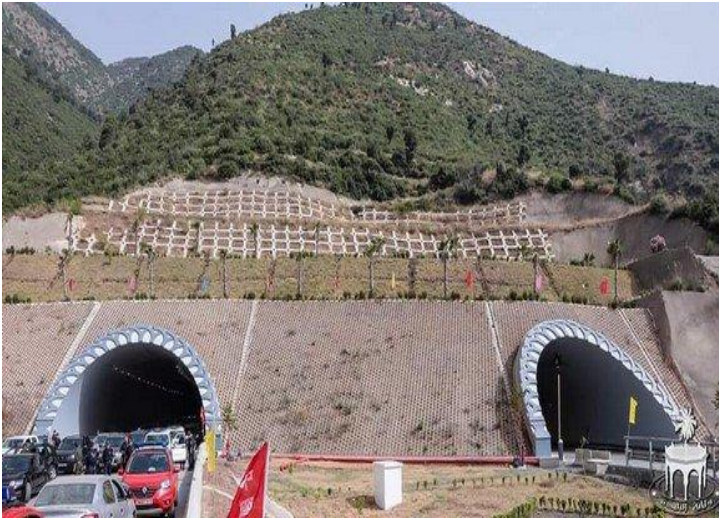


جامعة جيجل



كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري



INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES

Destiné aux étudiants en L3 travaux publics

*Préparé par :
S. Hamioud*

Table des matières

3.1.	Introduction.....	33
3.2.	Facteurs Géologiques Principaux pour le Choix des Méthodes de Creusement	35
3.3.	Méthodes de Creusement	36
3.3.1.	Méthode traditionnelle à l'explosif	37
3.3.2.	Méthode par attaque ponctuelle	43
3.3.3.	Méthodes de creusement au tunnelier	44
3.4.	Procédé du Creusement :	46

3.1. Introduction

Lors de la construction des tunnels, l'objectif principal est d'assurer la sécurité à la fois à court terme et à long terme. À court terme, il s'agit de garantir la sécurité des travailleurs et des usagers pendant la construction du tunnel. Cela implique la mise en place de mesures de sécurité telles que la ventilation, l'éclairage, la gestion des déchets, la prévention des incendies, etc. À long terme, il s'agit de garantir la sécurité des usagers du tunnel pendant toute sa durée de vie. En effet, pour tous les projets en milieu urbanisé ou dans un environnement sensible, la maîtrise des déformations induites par le creusement est un facteur clé pour assurer la sécurité à court et à long terme.

La classification des tunnels en fonction des conditions géologiques peut être divisée en deux catégories principales : les tunnels au rocher et les tunnels en sols ou roches tendres :

✓ **Tunnels au rocher :**

Lors du creusement de tunnels dans des formations rocheuses solides, la stabilité générale du tunnel et des terrains environnants est le plus souvent assurée, et il n'y a pas de rupture généralisée sauf éventuellement à très grande profondeur. Le principal enjeu est d'éviter les chutes de blocs rocheux, risque que l'on traite par boulonnage du rocher.

Les discontinuités dans le rocher, telles que les failles, les joints, les fissures et les cavités, sont des éléments importants à prendre en compte lors du creusement de tunnels. Leur traitement est souvent délicat car il est difficile de les localiser précisément à grande profondeur, de les qualifier mécaniquement et de les traiter depuis la surface.



Figure (3.1) : tunnel au rocher

✓ Tunnels en sols ou roches tendres

Les tunnels construits dans des sols indurés ou des roches tendres, souvent relativement peu profonds, nécessitent des soutènements provisoires et des revêtements définitifs pour garantir leur stabilité et assurer la sécurité. Les sols indurés et les roches tendres ne garantissent pas naturellement la stabilité générale, ce qui impose la mise en œuvre de ces mesures de soutien. Le creusement d'un tunnel peut modifier l'état de contraintes et de déformation du terrain, mettant en cause la stabilité de l'excavation réalisée ou provoquant des désordres inadmissibles dans l'environnement du tunnel.

De plus, la construction de tunnels peut être confrontée à des défis tels que la haute pression de l'eau, le risque de tremblements de terre, des conditions de sol difficiles, des effondrements de tunnels et d'autres accidents, faisant de la sécurité une priorité absolue dans ces projets .

En outre, il est crucial d'évaluer la perméabilité des terrains et les charges hydrauliques résultant du régime hydrogéologique. Ces évaluations permettent de guider le choix des informations géologiques, hydrogéologiques et géotechniques nécessaires, ainsi que les reconnaissances à effectuer.

3.2. Facteurs Géologiques Principaux pour le Choix des Méthodes de Creusement

Le choix des méthodes de creusement d'un tunnel dépend largement des caractéristiques géologiques du sous-sol. Voici quelques-uns des principaux facteurs géologiques pris en compte dans le processus de sélection de la méthode de creusement :

✓ **Type de sol ou de roche :**

Pour creuser un tunnel, il faut distinguer les terrains meubles (sols) et les terrains durs (roches), et selon les types de terrains caractériser au mieux leur nature (lithologie, discontinuités...), leurs propriétés mécaniques (résistance et déformabilité, mais aussi potentiel de gonflement, altérabilité, aptitude à l'abattage...), ainsi que leurs propriétés hydrauliques (perméabilité notamment). Les méthodes de construction peuvent varier en fonction de la géologie de la zone, de l'utilisation prévue du tunnel et de la technologie disponible.

✓ **La variabilité géologique le long du projet :**

La variabilité géologique le long d'un projet de tunnel peut inclure différentes natures de terrains et leurs linéaires prévisibles, ainsi que les zones de contacts entre les différents terrains, telles que les contacts normaux, les contacts par faille, les zones de chevauchements tectoniques, etc.

Une étude géotechnique approfondie, combinée à des relevés topographiques et à des méthodes géophysiques, est nécessaire pour évaluer la complexité géologique le long du projet et anticiper les défis potentiels.

✓ **Le contexte hydrogéologique dans un environnement autour d'un projet :**

Pour évaluer le contexte hydrogéologique dans un environnement assez large autour du projet de tunnel, il est nécessaire d'identifier s'il existe avant creusement une nappe phréatique ou plusieurs nappes superposées, et de caractériser leurs aquifères : perméabilités, zones d'alimentation et exutoires. Ces éléments permettront d'établir un modèle hydrogéologique initial, pour estimer les directions et vitesses

d'écoulement des eaux souterraines, et ainsi déterminer les circulations et charges hydrauliques avant creusement. Ce modèle servira de base pour l'évaluation de l'incidence du creusement sur les régimes d'écoulements, et donc des débits et variations de pressions interstitielles.

Des études hydrogéologiques approfondies peuvent inclure la caractérisation de la géologie et de la topographie de la zone, ainsi que l'identification des nappes aquifères et des sources potentielles de contamination des sols et des eaux souterraines.

✓ **Le contexte environnemental du projet**

Le contexte environnemental du projet consiste à caractériser la sensibilité des constructions existantes situées dans la Zone d'Influence Géotechnique (ZIG) qui pourraient être affectées par les déformations et/ou les vibrations induites par le creusement, ainsi que les risques de rencontre de terrains déjà pollués, nécessitant un traitement spécifique une fois excavés, de gaz et autres éléments pouvant présenter un danger sanitaire ou explosif, ainsi que la diffusion dans les terrains des produits polluants ou dangereux introduits du fait de la construction elle-même.

3.3. Méthodes de Creusement

La construction d'un tunnel peut se résumer en trois étapes :

- Creuser le terrain : c'est la fonction d'abattage ;
- Évacuer les terrains creusés : c'est la fonction de marinage ;
- Soutenir le terrain s'il n'est pas naturellement stable : c'est la fonction de soutènement (provisoire) et/ou de revêtement (définitif).

Trois principales méthodes d'exécution des tunnels peuvent être utilisées.

- **Tunnel dans le rocher :**
 - Méthode traditionnelle à l'explosif ;
 - Méthode par attaque ponctuelle.
- **Tunnel en terrain difficile :**
 - Méthode de creusement au tunnelier.

3.3.1. Méthode traditionnelle à l'explosif

La technique de l'excavation à l'explosif est très ancienne mais reste encore, dans de nombreuses situations, la plus économique et plus dangereux. En souterrain on utilise des explosifs brisants (vitesse de détonation > 4000 m/s). L'abattage avec emploi des explosifs est généralement utilisé pour l'exécution de tunnels situés dans les roches dures pour lesquels un abattage manuel (marteaux piqueurs, pelle hydraulique) ou un terrassement mécanique (machine foreuse pleine section ou à attaque ponctuelle, brise roche) n'est plus envisageable du point de vue technique ou économique. L'abattage à l'explosif s'effectue pour chaque volée d'avancement de manière cyclique selon les opérations élémentaires suivantes :

Par le biais de la foreuse (jumbo) il est effectué le forage des trous d'une volée. Le nombre de trous d'une volée diffère selon les caractéristiques du rocher, La longueur de ces trous est comprise entre 1,5 m et 5 m, selon la qualité du terrain, et la répartition des trous est établie précisément selon un plan d'exécution de forage (une maille approximative de 1 m x 1 m). L'explosif employé sur chantier est fabriqué sur place (en tunnel), ensuite, le chargement peut commencer. Le marinage (évacuation des terres) doit être fait juste après le tirage.

Après chaque tir, certains blocs de roches sur le front, en voûte et pied droit sont instables. La purge permet de détacher ces blocs à l'aide d'un marteau brise roche ou d'une fraise installée sur le bras d'une pelle mécanique. La séquence de détonation suit un plan établi qui permet de limiter au maximum la quantité d'explosif qui explose en même temps.

La pratique de l'explosif nécessite un soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement, l'évacuation des déblais, la mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement définitif, et le guidage selon l'axe théorique prévu.

Creuser un tunnel nécessite une succession d'étapes qui, une fois faites, sont répétées jusqu'à ce que le tunnel soit fini, c'est ce qu'on appelle le cycle de production. Ces étapes sont les suivantes :

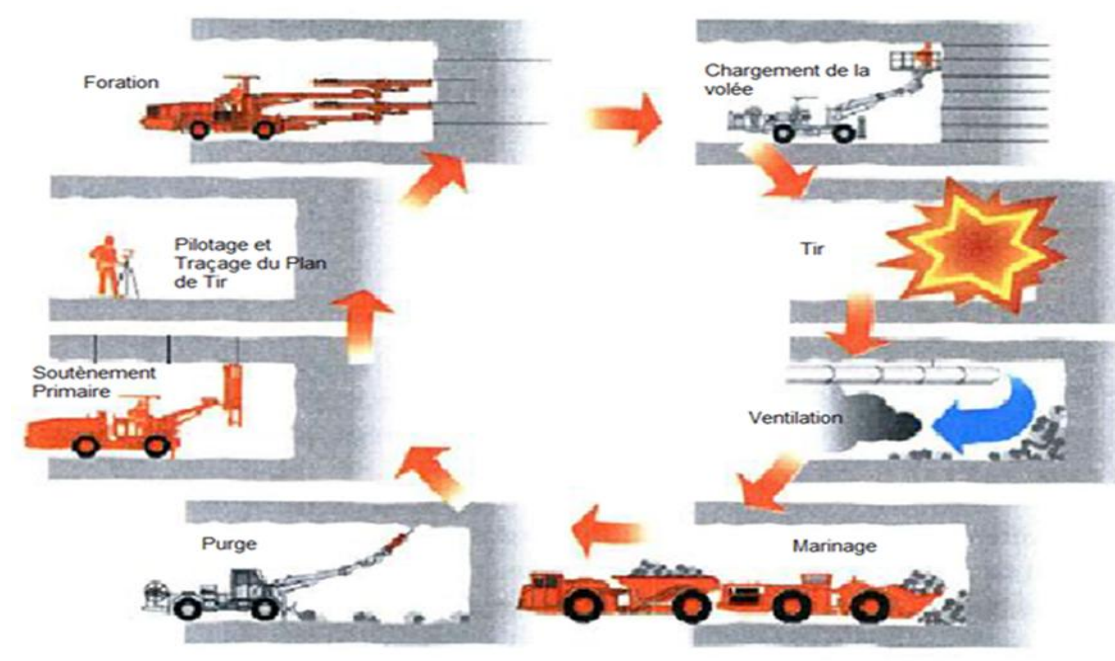


Figure (3.2) : cycle de creusement par abattage à l'explosif

a. Le plan de tir

Le plan de tir est une étape obligatoire du cycle de creusement. Il consiste en un schéma de la voûte d'un tunnel sur lequel on place toutes les informations nécessaires au bon déroulement du tir. Ces informations portent principalement sur la localisation des différentes mines, leur puissance (type de charges), les détonateurs utilisés ainsi que l'ordre d'explosion des charges et le temps d'écart. Cela permet de visualiser la séquence de tir des charges pour mieux l'adapter au terrain.

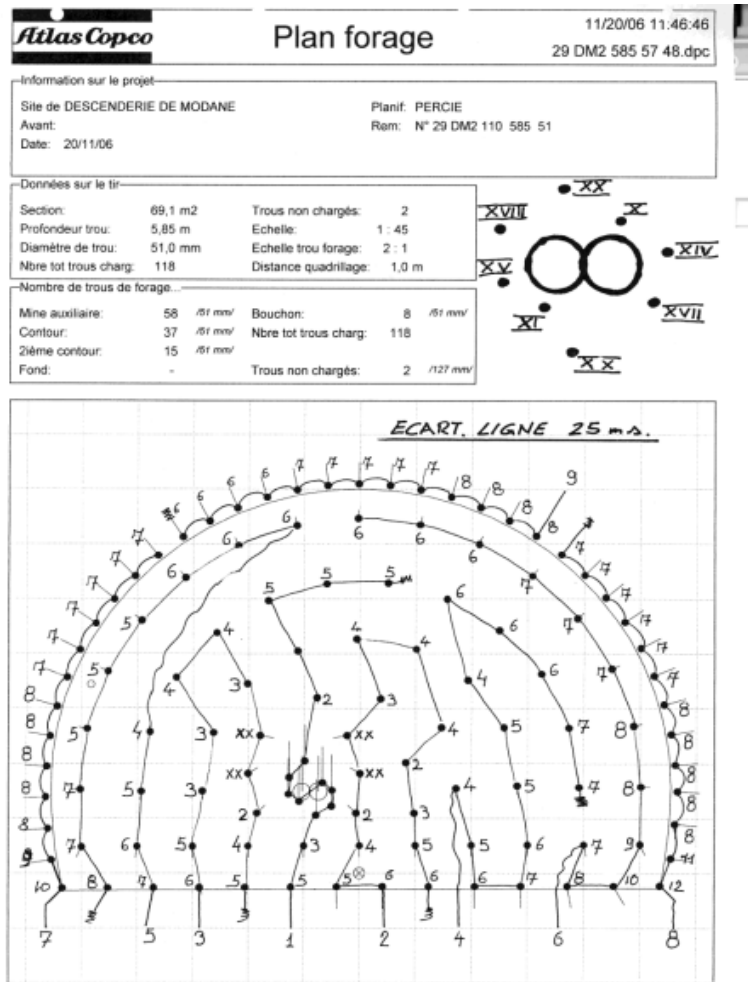


Figure (3.3) : Plan de tir

b. La foration

Après l'élaboration du plan de tir, on creuse les emplacements des charges



c. Le chargement de la volée

Le chargement de la volée désigne l'étape clé dans la méthode traditionnelle d'abattage à l'explosif pour les tunnels au rocher, où les trous de mine percés (constituant la volée) sont remplis d'explosifs après forage.



d. Le tir

Le tir ne se fait qu'après s'être assuré que tout le matériel et tout le personnel ont été évacués de la galerie.



e. La ventilation

Après chaque tir, d'importantes quantités de gaz ou de poussières toxiques créées par l'explosion s'amassent dans le tunnel. La ventilation permet d'évacuer tous ces gaz avant de reprendre les travaux. Elle se fait soit par ventilation soufflante, soit par ventilation aspirante ou par les deux à la fois. Le temps d'évacuation de ces gaz dépend du type des explosifs utilisés ainsi que de la nature de la roche.



f. La purge

Après la ventilation, une machine spéciale appelée « pince à purger » est utilisée pour faire tomber les blocs de roche non stable. Elle est suivie du boulonnage, opération qui consiste à solidifier la voute de la galerie fragilisée par le tir.



g. Le marinage

Le marinage consiste à l'évacuation de tous les déblais occasionnés par le tir. Il se fait à l'aide de pelles mécanisées et de camions de remorquage.



h. Le gunitage

Après avoir évacué les déblais, on projette du béton sur la voûte afin de la rendre plus solide et de permettre aux travaux de continuer en sécurité. La projection s'effectue soit par voie sèche soit par voie mouillée. Par voie sèche, le béton en poudre est pulvérisé simultanément avec de l'eau. Le béton se mouille avec l'eau et vient se compacter sur la surface rocheuse.



3.3.2. Méthode par attaque ponctuelle

La méthode par attaque ponctuelle est une technique utilisée pour l'excavation dans les roches tendres telles que les craies, les marnes et les schistes altérés, où l'usage de l'explosif est inefficace. Cette méthode consiste à utiliser des machines à attaque ponctuelle, qui peuvent être une adaptation directe des haveuses à pic de l'industrie minière, des Brise-Roches Hydrauliques (BRH) ou simplement des pelles rétro de chantier. Ces machines sont montées sur un châssis automoteur à chenilles et sont équipées d'un bras mobile éventuellement télescopique, ainsi que d'une tête fraiseuse capable de balayer une surface de front plus ou moins importante autour de sa position moyenne. Lorsque le terrain s'y prête ($R_c < 80\text{MPa}$), le rendement de cette méthode est bien meilleur que l'explosif. Cependant, ce procédé de creusement présente des inconvénients tels que les bruits, les poussières et la chaleur dégagée, qui sont difficiles à combattre dans un milieu confiné.

$50\text{ MPa} < R_c < 80\text{MPa}$



Figure (3.4) : Machine à attaque ponctuelle sur le tunnel de Tartaiguille

Les déblais sont évacués vers l'arrière.

La paroi est équipée à l'avancement d'un soutènement provisoire.

Cette technique est adaptée à tous les profils d'excavation.

3.3.3. Méthodes de creusement au tunnelier

Le creusement mécanisé des tunnels a connu des développements importants durant les vingt dernières années, en particulier grâce à l'apparition et aux évolutions technologiques des tunneliers. Ils ont permis d'élargir le domaine de réalisation des tunnels dans des conditions géologiques délicates, pour une grande gamme de diamètres et de terrains (sols meubles, roches tendres, argiles molles, terrains instables ou aquifères, etc.) en améliorant considérablement la productivité et la sécurité des chantiers.

Le tunnelier est une machine complexe qui assure en continu les fonctions suivantes :

- Excavation du terrain ;
- Stabilisation et soutènement du front de taille ;
- Soutènement provisoire des parois du tunnel juste derrière le creusement ;
- Évacuation des déblais ;
- Mise en place du soutènement provisoire ou du revêtement définitif ;
- Guidage selon l'axe théorique prévu ; avancement automatique à l'aide de vérins.

Il permet de creuser des tunnels de diamètre compris entre 2 et 20 mètres. Il est particulièrement adapté pour le creusement de terrains meubles sur de grandes longueurs, du fait de son coût d'investissement important. Sa vitesse d'avancement est de l'ordre de 10 à 50 mètres par jour.

On distingue trois types de tunneliers, qui sont choisis en fonction de la nature du terrain à creuser.



Figure(3.5) :Exemple de tunnelier

a) Tunneliers avec machine d'attaque ponctuelle ou d'attaque globale (tunneliers à appui radial, aléseur).

Ils sont utilisés dans le cas de terrain de tenue suffisante ne nécessitant pas de soutènement immédiat.



b) Tunnelier à boucliers classiques (à front ouvert, boucliers mécanisés à appui radial, à appui longitudinal, à appui mixte) qui assurent simultanément les fonctions d'excavation et de soutènement latéral du terrain. Ils comportent une structure cylindrique rigide (jupe) qui progresse au fur et à mesure du creusement et assure la stabilité du tunnel. Ils sont utilisés pour le creusement des terrains meubles.



c) Tunneliers à confinement (ou à front pressurisé). Ces machines assurent simultanément un soutènement latéral et frontal du terrain (terrain meuble et aquifère). Elles sont utilisées dans les terrains alluvionnaires en présence d'eau. La partie avant du tunnelier (chambre d'abattage) peut être mise sous pression afin d'assurer la stabilité du front de taille. A l'intérieur de la chambre, une roue de coupe munie de dents au carbure de tungstène grignote le terrain. Les déblais sont évacués par marinage hydraulique à l'aide de conduite de marinage et de pompes. Selon le type de terrain, le confinement peut être assuré par de l'air comprimé, par pression de terre ou généralement par une boue bentonique (la boue est formulée en fonction de la granularité et de la perméabilité du terrain). Le soutènement de

l'excavation est exécuté à l'avancement par la mise en place de voussoirs préfabriqués en béton par le tunnelier. Le tunnelier avance en prenant appui sur les voussoirs venant d'être posés.



3.4. Procédé du Creusement :

L'excavation peut se faire suivant différents modes d'attaque, en fonction de la qualité du terrain rencontré :

- **Creusement en pleine section** : Cette méthode consiste à excaver la totalité de la section du tunnel en une seule fois. Elle est couramment utilisée pour la plupart des tunnels creusés dans des roches de bonne ou d'assez bonne tenue pour les explosifs, ou pour les tunnels creusés dans des sols meubles avec des boucliers.



Figure (3.6) : Creusement en pleine section

- Creusement par demi-section supérieure :

Elle consiste à excaver dans une première phase la demi- section supérieure du tunnel suivant sa forme définitive. La hauteur de cette excavation préliminaire peut aller jusqu'à 5 ou 6 mètres. Pour deuxième phase, et après achèvement de la demi-section supérieure on procède à l'excavation de la demi-section inférieure ; après chaque phase d'avancement une mise en place du soutènement est effectuée.



Figure (3.7) : Creusement en demi-section supérieure

- Creusement en sections divisées :

Cette méthode consiste en l'ouverture préalable d'une (ou plusieurs) galeries de petite section dont une partie du soutènement participe au soutènement de l'excavation totale à réaliser. Avec cette technique chaque phase des travaux comprend l'excavation des terrains en sections réduites. Par la même, la stabilité des sections creusées est plus facile à maîtriser avec la limitation de la décompression des sections sus-jacentes.



Figure (3.8) : Creusement par Section divisée.