, ouvrages d'art, tunnels, réseaux...) conduit à l'utilisation courante de tunneliers à fronts pressurisés avec pose de voussoirs (de type « pression de terre », « pression de boue », ou combinant les deux technologies).

Ces techniques de creusement répondent globalement à la problématique de limitation des impacts sur les avoisinants. Toutefois, la prévision des déplacements induits par le creusement pressurisé des tunnels reste à ce jour un problème géotechnique délicat en raison : (i) des nombreuses sources de pertes de volume autour de la machine (défaut de pression frontale, surcoupe et conicité du bouclier¹, défaut de bourrage du vide annulaire...), (ii) du caractère tridimensionnel du problème, (iii) des difficultés inhérentes au comportement mécanique des sols et des roches (élasticité non linéaire, plasticité, pressions interstitielles, effet du temps,...).

En conséquence, une optimisation des projets reste possible à travers une meilleure évaluation des contraintes techniques et de la provision financière associée aux dommages qui pourraient être générés par le creusement (AFTES GT16, 2018). [3]

1.2. Objectifs du chapitre :

Cet article est consacré à l'évaluation des déplacements finaux (loin à l'arrière du front de taille) générés dans le terrain par le creusement d'un tunnel au tunnelier, notamment la cuvette transversale finale de tassements en surface ainsi que les déplacements en profondeur. Le choix d'une approche 2D est motivé par le souhait que cette méthode soit applicable dès les premières études de conception. Elle constitue une forte amélioration par rapport aux méthodes empiriques (Mair et Taylor, 1997) utilisées en pratiques Nécessairement simplificatrice par rapport aux approches 3D mais beaucoup plus rapide à mettre en œuvre, elle permet des

dimensionnements préliminaires à la base d'approches 3D plus complètes. En effet, ce type d'approche ne permet pas d'étudier des phénomènes associés à des déformations dans la direction longitudinale comme la stabilité du front, la flexion longitudinale de pieux avoisinants ou bien les efforts axiaux engendrés par la poussée du tunnelier. La méthode de calcul adoptée, basée sur une approche éléments finis 2D, est ainsi non adaptée pour évaluer les efforts dans les voussoirs autres que ceux générés par la poussée du terrain en section transversale.

La démarche proposée n'utilise que des paramètres évaluables en fonction des conditions de pilotage du tunnelier et des résultats des reconnaissances géotechniques usuelles (essais pressiométriques et essais de cisaillement à l'appareil triaxial).

L'intérêt de cet article réside dans la formulation explicite des hypothèses de modélisation, et dans l'application de la méthode à plusieurs sections instrumentées d'ouvrages réels.

2. Méthodes de construction des tunnels :

Le choix de la technique à employer résulte d'un compromis entre les exigences liées à la géométrie de l'ouvrage à réaliser, les caractéristiques du terrain à creuser, les spécificités du site et de son environnement et les contraintes géologiques et hydrogéologiques (présence ou non de la nappe phréatique). [4]

2.1. Méthodes traditionnelles :

- **Méthode autrichienne (NATM) :**

La nouvelle méthode autrichienne de creusement de tunnels (NATM), également connue sous le nom de Méthode Convergence-Confinement ou encore Méthode d'Excavation Séquentielle (SEM), est une technique utilisée dans la construction de tunnels qui a été mise au point en Autriche dans les années 1960. La NATM consiste à creuser le tunnel par étapes, la roche ou le sol environnant assurant un soutien temporaire jusqu'à l'installation d'un revêtement permanent.

La surveillance est l'une des étapes les plus importantes de la méthode NATM : la stabilité de la roche ou du sol environnant est surveillée en permanence pendant

le processus d'excavation afin de garantir la sécurité des travailleurs et la stabilité dutunnel.

Le suivi des tunnels NATM implique la mesure et l'analyse continues de divers paramètres liés à la construction et à l'exploitation d'un tunnel construit selon la nouvelle méthode autrichienne de creusement des tunnels (NATM). [5]



Figure 2 .Nouvelle méthode autrichienne de tunnelage (NATM) [6]

- **Méthode du bouclier (tunnelier-TBM : tunnel boringmachine) :**

Qu'est-ce que la technologie des tunneliers (TBM) ?

Un tunnelier (TBM) est un système complexe utilisé pour creuser des tunnels de section circulaire dans différents types de géologie. Les tunneliers peuvent forer dans des matériaux aussi variés que la roche dure ou le sable. Ils sont préférés aux méthodes traditionnelles de forage et de dynamitage pour leur capacité à réduire le coût global du creusement, notamment en zone urbaine, et pour minimiser les perturbations des structures environnantes et de l'environnement.

Un tunnelier classique se compose d'une roue de coupe rotative, suivie d'une série de remorques abritant des équipements de support pour des systèmes tels que l'enlèvement de matériaux, les supports hydrauliques et les alimentations électriques. La partie avant du tunnelier est la tête de coupe rotative. En tournant, la tête de coupe creuse le tunnel. Des bandes transporteuses évacuent ensuite les

matériaux excavés. Derrière la tête de coupe, des vérins hydrauliques appuient sur les parois du tunnel pour propulser le tunnelier vers l'avant. [7]

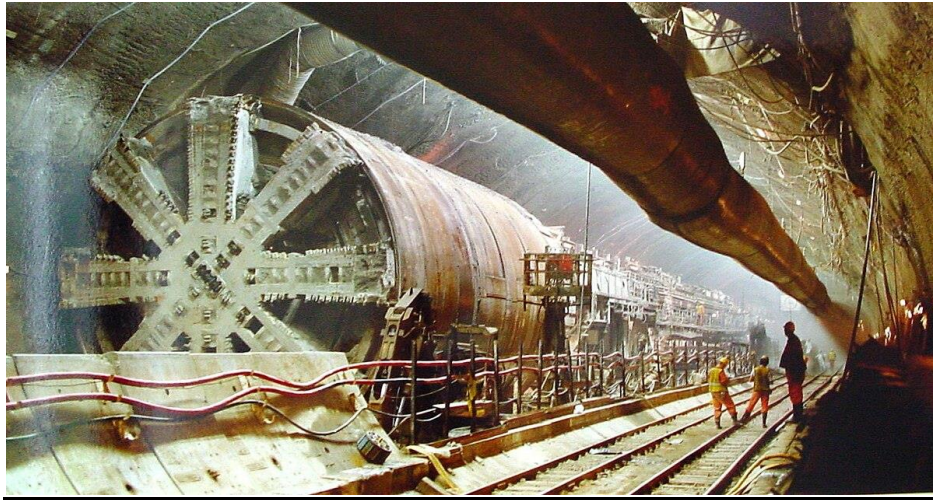


Figure 3 .Tunnel Boring Machine (TBM)) [8]

- **Méthode des tranchées couvertes (cut-and-cover) :**

La construction de tunnels en tranchée couverte est la plus ancienne méthode. Le concept de base repose sur le creusage d'une tranchée, la construction du tunnel, puis la restauration de la surface à son état initial.

En tant que telle, cette technique est perturbatrice, mais elle est aussi souvent la méthode de construction la moins chère.

WSP a conçu et supervisé la construction de nombreux tunnels en tranchée couverte, notamment pour des infrastructures de transport, des gares ou stations de transport collectif, des ouvrages souterrains, des excavations profondes pour des bâtiments et des infrastructures de transport d'eau. [9]

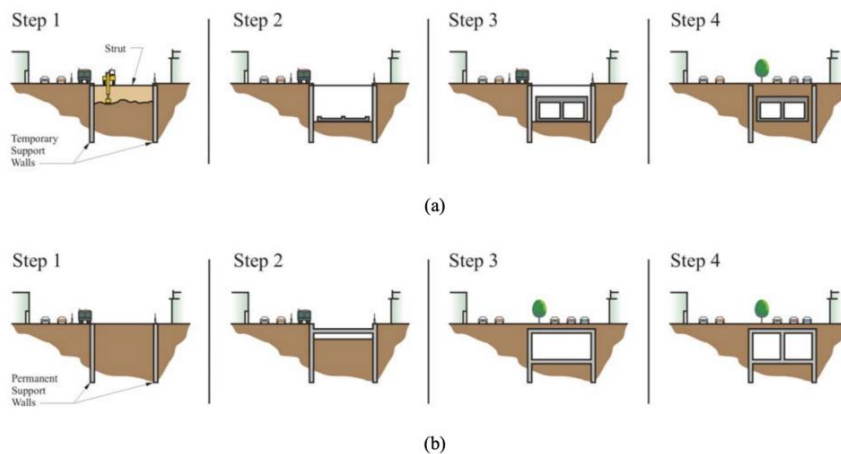
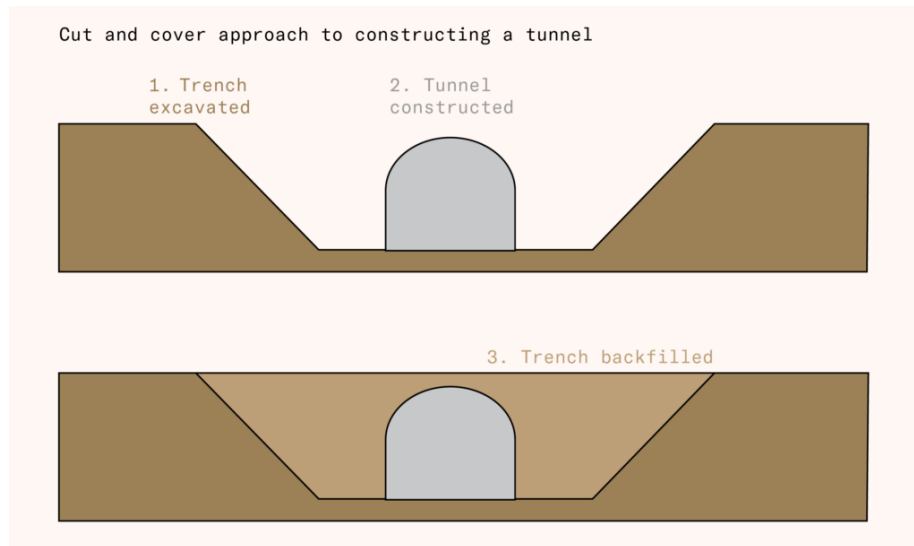


Figure 4. Cut and cover tunneling using different construction sequences: (a) bottom-up (b) top-down. [10]

2.2. Méthodes mécanisées :

- **Tunneliers à pression de terre (EPB) :**

Les tunneliers (TBM) sont des machines hautement spécialisées conçues pour forer le sol afin de construire diverses infrastructures, des autoroutes aux

systèmes de débordement. Différents types de tunneliers peuvent être utilisés, selon les conditions géologiques. Qu'est-ce qu'un tunnelier à pression de terre équilibrée (EBP) et quels sont ses avantages ?

En termes simples, les tunneliers à pression de terre équilibrée (EPB) sont des tunneliers à bouclier spécialement conçus pour fonctionner dans des sols meubles et contenant :

Ces machines sont généralement appelées « Tunneliers EPB à bouclier unique ». Examinons d'abord le fonctionnement des tunneliers EPB, avant d'expliquer comment nos produits contribuent à une excavation efficace dans cette technique de creusement de tunnels. [11]

Comment fonctionnent les tunneliers EPB ?

La particularité des tunneliers EPB est qu'ils utilisent le sol excavé comme support. La tête de coupe rotative, équipée d'outils de coupe, s'enfonce dans le front de taille du tunnel et creuse le sol, qui pénètre dans la chambre d'excavation par des ouvertures. Il se mélange alors à la pâte de sol déjà présente.

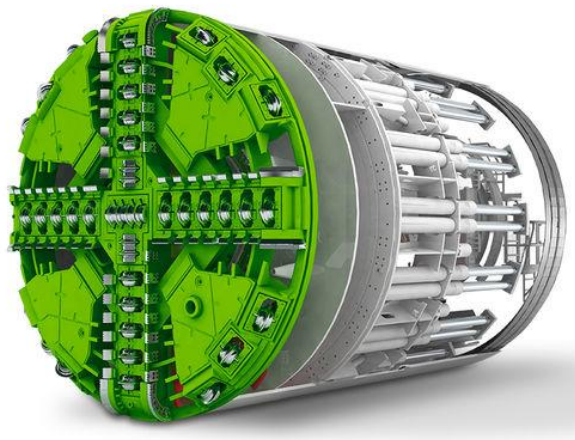


Figure 5. Tunneliers à pression de terre (EPB) [12]

- **Tunneliers à pression de boue (slurryshield) :**

DEFINITION

Les tunneliers à confinement de boue sont équipés d'une tête de coupe à attaque globale, qui maintient le front de taille grâce à la mise en pression d'un liquide de forage dans la chambre d'abattage.

Ces machines sont les plus adaptées pour les tunnels forés dans du matériau instable, soumis à des charges hydrostatiques élevées ou à un afflux important d'eau qui doit être bloqué grâce à un fluide de forage sous pression. [13]

PRINCIPE

La tête de coupe est utilisée pour le forage, tandis que le soutènement du front de taille est assuré par la contre pression de la boue, composée soit d'une suspension de bentonite soit d'un mélange d'argile et d'eau (coulis).

Cette suspension est pompée dans la chambre d'abattage où elle atteint le front de taille et pénètre dans le sol, formant soit une fine membrane d'imprégnation (cake de filtration), soit une cloison imperméable (sols fins), soit une zone imprégnée (sols grossiers) qui garantit le transfert de la contre pression au front de taille.

Cette suspension est pompée dans la chambre d'abattage où elle atteint le front de taille et pénètre dans le sol, formant soit une fine membrane d'imprégnation (cake de filtration), soit une cloison imperméable (sols fins), soit une zone imprégnée (sols grossiers) qui garantit le transfert de la contre pression au front de taille.

Ce mélange est pompé (marinage hydraulique) depuis la chambre d'abattage jusqu'à une station de séparation, située en surface, qui permet de recycler le coulis bentonite-argile. [13]



Figure 6 . Tunneliers à pression de boue (slurryshield) [14]

- **Microtunneling**

Qu'est-ce que la machine à microtunnelier ?

Les machine à microtunnelier est une technique avancée de creusement de tunnels qui utilise un tunnelier de petit diamètre pour creuser des tunnels souterrains. Cette technique est idéale pour les projets qui nécessitent l'installation de tuyaux et de canalisations en milieu urbain, où l'espace est limité et où une précision extrême est requise.

Au cours du processus de microtunnelage, le microtunnelier avance dans le sol, creusant et retirant des matériaux tandis que les tuyaux ou les structures sont simultanément installés. Cette méthode est particulièrement utile pour la construction de tunnels de petit diamètre, tels que ceux utilisés pour l'eau, le gaz et d'autres services publics. [15]

Avantages du microtunnelier

Le principal avantage du microtunnelier est sa capacité à minimiser la perturbation de la surface, ce qui en fait un choix idéal pour les projets dans les zones urbaines densément peuplées. En outre, sa capacité à travailler dans des espaces confinés et sa précision d'excavation en font un choix idéal pour les projets où il est crucial de minimiser l'impact sur l'environnement.



Figure 7 .Microtunneling [16]

2 .3. Choix de la méthode en fonction des conditions géotechniques :

Le choix de la méthode de construction d'un tunnel dépend fortement des conditions géotechniques du site. Il est crucial d'analyser le type de sol ou de roche, la présence d'eau souterraine, et les risques géologiques potentiels pour déterminer la méthode la plus appropriée. Les méthodes varient entre le forage et l'explosif, les tunneliers (TBM), et les méthodes plus traditionnelles comme la méthode NATM (New Austrian Tunneling Method).

Facteurs géotechniques influençant le choix de la méthode:

- **Nature du sol/roche:**

Les terrains meubles nécessitent des méthodes différentes de celles des roches dures. Les roches saines et homogènes peuvent permettre l'utilisation de l'explosif, tandis que les sols meubles nécessitent des tunneliers ou des méthodes de soutènement renforcées.

- **Présence d'eau:**

La présence d'eau souterraine peut compliquer les travaux et nécessiter des techniques d'excavation et de soutènement spécifiques pour éviter les infiltrations.

- **Risques géologiques:**

Les failles, les fractures, les cavités, ou encore les risques de glissements de terrain doivent être pris en compte pour minimiser les risques d'effondrement et assurer la stabilité du tunnel.

3 .Interactions sol-tunnel : mécanismes de déformation :

3.1. Redistribution des contraintes autour du tunnel :

Le creusement crée un "anneau" de relaxation des contraintes, redistribuant la pression initiale vers le support et le terrain environnant

3.2. Zones affectées dans le sol (zone de plastification, zone élastique) :

- **Zone plastique** : proche de l'excavation, où la rupture ou des déformations plastiques se manifestent.
- **Zone élastique** : plus éloignée, où les déformations restent réversibles. Selon Schubert (1969), la frontière entre ces zones dépend de la résistance et des caractéristiques géotechniques .

3.3. Effets du soutènement et du phasage de creusement :

Le type de soutènement (boulonnage, béton projeté, segment bétonné) et le phasage d'excavation déterminent la répartition des contraintes et l'amplitude des déformations. La flexibilité du NATM, combinée à des relevés géotechniques continus, permet d'adapter le support [17]

4. Types de déformations et mouvements de terrain :

Les tunnels peuvent subir divers types de déformations et mouvements, notamment des tassements de surface, des déformations élastiques, plastiques et cassantes, ainsi que des déformations dues à des mouvements tectoniques. Les déformations peuvent être continues ou discontinues, et affecter à la fois le sol environnant et la structure du tunnel lui-même.

4.1. Convergence du tunnel :

la convergence du tunnel fait référence au déplacement du sol ou de la roche vers l'intérieur du tunnel, suite à l'excavation. Ce phénomène est un élément clé de la méthode convergence-confinement, utilisée pour simuler le comportement du terrain lors du creusement de tunnels.

Plus précisément, la convergence se manifeste par une déformation du massif rocheux ou du sol autour de la cavité creusée. Cette déformation peut être mesurée et analysée pour déterminer les efforts dans le soutènement nécessaire pour assurer la stabilité du tunnel.

La méthode convergence-confinement est une approche de modélisation qui permet d'étudier cette interaction entre le massif et le soutènement en simulant le déconfinement progressif du terrain autour du tunnel. Elle prend en compte la pression fictive exercée par le sol déconfiné et son évolution en fonction de la distance au front de taille.



Figure 8. Déformations en fonction du temps dans tunnel [18]

4.2. Tassements en surface :

Le creusement des tunnels peu profonds provoque des déformations en surface du massif de sols ou de roches qui les accueille. Ces déformations sont surtout représentées par des tassements, qui ne sont pas uniformes mais se concentrent à l'aplomb du souterrain sous la forme d'une cuvette. Le problème est particulièrement sensible dans les villes, où ces tassements affectent toutes les composantes du tissu urbain, qu'il s'agisse des bâtiments, des ouvrages d'art, des voiries ou des réseaux. En profondeur, d'autres ouvrages peuvent se trouver dans la zone d'influence du tunnel en construction : des tunnels, notamment quand on construit des tunnels jumeaux, où le second interagit avec le premier, mais plus généralement des ouvrages souterrains (galeries, collecteurs, etc.) et enfin des fondations profondes, qui n'ont pas forcément été prévues pour résister au creusement d'un tunnel dans leur voisinage. [19]

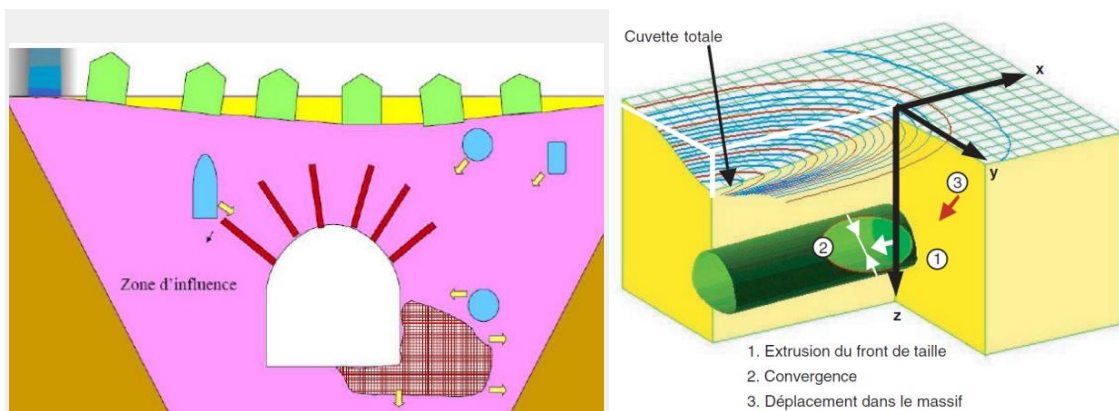


Figure 9 .tassement de terrain [20]

4.3. Mouvements latéraux et horizontaux :

En surface, les mouvements latéraux et horizontaux observés lors de la construction de tunnels se traduisent par des tassements, des déplacements horizontaux et des distorsions des structures environnantes, pouvant mener à leur fissuration, voire à leur ruine. Ces mouvements sont influencés par divers facteurs tels que la méthode de creusement, la pression exercée sur le front de taille, et la nature du sol.

4.4. Effets sur les bâtiments et infrastructures voisines :

Les travaux de construction peuvent avoir divers effets sur les bâtiments et infrastructures avoisinants, allant des nuisances sonores et de vibrations aux dommages potentiels causés par les travaux eux-mêmes. L'impact sur le voisinage dépendra de la nature du projet, des méthodes de construction employées, et de la sensibilité des bâtiments et infrastructures existants.

5. Facteurs influençant les déformations :

Les déformations du sol et de la roche sont influencées par une multitude de facteurs liés à la nature du matériau lui-même, ainsi qu'aux conditions environnementales et de contrainte. Ces facteurs interagissent pour déterminer la manière dont un matériau se déforme sous l'effet de forces externes

5.1 Nature et comportement du sol ou de la roche :

Le type de sol ou roche (cohésif, granulaire, fracturé, massif) influence fortement la réponse au creusement « en arcs » ou par affaissement. Les sols durs tendent à favoriser l'effet d'arc compressif, contrairement aux sols mous où la déformation est plus étendue et progressive. [21]

5.2 Profondeur du tunnel :

Une plus grande profondeur augmente le stress géostatique, modifiant la redistribution mécanique autour du tunnel. Les tunnels peu profonds (10–50 m) présentent davantage de tassements en surface, tandis qu'au-delà d'un certain seuil ($\geq 2 \times$ diamètre), un arc de charge se forme et limite la déformation[22]

5.3 Méthode de creusement et type de soutènement :

Les techniques (TBM, NATM, tranchée couverte) et types de soutènement (béton projeté, boulonnage, cintres) déterminent le volume de sol perturbé et la rapidité du support. La méthode NATM, par exemple, exploite l'arc du terrain via une approche adaptative et instrumentée .

5.4 Drainage et pressions interstitielles :

Les variations de pression d'eau (pression interstitielle) induisent des déformations supplémentaires, notamment en milieu saturé ou argileux. Un drainage inadéquat peut accroître le tassement à long terme. [23]

5.5 Taux d'avancement et phasage du chantier :

Le rythme d'excavation et la séquence d'avancement (phases de tunnel, segmentation, reprise en demi-portée...) influent directement sur la redistribution de contraintes et la migration des déformations, comme souligné dans l'utilisation des méthodes analytiques ou numériques séquentielles. [24]

6. Modèles d'analyse et prédiction des déformations :

6.1 Approches empiriques (ex. Peck, O'Reilly & New) :

Les méthodes empiriques reposent sur l'observation et l'analyse de données issues de projets antérieurs. L'un des modèles les plus utilisés est celui de **Peck (1969)**, qui décrit la distribution des tassements en surface par une **courbe gaussienne** : [25]

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

6.2 Modélisation numérique (FEM, FDM...) :

Le **FEM** (ex. ABAQUS, Plaxis, FLAC3D) permet de modéliser la géométrie, la stratification, et le soutènement en phases successives, intégrant des lois élasto-plastiques (Mohr-Coulomb)

Le **FDM** (p. ex. FLAC), les méthodes par éléments discrets (**DEM**, **BEM**) et les approches isogéométriques sont également employées pour des analyses 3D complexes. [26]

6.3 Limites et incertitudes des prévisions :

- **Empiriques** : simple mais ne tient pas compte des conditions réelles du sol, de la nappe, ou des soutènements spécifiques.

- **Numériques** : dépendantes de la précision des entrées géotechniques et des lois de comportement. Les conditions limites, l'hétérogénéité, et la validation terrain restent déterminantes .

7. Conclusion :

- **Synthèse** : les déformations sont modulées par la nature du sol, la profondeur, la méthode de creusement, la gestion des eaux, et le phasage.
- **Nécessité de l'auscultation** : des relevés rigoureux (inclinomètres, extensomètres, piézomètres) sont indispensables pour calibrer les modèles et garantir la sécurité.
- **Ouverture** : ces enseignements justifient l'importance de l'instrumentation (Chapitre 2) et des capteurs (Chapitre 3) pour une surveillance proactive des ouvrages souterrains.

Chapitre 2 :
L'auscultation des tunnels

Chapitre 2 – L’auscultation des tunnels

1 .Introduction :

Les tunnels et ouvrages souterrains jouent un rôle essentiel dans les infrastructures de transport, de distribution d’eau, d’énergie ou encore dans le domaine minier. Soumis à des conditions géotechniques complexes, à des sollicitations mécaniques importantes et à des facteurs environnementaux variés, ces ouvrages nécessitent une surveillance rigoureuse tout au long de leur cycle de vie.

L’auscultation des ouvrages souterrains regroupe l’ensemble des techniques de mesure, d’inspection et de suivi permettant d’évaluer leur comportement dans le temps, de détecter d’éventuels désordres (fissures, affaissements, infiltrations, déformations, etc.), et d’anticiper les risques pour la sécurité des usagers et la durabilité des structures.

Cette surveillance peut être réalisée à l’aide d’instruments de mesure embarqués, d’outils géophysiques, de capteurs automatiques ou d’inspections visuelles régulières. Elle permet d’alimenter les diagnostics structurels, de valider les hypothèses de dimensionnement et de piloter les opérations de maintenance ou de réhabilitation.

Dans ce contexte, ce document (ou rapport) vise à présenter les principes, les méthodes et les enjeux liés à l’auscultation des tunnels et des ouvrages souterrains, ainsi que les outils modernes permettant une surveillance efficace et fiable.



Figure 10 . AUSCULTATION ET SUIVI D'OUVRAGES [27]

2 .Objectifs de l'auscultation en milieu souterrain :

L'auscultation joue un rôle crucial dans la validation de la conception des ouvrages et leur maintenance. Elle permet de :

- **Détecter les défaillances** structurelles à un stade précoce pour éviter des réparations coûteuses.
- **Évaluer l'intégrité** des matériaux utilisés et leur comportement sous des charges variées.
- **Informers les décisions** en matière de réhabilitation ou de renforcement.
- réside dans sa capacité à assurer la sécurité et la longévité des structures. En identifiant les signes avant-coureurs de défaillance,
- prévenir les accidents potentiels et de planifier des interventions correctives efficaces. [28]

3 .Méthodes d'auscultation géotechnique :

Les méthodes d'auscultation géotechnique sont des techniques utilisées pour surveiller et évaluer l'état des structures souterraines, des sols, et des fondations. Ces méthodes sont cruciales pour assurer la sécurité et la stabilité des infrastructures, en particulier dans les environnements où les conditions

géologiques peuvent varier ou évoluer. Voici une liste des principales méthodes d'auscultation géotechnique

3.1 Auscultation in-situ :

Définition:

Instrumentation directement installée dans le sol ou la structure pour mesurer en continu ou périodiquement des grandeurs géotechniques (déplacements, pressions, contraintes...)[29]

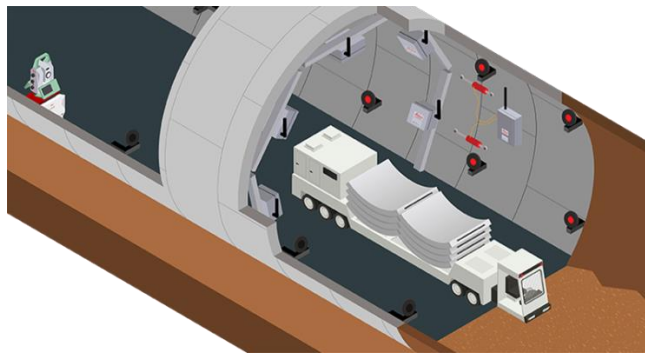


Figure 11. Monitoring for tunnels | Leica Geosystems [30]

Techniques courantes :

- **Pénétromètre statique (CPT / CPTU)** : sonde poussée dans le sol pour mesurer la résistance et la pression interstitielle, très utilisée pour le profilage fines couches[31]
- **CPT (Pénétration au Cône)** : Mesure la résistance du cône et le frottement de la manchonnerie. [31]
- **CPTU (Piezocône)** : En plus de ces mesures, il intègre la mesure de la pression interstitielle, idéale pour évaluer la perméabilité du sol et son degré de saturation. [31]

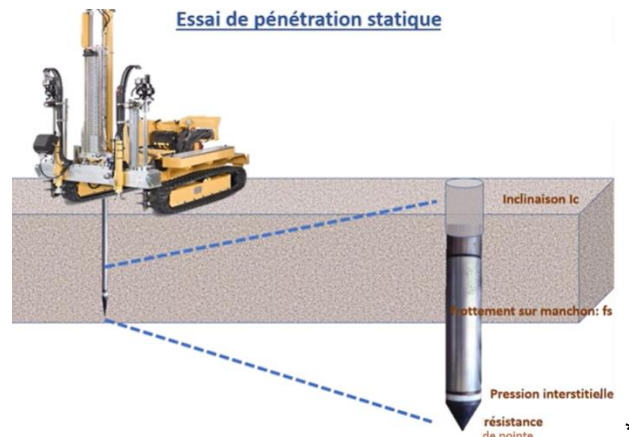


Figure 12. Essai de pénétration statique ¹³

- **Piézomètres, préssiomètres, inclinomètres, extensomètres** : dispositifs installés dans des sondages pour suivre la pression des eaux, les déplacements inclinés, la déformation et le tassement.
- **Capteurs automatiques** (fils vibrants, jauges électriques, etc.) connectés à une centrale d'acquisition. La redondance de capteurs permet une meilleure fiabilité des données. [32]
- **Essais dynamiques** : mesures de caractéristiques mécaniques (module de cisaillement, ondes sismiques...) in situ pour caractériser les sols sous sollicitations. [33]

Avantages :

- Surveillance quasi-continue, réactive, précise.
- Permet une interprétation en temps réel et une comparaison immédiate des hypothèses de conception.
- Possibilité de suivre le comportement sous charges ou conditions réelles.

3.2. Auscultation topographique et géodésique

Définition:

Surveillance des mouvements et déformations superficielles de structures ou terrains par des techniques de relevés géométriques, souvent répétées dans le temps. [34]

Techniques:

- **Nivellement de précision** : suivi altimétrique (affaissements, élévations superficielles).

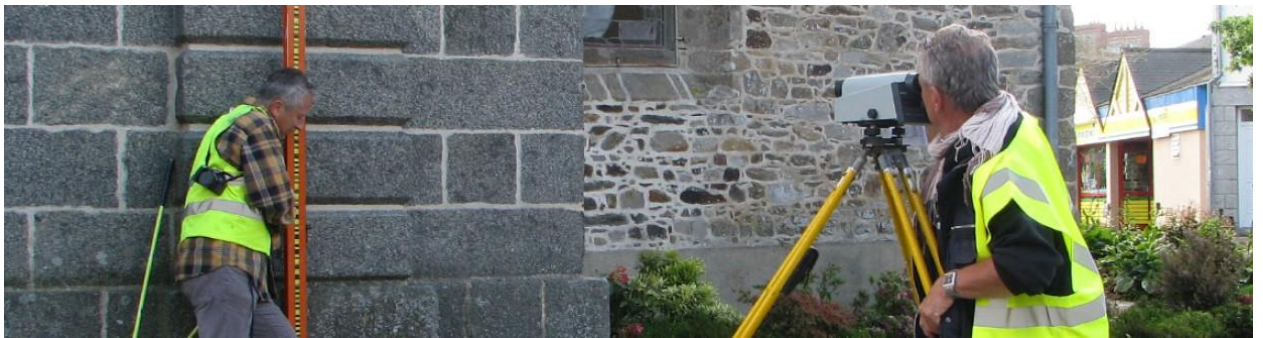


Figure 13. Le nivellement [35]

- **Station totale** (automatisée) et **tachéomètre** : repérage de cibles (prismes) pour mesurer 3D des déplacements. [36]



Figure 14. Station totale [37]

- **Laser-scanner 3D** : acquisition dense de nuage de points pour modélisation des déformations[38]



Figure 15 .Laser-scanner 3D [39]

- **Lidar**) : relevés rapides, sûr pour zones difficiles d'accès.

Avantages:

- Suivi périodique ou quasi-continu, avec haute précision (mm)
- Adapté aux grandes structures : ponts, barrages, tunnels, façades, pentes instables
- Permet détection précoce de mouvements anormaux et planification d'interventions. [40]

4 .Localisation typique des instruments dans les tunnels :

- **Inclinomètres&extensomètres**
- **Inclinomètres verticaux** sont souvent installés dans des forages pieds de paroi (portails ou voussoirs) pour détecter les déplacements latéraux du terrain ou des voûtes. [41]
- **Extensomètres à corde vibrante** sont fixés à l'intérieur du tunnel, dans la voûte ou les parois pour mesurer les variations de convergence (rétrécissement du profil). [41]
- **Piézomètres et cellules de pression interstitielle**
- **Piézomètres à corde vibrante et cellules de pression interstitielle** sont placés dans ou sous le revêtement, souvent accrochés à des forages depuis l'intérieur du tunnel pour surveiller le comportement hydrique et les

pressions en profondeur □ 3. Jauges de contraintes, convergence & capteurs structurels. [42]

- **Jauges de contrainte, cellules de charge et déformètres** sont installés sur les supports et voussoirs pour suivre la charge s'appliquant sur le revêtement, le tassement, ou la pression radiale du sol. [43]
- **Capteurs de convergence** (ex. lasers) mesurent la distance entre points opposés dans la voûte à intervalles réguliers.
- **Instruments topographiques & monitoring structurel** [44]
- **Cibles topographiques**, tachéomètre ou scanner laser sont installés à l'intérieur pour réaliser des relevés 3D fréquents et détecter même de faibles déformations géométriques .
- **Systèmes automatisés** (ex. prisms + station totale + acquisition continue) permettent un suivi en temps réel, relié à des alarmes si des seuils sont dépassés

- **Répartition typique dans le tunnel**

1. **Surface/Portails**

- Inclinomètre en pied de paroi, piézomètres horizontaux, suivi topographique du terrain d'entrée.

2. **Parois internes & voûtes**

- Extensomètres sur parois, jauges de contrainte et convergence dans la calotte.

3. **Zone du remplissage ou sous-sol**

- Capteurs hydriques et barrages pour contrôler la pression interstitielle.

4. Stations fixes de monitoring

- Dispositifs GPS/tachéomètre ou scanners dans des alcôves internes.

- **Tableau récapitulatif**

Zone	Instrument	Mesure
Portails	Inclinomètre vertical	Déplacementlatéral
Parois / voûte	Extensomètre, jauge de contrainte	Convergence, contrainte
Sol externe	Piézomètres, cellules interstiellles	Pression, niveau eau
Intérieur tunnel	Tachéomètre/prismes, scanner 3D	Déformationgéométrique
Système global	Stations automatisées + alarmes	Surveillance continue

5.Schéma type d'un dispositif d'auscultation :

Un dispositif standard combine :

1. **Instruments in situ** : piézomètres, extensomètres, inclinomètres et cellules de contrainte, encastrés dans le sol ou le revêtement.
2. **Monitoring structurel** : capteurs de convergence, cibles topographiques, stations totales automatiques.
3. **Système d'acquisition** : modules d'interrogation (local/cloud), automatisation (Edge-to-Cloud), alertes SMS/Email.
4. **Traitement & interface** : plateforme SaaS centralisée (ex. Datatys) avec traitementautomatique.

Ce schéma est illustré notamment par TT Géomètres Experts : surveillance automatique en temps réel, alertes, traitement des données via interface web. [45]

6 .Normes et recommandationsapplicables:

- **GT19 R1F1 / R2F1** : recommandations AFTES pour auscultation en tunnel and ouvrages souterrains.
- **GT24 R1F1** : reconnaissance à l'avancement.
- **EN NF EN 13848** : géométrie de voies ferrées (relevant si rail/tunnel mixte).
- **Eurocode 7 (EN)** : cadre général géotechnique, reconnaissance des sols, dimensionnement des équipements d'auscultation. [46]

7. Enjeux techniques et opérationnels de l'auscultation

7.1. Fiabilité et précision des mesures

- **Redondance des capteurs** (contrainte/déformation/discrétion) permet vérification croisée des données sans perturber le comportement, comme recommandé en Revue Géotechnique.
- Précision millimétrique exigée (convergences, pressions, déplacements). [47]

7.2. Systèmes d'alerte et suivi en temps réel

Automatisation TT Géomètres : alertes immédiates par SMS/Email, surveillance 24/7 via station totale et capteurs.

- Intégration Edge-to-Cloud : filtration à la périphérie, intelligence embarquée, envoi différencié vers le cloud. [48]

7.3. Contraintes logistiques et économiques

- Capteurs robustes, compatibles environnements extrêmes (ATEX, humide, cryogénie) grâce à la fibre optique.
- Coût : fibre Bragg = ~150–250 USD/point + 10–30 USD pour l'interrogateur ; DAS = ~10 USD/km fibre, interrogateur ~100 USD.
- Maintenance minimisée (pas d'entretien capteurs, durées >25 ans) . [49]

8. Évolutions technologiques et tendances récentes

8.1. Capteurs intelligents et connectés

- Intégration IoT / capteurs edge : plateformes intelligentes avec IA locale, filtrage et ajustement en temps réel
- Edge-to-Cloud remplace l'acquisition dépassée, rend la maintenance proactive. [50]

8.2. Fibre optique et surveillance distribuée

- **DAS** (DistributedAcousticSensing) permet détection acoustique continue, idéal pour tunnels longs/sites complexes.
- **Capteurs Bragg & Brillouin** : précision ($<20\ \mu\text{m}$, $<1\ ^\circ\text{C}$), détection anormale en continu et localisation fiable.
- Projet CORDIS MONICO : capteurs à fibre dans revêtement tunnel pour déformation et séismes, avec filtrage intelligent. [51]

8.3. Traitement automatique des données

- IA / ML : réseaux LSTM pour anomalie et localisation de défaut sur fibre optique (excellente détection, $F1 \geq 96\ \%$).
- Deep learning pour reconnaissance d'événements (bruit, trafic) sur DAS dans tunnels. [53]

9. Conclusion

Les dispositifs d'auscultation modernes allient fiabilité, précision et automatisation. Les normes AFTES et EN encadrent la mise en œuvre technique. L'introduction de capteurs intelligents, fibre optique distribuée et IA renforce la surveillance continue, réduit les interventions manuelles, mais génère des volumes massifs de données. Le défi reste d'équilibrer performance, coûts et gestion de ces données à grande échelle

Chapitre 03 :
Fabrication et caractérisation des capteurs
géotechniques

Chapitre3:Fabrication et caractérisation des capteurs géotechniques

Objectifs :

Objectifs du chapitre

Ce chapitre a pour but de présenter les procédés de fabrication des capteurs de déplacement destinés aux ouvrages souterrains, d'en expliquer les principes physiques, les matériaux employés, ainsi que les méthodes d'étalonnage. Il met également en évidence les principaux défis techniques associés à leur conception et à leur déploiement sur le terrain.

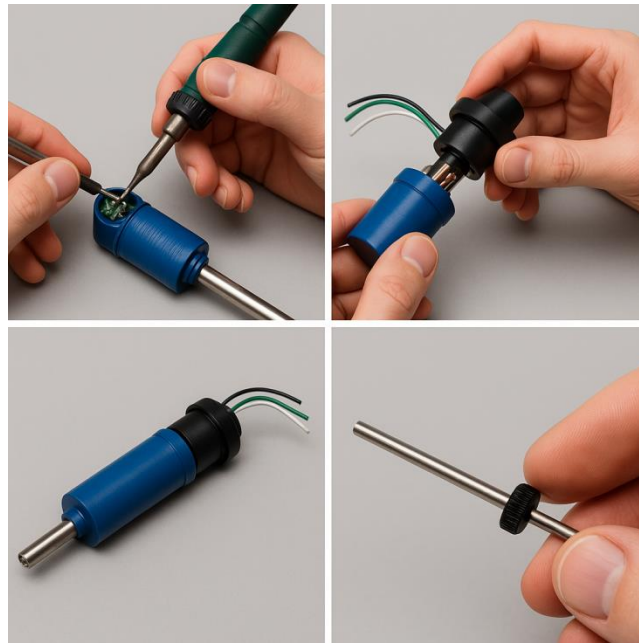


Figure 16. Fabrication des capteurs [54]

- **Décrire les procédés de fabrication des capteurs utilisés (ou envisagés).**
 - **Assemblage, soudure, collage, étanchéité :** Ces étapes sont classiques en instrumentation géotechnique, particulièrement pour garantir des boîtiers résistants et hermétiques. L'article "Instrumentation in situ, un outil pour les techniques d'amélioration des sols" précise l'importance de connaître les

conditions environnementales (température, corrosion, humidité) dès la phase de conception des capteurs

- **Procédés industriels** : CNC, impression 3D et surmoulage sont souvent utilisés pour miniaturiser et renforcer les capteurs géotechniques, comme mentionné dans diverses fiches techniques industrielles. [55]
- **Expliquer les matériaux, principes physiques et méthodes de calibration.**
 - **Conditions environnementales** : L'article précédent souligne également que chaque capteur doit être adapté aux contraintes d'humidité, température, pression à l'installation ****.
 - **Capteurs à fibres optiques (FBG)** : Opsens Solutions met en avant la robustesse, l'immunité aux interférences électromagnétiques et la résistance chimique/thermique de ces capteurs, idéals pour les environnements souterrains hostiles [56]
 - **Principes physiques** : Les capteurs résistifs, LVDT, fibres FBG et MEMS sont courants ; l'étalonnage se fait avec des bancs micrométriques, cyclage thermique, référence traçable. Opsens évoque ces avantages, sans détail technique, mais renforce leur pertinence pour la calibration [57]
- **Montrer les défis techniques (précision, durabilité, étanchéité, température, etc.).**
 - **Durabilité & étanchéité** : L'article sur l'instrumentation in situ souligne la nécessité d'adapter le matériel aux environnements corrosifs, humides et soumis à des contraintes extrêmes
 - **Immunité EMI & robustesse** : Opsens insiste sur l'immunité des fibres optiques aux perturbations magnétiques, une vraie valeur dans les tunnels et zones souterraines . [55]

Contenu :

Principe de fonctionnement des capteurs ciblés

1. Principe de fonctionnement des capteurs

Technologie	Principe	Avantages&contraintes
Jauges de déformation (résistives / VibratingWire)	Variation de résistance ou fréquence en fonction de la contrainte.	Précis, éprouvé, mais sensible à l'hystérésis et à la température ResearchGatesg.geomotion.com.sg
LVDT (capteur inductif)	Noyau mobile induit variation de tension proportionnelle à la position	Haute résolution, sans contact. Utilisé avec bras extensomètres
Fibres de Bragg (FBG)	Variation de la longueur d'onde réfléchi sous contrainte/température	Distribution continue, immunité aux EMI, durable

2.Choix des matériaux :

- **Boîtier** : inox 316L, aluminium anodisé ou polymères haute performance (PEEK, PC) pour garantir durabilité, résistance à la corrosion, pression et variations thermiques .
- **Éléments sensibles** :
 - Jauges résistives sur acier inox ou alliages.
 - Fibre optique (silice) pour FBG.
 - Noyau ferromagnétique pour LVDT.
- **Câblage** : câbles blindés, gaines silicone/fluor polymère, connecteurs IP67+ pour résistance à l'eau, produits chimiques et hautes températures.
- **Agrafes & étanchéité** : joints EPDM, silicones, résines époxy, mastics, surmoulage pour atteindre IP68–IP69K.

3.Procédés de fabrication : Assemblage / Soudure ou collage / Étanchéité / Miniaturisation :

La fabrication des capteurs géotechniques destinés à la surveillance des tunnels repose sur des procédés rigoureux qui visent à garantir leur fiabilité, leur durabilité et leur résistance à des conditions extrêmes telles que l'humidité, les vibrations et les variations de pression. Les principales étapes de fabrication incluent : [59]

- **Assemblage**

Le processus commence par l'assemblage des composants électroniques tels que les capteurs (accéléromètres, jauges de contrainte, etc.), les microcontrôleurs, et les connecteurs. Ces éléments sont fixés sur un circuit imprimé (PCB) en tenant compte de la stabilité mécanique et de la précision de mesure requise dans les environnements souterrains (Wang et al., 2019).

- **Soudure ou collage**

Les connexions électriques sont assurées par la soudure à l'étain, une méthode fiable et standardisée. Dans certaines applications, des adhésifs conducteurs ou des résines époxy sont utilisés pour offrir à la fois liaison électrique et fixation mécanique. Ces techniques sont particulièrement utiles pour les capteurs souples ou miniaturisés (Kim et al., 2021). [60]

- **Étanchéité**

Pour assurer une résistance à l'humidité, à la poussière ou même aux infiltrations d'eau, les capteurs sont protégés par des enrobages imperméables : boîtiers hermétiques, gels de silicone, ou conformalcoatings. Un indice de protection élevé (IP67 ou plus) est souvent exigé dans les milieux souterrains comme les tunnels (ASTM D6527-00, 2020). [61]

- **Miniaturisation**

Avec l'évolution des technologies MEMS et l'intégration croissante, la miniaturisation permet d'installer les capteurs dans des espaces restreints, près des joints ou des structures sensibles. On utilise des composants CMS, des circuits multicouches, voire des techniques de micro-usinage ou d'impression 3D pour les boîtiers (Zhou et al., 2020). [62]

4.Méthodes d'étalonnage et vérification expérimentale :

- **Calibration statique de capteurs de pression (terre / sol)**
- **Dead Weight Calibration (DWC)** : application de poids morts sur le capteur pour générer une pression connue. Méthode classique pour calibrer des cellules de pression, utilisée dans l'étude de Gade &Dasaka (2018) . [63]
- **Pneumatic Calibration Chamber (PCC)** : calibration par pression uniforme appliquée dans une chambre, adaptée aux capteurs tactiles et pressions sur surface ; présente une meilleure uniformité que DWC . [64]
- **Dispositif universel de calibration fluide / sol**
- Dave &Dasaka (2012) présentent un dispositif calibrateur modifié qui permet de calibrer simultanément par fluide (liquide ou air) et en sol réel (in-soil), garantissant un suivi précis des performances à long terme .[65]
- **Vérification expérimentale en laboratoire**
- Jayalath&Wimalasena (Geomate Journal) expliquent la calibration en laboratoire de capteurs de pression par application progressive de pression pneumatique et développement de la courbe de calibration .
- L'étude sur les capteurs tactiles (tactile pressure sensors) utilise des cycles de calibration DW et PCC, en analysant la non-linéarité, la stabilité et la dérive sur plusieurs années .
- **Métrologie et incertitudes**

- L'utilisation de testeurs à poids morts (dead-weight tester) permet une calibration de référence avec incertitude contrôlée, certifiée par des laboratoires métrologiques (ex. Budenberg dead-weight tester) .
- L'évaluation de l'incertitude statistique et linéaire est formalisée dans des méthodes conformes aux normes ISO/NABL, présentées dans Yadav (National Physical Laboratory) . [66]

5. Contrainte de déploiement in situ (température, humidité, vibrations)

- **Contraintes in situ et défis techniques**
- **Température** : stabilité à large plage.
- **Humidité & eau** : étanchéité critique sous sols saturés.
- **Pression et vibrations** : fixation rigide pour éviter fausses mesures.
- **Accessibilité limitée** : capteurs compacts et faciles à entretenir via dataloggerIoT longue portée (jusqu'à 15 km) et autonomie 25 ans.
- **Compatibilité électromagnétique** : blindage efficace pour éviter EMI. [67]

Conclusion générale

Le développement de capteurs géotechniques performants repose sur :

- **Matériaux robustes** adaptés à l'environnement souterrain.
- **Procédés de fabrication précis** : assemblage, soudure, étanchéité, miniaturisation.
- **Calibration rigoureuse** garantissant la fiabilité.

Conception pensée pour le terrain : durabilité, étanchéité, autonomie et communication.

Références bibliographiques

1. Lombardi Group. (n.d.). *Tunnels et ouvrages souterrains*.
2. Lombardi Group – Tunnels et ouvrages souterrains. (n.d.). *Tunnels et ouvrages souterrains*.
3. Géotechnique Journal. (2020). *Importance de comprendre les effets du creusement sur le sol et les ouvrages avoisinants*.
4. InfoCiments. (n.d.). *Tunnels : les différentes méthodes d'exécution*.
5. Sisgeo. (n.d.). *Surveillance des tunnels NATM*.
6. Geology Science. (n.d.). *Construction de tunnels*.
7. Encardio Rite. (n.d.). *TBM method of tunneling*.
8. Geology Science. (n.d.). *Construction de tunnels*.
9. WSP. (n.d.). *Tunnels en tranchée couverte*.
10. *Cut and cover tunneling*. (n.d.).
11. Master Builders Solutions Blog. (n.d.). *Earth pressure balance*.
12. Herrenknecht AG. (n.d.). *Produit tunnelier*.
13. ITA-AITES. (n.d.). *Slurry shield*.
14. Herrenknecht AG. (n.d.). *Produit microtunnelier*.
15. Eurohinca. (n.d.). *Techniques utilisées pour la construction des tunnels*.
16. Multinfra. (n.d.). *Microtunneling*.
17. RailSystem, The Constructor, & OneMine. (n.d.). *Références sur les tunnels*.
18. International Journal of Geoengineering Case Histories. (n.d.). *Articles sur la géotechnique*.
19. IFSTTAR. (n.d.). *Publication IFSTTAR*.
20. ENPC. (n.d.). *Tassements*.
21. IntechOpen, Wikipedia, ProQuest, & GEOTEK.expert. (n.d.). *Sources diverses*.
22. SpringerOpen, MDPI, & ProQuest. (n.d.). *Publications scientifiques*.
23. MDPI & GEOTEK.expert. (n.d.). *Études géotechniques*.
24. SpringerOpen. (n.d.). *Article scientifique*.
25. Peck, R. B.. (1969). *Deep excavations and tunneling in soft ground*. State of the Art Report, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City.
26. Frontiers, IntechOpen, & Scribd. (n.d.). *Références diverses*.
27. Cabinet Bogaert. (n.d.). *Travaux*.
28. StudySmarter. (n.d.). *Auscultation des ouvrages*.
29. SpringerLink, Techniques de l'Ingénieur, & Géotechnique Journal. (n.d.). *Sources techniques*.
30. Techniques de l'Ingénieur. (n.d.). *Documentation technique*.
31. Wikipedia. (n.d.). *Norme ASTM et historique*.

32. [Reddit](#). (n.d.). *Discussions en ligne*.
33. [SpringerLink](#) & [Géotechnique Journal](#). (n.d.). *Références scientifiques*.
34. S2L Topographie & [Geoprocess](#). (n.d.). *Topographie et géoprocessing*.
35. IGN. (n.d.). *Le nivellement*.
36. S2L Topographie & Geo-Sat. (n.d.). *Déplacements*.
37. [Socotec](#). (n.d.). *Station totale robotisée*.
38. S2L Topographie & Geo-Sat. (n.d.). *Déformations*.
39. [Topcon Positioning](#). (n.d.). *3D Laser Scanners*.
40. Geo-Sat. (n.d.). *Systèmes d'accès*.
41. [Scribd](#), [Géotechnique Journal](#), & [ENSTP Alger](#). (n.d.). *Références académiques*.
42. [Sixense Group](#), [Sisgeo](#), & [ENTEC DZ](#). (n.d.). *Instrumentation géotechnique*.
43. [ENTEC DZ](#), [Sisgeo](#), & [Scribd](#). (n.d.). *Instrumentation du sol*.
44. [Sixense Group](#), [Sisgeo](#), & [Géolithe](#). (n.d.). *Surveillance géotechnique*.
45. [Socotec](#), TT Géomètres Experts, [Géotechnique Journal](#), & [Nexans](#). (n.d.). *Instrumentation et monitoring*.
46. Geo-Sat. (n.d.). *Fiabilité et précision des mesures*.
47. [Géotechnique Journal](#). (n.d.). *Géotechnique*.
48. [AIMI Fiber](#), [Géotechnique Journal](#), [Socotec](#), & TT Géomètres Experts. (n.d.). *Instrumentation par fibre optique*.
49. [Nexans](#), [Socotec](#), & [Alcimed](#). (n.d.). *Technologies de monitoring*.
50. [Reddit](#), [Nexans](#), & Geo-Sat. (n.d.). *Discussions et technologies*.
51. [Alcimed](#), [Wikipedia](#), & [Socotec](#). (n.d.). *Innovations technologiques*.
52. [CORDIS](#), Solscope, & [Socotec](#). (n.d.). *Innovation et monitoring*.
53. [arXiv](#). (n.d.). *Prépublication scientifique*.
54. OpenAI. (2026). *Image générée par intelligence artificielle : ChatGPT*.
55. [Géotechnique Journal](#) & [Opsens Industrial](#). (n.d.). *Capteurs industriels*.
56. [Opsens Industrial](#). (n.d.). *Instrumentation industrielle*.
57. [Géotechnique Journal](#). (n.d.). *Article géotechnique*.
58. [Géotechnique Journal](#). (n.d.). *Article géotechnique*.
59. ASTM International. (2020). *ASTM D6527-00: Standard test method for determining unsaturated hydraulic conductivity of porous materials using a tension infiltrometer*. ASTM International.
60. Kim, J., Lee, S., & Park, H.. (2021). *Development of flexible and miniaturized strain sensors for geotechnical monitoring*. *Sensors*, 21(4), 1253. <https://doi.org/10.3390/s21041253>
61. Wang, Y., Zhang, D., & Liu, H.. (2019). *Design and manufacturing of smart sensors for underground monitoring*. *Journal of Geotechnical Instrumentation*, 15(2), 34–42.

62. Zhou, X., Li, Q., & Chen, L.. (2020). *Miniaturized wireless geotechnical sensor systems using MEMS technology*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103275.
63. SpringerLink & Astrophysics Data System. (n.d.). *Références scientifiques*.
64. ResearchGate, SpringerLink, & Astrophysics Data System. (n.d.). *Publications scientifiques*.
65. SpringerLink. (n.d.). *Publication scientifique*.
66. GDS Instruments. (n.d.). *Instrumentation géotechnique*.
67. MDPI, Scribd, & Worldsensing. (n.d.). *Technologies de monitoring*.