وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis - Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie Civil

Polycopié

Infrastructures Souterraines

Notions de base et Introduction à la mécanique des roches

Préparé par :
- BOURDIM Sidi Mohammed El-Amine,

Maitre de Conférences classe A.

Octobre 2022.

Préambule

Ce polycopié s'adresse aux étudiants de niveau Licence en Travaux Publics, Il reprend les grandes lignes du cours d'Infrastructures Souterraines, et il est rédigé de manière à faciliter aux étudiants la compréhension des notions de base dans le domaine de travaux en souterrains. Il a été écrit comme un petit livre, sous forme de quatre chapitres bien distincts et indépendants.

Ce cours a pour objet d'initier l'étudiant à se familiariser avec les règles de conception et de réalisation des tunnels routiers et autoroutiers, des tunnels ferroviaires et des parkings souterrains.

Bien sûr comme toute matière à enseigné, l'étudiant doit posséder des connaissances préalables recommandées en:

- Résistance de matériaux (RDM),
- Mécanique des sols (MDS),
- Béton armé (BA),
- Matériaux de construction (MDC).

Dans le premier chapitre, une introduction sur les travaux en souterrains et des définitions importantes des termes les plus courants en domaine des travaux en souterrains ont été donnés.

Le chapitre deux est consacré à une introduction à la mécanique des roches. Cette nouvelle sciences (dés les années 1960) devienne indispensable face aux différentes complications et problèmes rencontrées durant les travaux en souterrains dont les ouvrages souterrains sont souvent en interaction avec la roche que le sol.

Le troisième chapitre dresse les méthodes de réalisation des travaux en souterrains, il inclut des concepts de base que l'étudiant de licence doit les savoir.

Le quatrième et dernier chapitre illustre les technique et les différentes phases de la réalisation des galeries et des tunnels telle que la pose de soutènement, étanchéité et la pose de revêtement.

Une bibliographie sommaire est proposée à la fin de ce polycopié pour compléter et approfondir la compréhension.

Il faut retenir que la construction d'un tunnel fait appel à de multiples spécialités : la pluridisciplinarité est essentielle. Les interactions entre les conditions géologiques et les méthodes de construction sont un des enjeux fondamentaux des projets souterrains.

Pour toutes remarques, merci de me contacter sur mon émail :

sidimohammed.bourdim@univ-mosta.dz

Programme officiel d'enseignement

Cette matière est enseigné pour les étudiants de 3ème année licence travaux publics (Semestre_5) selon le programme donné dans le canevas de l'offre de formation de licence académique LMD à l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

Semestre: 5
Unité d'enseignement: UED 3.1
Matière 2:Infrastructures souterraines
VHS: 22h30 (Cours: 1h30)
Crédits: 1
Coefficient: 1

Objectifs de l'enseignement:

Ce cours a pour objet d'initier l'étudiant à se familiariser avec les règles de conception et de réalisation des tunnels routiers et autoroutiers, des tunnels ferroviaires et des parkings souterrains.

Connaissances préalables recommandées:

Résistance de matériaux, Mécanique des sols, Béton armé, Matériaux de construction.

Contenu de la matière:

Chapitre 1. Généralités sur les travaux en souterrain (2 Semaines)

Principales catégories de souterrains (tunnels routiers et autoroutiers, tunnels ferroviaires, parkings souterrains, ouvrages particuliers), Données naturelles et contraintes à respecter.

Chapitre 2. Notions de mécanique des roches (6 Semaines)

Définition, Discontinuité du massif rocheux, Propriétés mécaniques de la matrice rocheuse, Modélisation du massif rocheux, Méthodes de calcul des ouvrages au rocher (stabilité des versants rocheux, calcul des fondations au rocher, calcul des ouvrages souterrains).

Chapitre 3. Méthodes de réalisation des ouvrages souterrains (5 Semaines)

Phasage classique de réalisation des tunnels par la méthode conventionnelle (explosifs, purge et marinage, pose du soutènement, pose de l'étanchéité, pose du revêtement), Les différents types de soutènement (la nouvelle méthode autrichienne NATM, cintrage, soutènement au front de taille), Les différents types de revêtement (béton coffré, voussoirs préfabriqués).

Chapitre 4. Gestion du patrimoine et mise en sécurité (2 Semaines)

Le rôle des inspections, L'entretien et la mise en sécurité des ouvrages.

Mode d'évaluation:

Examen: 100%.

Table des matières

Préambule **2**
Programme officiel d'enseignement **5**
Chapitre 01: Généralités sur les travaux en souterrain **8**
1. Les cavités naturelles 8
2. Les cavités artificielles 9
3. Description d'un tunnel: 11
4. Définitions 12
Chapitre 2: Introduction à la mécanique des roches **15**
1. Introduction 15
2. Naissance et applications de la MDR 15
3. Discontinuités du massif rocheux 16
3.1. Les diaclases : 16
3.2. Les failles : 16
3.3. Les joints sédimentaires : 16
3.4. La schistosité : 16
4. Description et représentation des discontinuités 16
5. Classification géomécanique de Bieniawski 18
6. Propriétés mécaniques d'une discontinuité 20
6.1. Essai de cisaillement sur discontinuité 20
6.2. Hydraulique des roches 21
6.3. Propriétés mécaniques de la matrice rocheuse 22
6.4. Comportement sous étreinte triaxiale 22
6.5. Critère de Mohr-Coulomb 23
6.6. Critère de Hoek et Brown 23
6.7. L'essai dilatométrique 23
6.8. Fluage et effets différés 24
Chapitre 3: *Méthodes de réalisation* **25**
1. Introduction 25
2. Facteurs géologiques principaux pour le choix des méthodes de creusement 26

3. Méthode de creusement 26
3.1. Méthode conventionnelle 27
3.2. Précautions particulières 33
3.3. Utilisation de tunneliers «Full face » 34
Chapitre 4: Pose de Soutènement, Etanchéité et Revêtement 38
1. Pose du soutènement 38
1.1. Les différents types de soutènement 38
2. Pose de l'étanchéité 41
3. Pose du revêtement 42
Références Bibliographiques: 44

Chapitre 01:
Généralités sur les travaux en souterrain

1. Les cavités naturelles

Bien avant l'homme, la nature a su creuser des souterrains et parfois avec des dimensions surprenantes (la salle du Sarawak sur l'île de Bornéo mesure 600 m sur 415 m et 80 m de haut... sans aucun soutènement !).

Les grottes, gouffres et autres cavités karstiques(issus d'une dissolution chimique et d'une érosion par le passage de l'eau)

En Algérie on connaît surtout :

Les grottes de Ain fezza à Tlemcen (Figure 1.1), de Aokas à Bejaia (Figure 1.2) et celle de Jijel (Figure 1.3). Aujourd'hui, elles font le bonheur des spéléologues, et le malheur des ingénieurs civils qui essaient par tous les moyens de les éviter. Ces vides se rencontrent uniquement dans les régions calcaires et gypseuses, exceptionnellement dans les régions volcaniques.

Il y a plus d'un siècle, on connaît assez bien ces zones à risques et la topographie des cavités est déjà bien entamée.

Figure 1.1. Grotte de Beni-add à Aïn Fezza, wilaya de Tlemcen

Figure 1.2. Grotte des pirates, Wilaya de Bejaia.

Figure 1.3. Grotte merveilleuses dans la commune de Ziama Mansouriah, Wilaya de Jijel.

2. Les cavités artificielles

L'activité souterraine française en montagne s'est complètement arrêtée. Le dernier en date, dans les Alpes, est le tunnel routier du Fréjus (12.87km), terminé en 1979.

Depuis, peu de grands projets ont abouti, sauf en 1996 le Somport (8.6km) qui relie la France à l'Espagne et en 2000 le tunnel d'Orelle sur l'autoroute A43 (3692m).

Mais les travaux souterrains ne se résument pas à la percée des grands ouvrages de montagne. On compte entre autre :

- Des ouvrages routiers de moyenne à forte importance ;

- Les tunnels ferroviaires (Figure 1.4);

- Des galeries hydrauliques (conduites forcées, tunnels canaux, un réseau d'égouts...) ;

– Des réseaux souterrains de transports en commun (le métro-RER de Paris est le plus grand réseau du monde avec 279 km cumulés, Figure 1.5) ;

- Des sites d'enfouissement de déchets radioactifs (Figure 1.6) ;

Figure 1.4. Le plus long tunnel ferroviaire du monde_ Tunnel de Saint-Gothard en Suisse

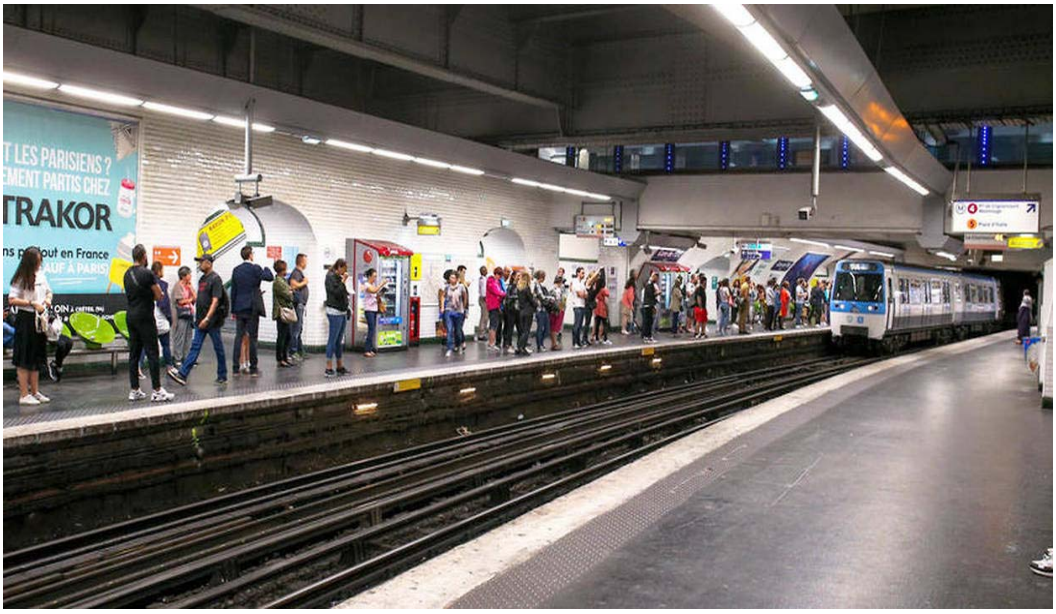

Figure 1.5. Métro RER de Paris

Figure 1.6. Site d'enfouissement des déchets nucléaire_ Site de Bure en France

3. Description d'un tunnel:

La figure 1.7 présente les termes couramment associés à l'excavation d'un puits ou d'un tunnel.

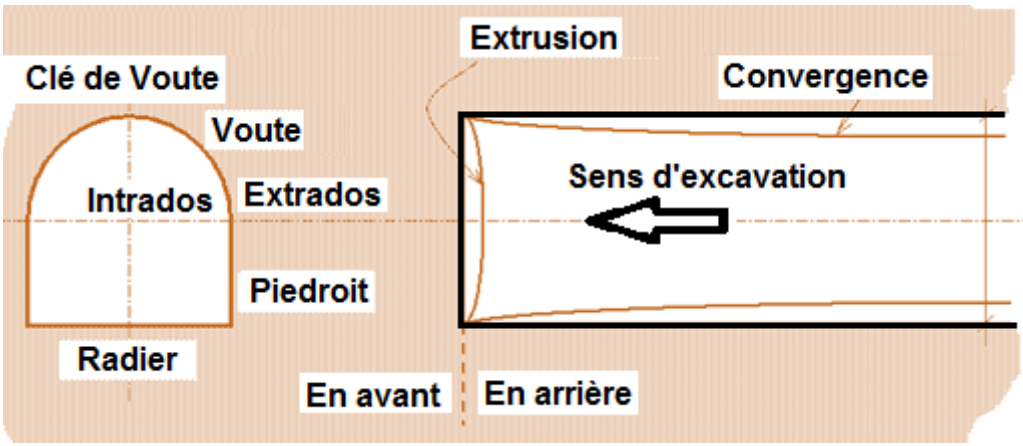

Figure 1.7. Coupe transversale et longitudinale d'une excavation

Suite au travaux d'excavation, le terrain naturel se déforme à deux endroits :

- Au front de taille : cette déformation est dite extrusion

- Au niveau de la parois : on parle de la convergence.

Le front de taille est une surface plane dont le contour forme le profil du tunnel. Dans la plupart des cas, on considère que les convergences sont stabilisées après 02 fois le diamètre en arrière du front.

4. Définitions

- **Auscultation :**

Instrumentation et mesure de grandeurs physiques permettant de comprendre et de maîtriser d'une part le comportement de l'ouvrage, d'autre part son incidence sur l'environnement (terrain, tunnel, ouvrages voisins).

- **Blindage :**

Enfilage de plaques métalliques ou de planches en bois entre les cintres de soutènement. Le blindage sert souvent de coffrage perdu lorsqu'il est accompagné d'un remplissage béton, il a également un rôle structurel de maintien.

- **Bouclier** :

C'est un système de protection et de soutènement d'un tunnelier constitué le plus souvent d'un tube métallique épais à peu près du diamètre de la section excavée.

- **Calotte** :

C'est la partie supérieure d'un tunnel dans une excavation par demi-sections (section supérieure).

- **Cintre** :

Des profilé métallique normalisé (HEA, HEB, IPE, IPN...) cintré selon la géométrie du tunnel et qui sert à soutenir le terrain.

- **Confinement :**

C'est application d'une pression sur les parois d'un tunnel, par le biais d'un soutènement principalement, dans le but de limiter les convergences et le déconfinement du terrain.

- **Déconfinement**:

C'est une réorganisation des contraintes autour du tunnel, de part et d'autre du front de taille. On dit que le terrain est entièrement déconfiné lorsqu'il a atteint son équilibre final.

- **Débourrage** :

C'est une venue d'eau et/ou de matériaux meubles violente et inattendue suite à l'excavation du front de taille.

- **Convergence :**

C'est un retrécissement diamétral d'une section de tunnel.

- **Décousu** :

C'est la zone de terrain proche du front de taille non soutenue.

- **Exhaure** :

Evacuation des eaux qui s'infiltrent naturellement dans le tunnel ou qui sont utilisées pour les besoins du chantier.

- **Front de taille** :

C'est la zone dont l'excavation se réalise, et c'est une fin provisoire du tunnel en creusement. Souvent le terme désigne la paroi verticale de terrain.

- **Fontis** :

C'est une cloche formée par l'effondrement des terrains de proche en proche verticalement. Dans le pire des cas les fontis peuvent se propager jusqu'en surface.

- **Injection** :

Un terme désignant les techniques de substitution et de comblement des vides dans les terrains par un coulis durcissant. Les injections ont deux utilités : augmenter la résistance et/ou étancher.

- **Marins** :

Déblais formés par l'excavation d'un pas d'avancement.

- **Marinage** :

Procédure d'évacuation des marins issus de l'excavation.

- **Plan de tir** :

Plan du front de taille où figurent les trous de forage, les différents retards et microretards de détonateurs, les lignes de tir pour les tirs séquentiels ainsi que les quantités d'explosifs utilisées.

- **Rameau** :

Galerie reliant deux ouvrages souterrains (synonyme: inter tubes).

- **Stross** :

Partie inférieure d'un tunnel dans une excavation par demi-sections.

- **Tunnelier** :

Machine pleine section destinée à réaliser des tunnels, pouvant aller du creusement à la pose du revêtement final. On parle aussi de **TBM** (Tunnel Boring Machine).

- **Pas d’avancement** :

C'est la longueur de terrain excavée en une seule phase.

- **Volée** :

Pas d’avancement d’un tunnel creusé à l’explosif. La volée correspond à la longueur de forage des trous pour les explosifs.

- **Voussoir** :

Coque de béton armé préfabriquée. Plusieurs voussoirs forment un anneau, et plusieurs anneaux forment le revêtement de certains tunnels.

Chapitre 2:
Introduction à la mécanique des roches

1. Introduction

Il convient tout d'abord de bien différencier ce que nous appellerons par roches et sols.

- ***Roches*** : Géomatériaux possédant une cohésion (C≠0) et une résistance à la compression simple supérieure à 10 MPa.
- ***Sols*** : Géomatériaux pulvérulents ou cohésifs mais ne présentant pas de résistance à la compression simple. La cohésion disparaît par dissolution.

La règle plus générale veut que l'on désigne par roches les terrains profonds et par sols les terrains de surface.

La rhéologie d'une roche est fortement liée à son degré de fracturation, ce qui n'est pas le cas d'un sol.

2. Naissance et applications de la MDR

Les premiers à avoir étudié et pratiqué la mécanique des roches, de façon empirique, sont les ingénieurs des mines confrontés à la stabilité des épontes rocheuses (les roches entourant une couche géologique considérée) de leur exploitation.

Une idée générale conduit à considérer que "construire sur le roc" est une garantie de sécurité.

La chute de blocs, les glissements de talus rocheux et l'importance de l'eau dans les fractures, ont poussé les ingénieurs à étudier plus le comportement du massif rocheux dans sa globalité.

La discipline est donc récente et trouve ses applications dans divers domaines de l'ingénierie et de la recherche :

Géologie : déformations tectoniques entraînant plissements, fissures et failles;

Physique du globe : comportement sous haute pression et température, séismes;

Mine : stabilité des excavations, des tailles, galeries et puits;

Pétrole : extraction des fluides en milieu poreux, stabilité des forages profonds;

Génie Civil : fondations des grands ouvrages (barrages, centrales électriques, viaducs), terrassements routiers, stabilité des talus et versants, travaux souterrains, concassage et travaux de carrière, utilisation comme matériau (enrochements, pierre de construction, granulats).

Un mécanicien des roches doit être géologue, ou au moins avoir des bonnes connaissances en géologie.

L'étude des discontinuités (localisation, propriétés mécaniques des joints, hydrologie) et la détermination des contraintes in situ sont deux exemples parmi tant d'autres illustrant la complémentarité des deux disciplines.

3. Discontinuités du massif rocheux

Tout massif rocheux possède des discontinuités qui peuvent être prononcées, invisibles, cimentées ou bien ouvertes.

Elles possèdent en commun les caractéristiques tel que: la faible résistance au cisaillement, résistance à la traction négligeable et grande conductivité hydraulique.

En géologie on les regroupe par catégories :

3.1. Les diaclases :

ce sont des fractures de la roche, issues d'une rupture par compression, traction ou cisaillement liée aux mouvements tectoniques ;

3.2. Les failles :

ce sont des fractures identiques aux diaclases mais qui ont entraîné un mouvement relatif des deux parties de la roche encaissante. Un glissement a donc eu lieu le long de cette faille. Leur longueur varie d'une dizaine de cm à plusieurs centaines de km;

3.3. Les joints sédimentaires :

dans les roches sédimentaires, ce sont les joints séparant deux couches d'époques -ou strates- et de conditions de dépôt différentes ;

3.4. La schistosité :

dans les roches métamorphiques (Roches issues de la transformation d'autres roches sous forte compression et/ou forte température. Ce sont les schistes, les marbres), la forte compression a perturbé et transformé l'organisation des minéraux internes.

Les discontinuités sont généralement des lieux de grande déformabilité, où la rupture est plus facile et l'eau circule plus facilement. Elles transforment l'état de contrainte du massif à leur proximité.

4. Description et représentation des discontinuités

Une discontinuité est plane, On définit ce plan par deux angles :

- La direction (azimut α de l'horizontale du plan) et le pendage (angle β entre l'horizontale et la droite de plus grande pente, en précisant le sens par rapport à la direction de l'horizontale).
- Azimut : angle de la projection horizontale du vecteur P avec le Nord en tournant vers l'Est. Il vaut α+ 90°;

- Pendage : angle β que fait le vecteur P avec le plan horizontal.

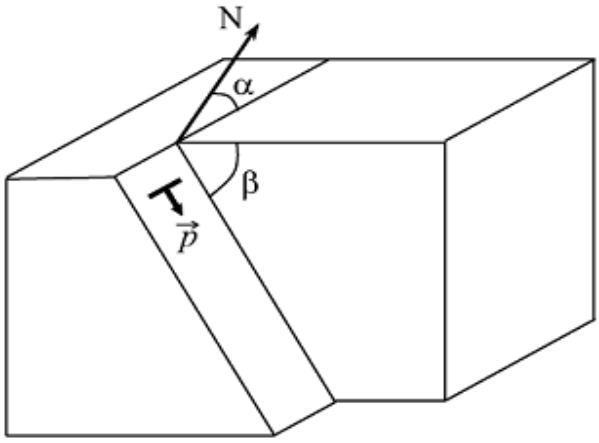

Figure 2.1. Orientation d'une discontinuité

Un plan répertorié 210/60 selon l'AFTES signifie donc : sa direction est de 120˚par rapport au Nord en tournant vers l'Est (210-90) et le pendage est de 60˚vers l'ouest.

Le même plan sera répertorié N120E-60W pour la notation géologique traditionnelle.

Une étude de mécanique des roches est donc indissociable d'une campagne de reconnaissances basée sur des sondages carottés ou des photos internes au forage.

Il est convenable de représenter la trace que feront les discontinuités sur les parois du tunnel.

L'observation des carottes permet de déterminer un paramètre empirique proposé par D.Deere en 1964, le Rock Quality Designation **RQD**

C'est un rapport en pourcentage entre la longueur cumulée des carottes supérieures à 10 cm et la longueur totale de carotte considérée (1m pour l'AFTES) :

$$RQD = \frac{\Sigma(L > 10cm)}{L_{totale}} \times 100 \qquad (2.1)$$

Un RQD de 80 à 100% signifie donc qu'on a une roche peu ou pas fracturée.

Attention, cet indicateur peut être trompeur : pour un même massif stratifié, on pourra avoir un RQD de 0% ou de 100% au même endroit selon l'inclinaison du forage !

Il est donc important de repérer la direction et l'inclinaison des forages, puis de corréler les résultats entre eux.

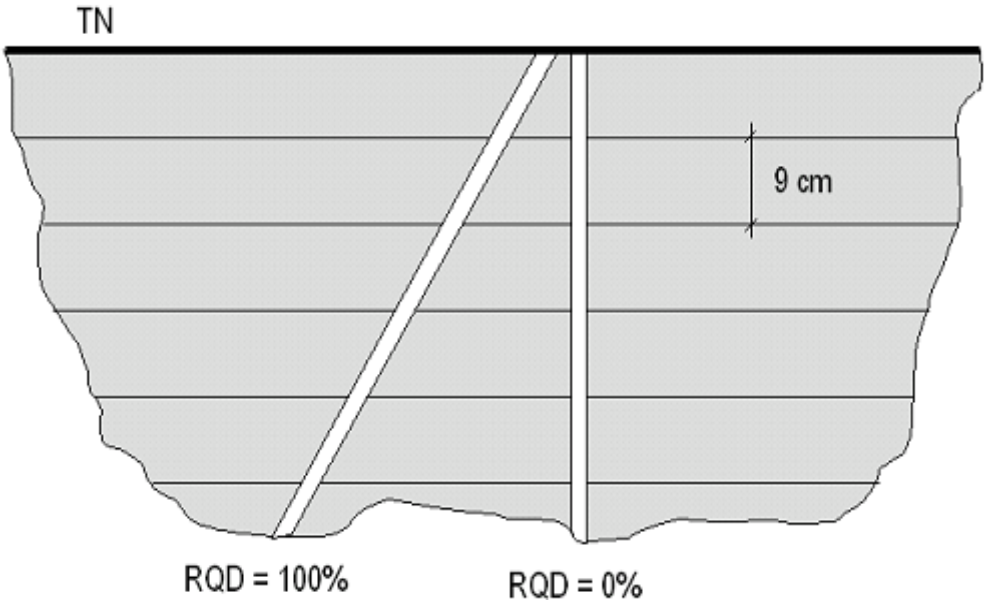

Figure 2.2. Représentation géologique illustrant les limites du RQD

Tableau 2.1. Classe de qualité du massif rocheux estimée selon RQD (d'après D.Deere)

Classes	**Valeurs RQD (%)**	**Qualité du massif rocheaux**
RQD 1	90~100	Excellente
RQD 2	75~90	Bonne
RQD 2	50~75	Moyenne
RQD 4	25~50	Mauvaise
RQD 5	0~25	Très mauvaise

D'autres indices existent, certes moins utilisés dans la pratique, mais donnant une meilleure indication du degré de fracturation.

On cite l'indice ID (Intervalle entre Discontinuités), *qui est défini comme la moyenne des intervalles découpés par les discontinuités successives le long d'une ligne de mesure dont il convient de préciser la longueur et l'orientation*.

Il est donc nécessaire de réaliser des mesures dans plusieurs directions à choisir intelligemment en fonction des discontinuités et de l'orientation de l'ouvrage.

5. Classification géomécanique de Bieniawski

La classification géomécanique de Bieniawski ou RMR est un système de classification géomécanique présenté par l'ingénieur Bieniawski en 1973 et modifié successivement en 1976, 1979, 1984 et 1989. Il permet de classer un massif rocheux 'in situ'.

Il est généralement utilisé dans la construction de tunnels, de pentes et de fondations.

Il est constitué d'un indice de qualité RMR (Rock Mass Rating, Évaluation de la masse rocheuse), indépendant de la structure et d'un facteur de correction.

Il est obtenu par l'estimation de cinq paramètres:

- Résistance des roches non altérées (compression uniaxiale)
- Le RQD
- Espacement entre les diaclases
- L'état des diaclases
- Conditions des eaux souterraines.

Le résultat de chacun des paramètres est attribué une valeur et tous sont ajoutés pour obtenir l'indice de qualité RMR sans corrections.

Cette valeur doit être soustraite d'un facteur d'ajustement en fonction de l'orientation des discontinuités.

La valeur est classée selon le tableau suivant:

Tableau 2.2. Classe de qualité du massif rocheux estimée selon RMR (d'après Bieniawski)

RMR	Description	Maintien moyen	Angle de friction interne
0 - 20	Très pauvre	10 min / 0,05 min	<30°
21 - 40	Pauvre	5 h / 15 min	30-35°
41 - 60	Régulier	1 semaine / 3 mois	35-40°
61 - 80	Bon	6 à 4 mois	40-45°
81 - 100	Très bon	> 5 mois	45°

Le facteur de correction, défini qualitativement, dépend de l'orientation des discontinuités et a des valeurs différentes s'appliquant aux tunnels , fondations ou pentes.

Cependant, la mesure de la masse rocheuse présente certains inconvénients lorsqu'elle est appliquée aux pentes rocheuses, car le paramètre qui prend en compte l'influence de l'orientation des discontinuités a été défini en détail pour les fondations de barrages et pour les tunnels, mais pas pour les pentes.

Pour résoudre cette difficulté, Romana défini la classification de masse de la pente qui adopte les valeurs de correction en orientant les discontinuités originales de Bieniawski et les définit de manière rigoureuse, en les décomposant en quatre facteurs différents de ceux qu'il a nommés F1, F2, F3. et F4.

Les trois premiers facteurs dépendent des relations géométriques entre la pente et les discontinuités, tandis que le quatrième facteur dépend de la méthode d'excavation.

L'indice RMR est obtenu en soustrayant le facteur d'ajustement des valeurs obtenues.

Cet indice peut varier entre 0 et 100 et définit cinq types de roches désignées par des chiffres romains qui correspondent à cinq qualités de la masse rocheuse: très bon, bon, moyen, mauvais et très mauvais.

Le principal avantage de cette méthode de classification est sa simplicité et son économie.

Corrélation

Le RMR est empiriquement corrélé au module de Young de la masse rocheuse (Em), pas à la roche intacte (Er):

Em = 2*RMR-100GPa pour RMR> 50

Em = 10(RMR-10) / 40 pour RMR <=50

Bien que ces corrélations existent, il convient de préciser qu'il ne s'agit que d'approximations des valeurs réelles présentées par la masse rocheuse.

6. Propriétés mécaniques d'une discontinuité

Une fois la répartition et la géométrie des discontinuités identifiées, il faut s'intéresser à leurs caractéristiques mécaniques.

On conçoit aisément qu'une faille lustrée dont les épontes (les deux parties du rocher qui entourent la faille) sont parfaitement lisses sera plus dangereuse du point de vue de la stabilité qu'une diaclase calcifiée et re-cimentée.

Pour être le plus complet possible, on étudiera :

- **L'ouverture** : largeur de la discontinuité (de quelques mm à plusieurs mètres) ;
- **La rugosité** : épontes irrégulières et accrochantes, ou enchaînement d'une éponte dans l'autre;
- **Le remplissage** : c'est le matériau comblant le vide dans l'ouverture. Il peut être solide et résistant ou bien être un vrai lubrifiant (argile humide).

Mais pour caractériser complètement le comportement d'une fracture de la roche, il faut réaliser des essais en labo.

Le plus courant et qui se rapproche le plus des sollicitations in situ est l'essai de cisaillement.

6.1. Essai de cisaillement sur discontinuité

On applique sur un échantillon représentatif -métrique ou décimétrique- un effort de cisaillement sous charge normale.

En cela il se rapproche de la boite de Casagrande, avec une discontinuité présente dès le début de l'essai.

La figure donne les résultats généraux d'un essai de cisaillement ainsi que le modèle couramment associé.

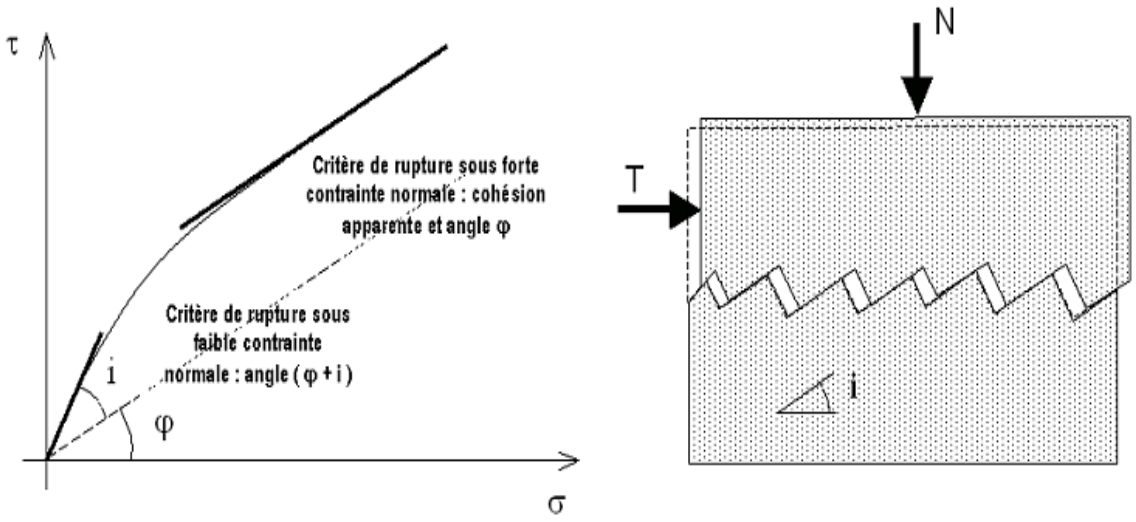

Figure 2.3. Plan de Mohr et modèle géométrique associé.

Deux phases peuvent être distinguées :

a)- Cas des contraintes normales faibles : il faut déplacer le frottement sur la surface de discontinuité. On remarque que le déplacement n'est pas uniquement transversal, il existe aussi une composante normale. Il s'agit de la dilatance. On approche le critère par la droite :

$$\tau = \sigma \quad tg\ (\varphi + i) \qquad (2.2)$$

i : est appelé l'angle de dilatance et φ l'angle de frottement intrinsèque pouvant varier de 20˚à 40˚selon le degré d'humidité et d'argilosité des épontes.

b)- Cas des contraintes normales fortes : la dilatance est empêchée et il faut cisailler les rugosités avant de pouvoir enregistrer un déplacement significatif. Le critère prend alors la forme d'une droite de Mohr-Coulomb :

$$\tau = c + \sigma \ tg\ (\varphi) \qquad (2.3)$$

Les discontinuités naturelles peuvent présenter deux types de cohésion « c »:

Cohésion réelle : due au remplissage argileux ou à des cimentations entre épontes;

Cohésion apparente : sous fortes contraintes, il faut briser les rugosités avant de mesurer un déplacement.

6.2. Hydraulique des roches

Un massif rocheux, au même titre qu'un sol, peut contenir une grande quantité d'eau sous forme de nappe phréatique.

La perméabilité des roches fréquemment rencontrées est très faible, d'ordre de 10−10 à 10−12m/s, exceptionnellement jusqu'à 10−5 m/s pour les roches très poreuses.

L'étude hydrogéologique se ramènera à l'étude de la perméabilité des fractures.

Si les discontinuités sont ouvertes et vides, et selon le régime d'écoulement, le coefficient de perméabilité *kf*:

$$k_f = \frac{\gamma e^2}{12\mu} \qquad (2.4)$$

Avec γ est le poids volumique et μ coefficient de viscosité du liquide, e l'épaisseur de la fracture.

6.3. Propriétés mécaniques de la matrice rocheuse

Les roches sont fondamentalement hétérogènes et est considérée comme un matériau plus ou moins poreux, constitué d'un assemblage de cristaux que l'on appelle minéraux.

En l'absence d'indications, on prend souvent γ=2500kg/m^3 pour estimer les contraintes in situ. De nombreux essais permettent de caractériser la matrice rocheuse.

La résistance à la compression simple, notée Rc, peut prendre des valeurs très différentes : de quelques MPa pour une roche très altérée à plus de 300 MPa pour certains basaltes ou quartzites.

Rc : n'est pas véritablement une propriété intrinsèque de la roche. L'effet d'échelle est très sensible.

De même cette résistance varie selon la taille de l'éprouvette et l'orientation de celle-ci par rapport à la direction de la compression (roche anisotrope).

6.4. Comportement sous étreinte triaxiale

Sous étreinte triaxiale (confinement), on peut observer :

- que la charge de rupture croit;
- le mode de rupture change.
- la rupture est ductile, plastique avec palier de résistance, et parfois non identifiable : la résistance croit progressivement sans pic.

Selon le type de roche, on observera un comportement à la rupture différent.

En tous les cas, on pourra approcher la rhéologie du matériau par la théorie de la plasticité.

Deux critères de rupture sont les plus utilisés en MDR pour des matériaux homogènes.

6.5. Critère de Mohr-Coulomb

C'est le même qu'en MDS. Il se représente dans le plan de Mohr par une droite d'équation :

$$\tau = c + \sigma \ tg\ (\varphi) \qquad (2.5)$$

Dans le plan des contraintes principales, il prend la forme :

$$\sigma_1 = K_p \ \sigma_3 + R_C \qquad (2.6)$$

Avec :

$$K_P = tg^2 (\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}) \qquad R_C = 2.C \frac{\cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \qquad (2.7)$$

6.6. Critère de Hoek et Brown

En 1980, Hoek et Brown, deux ingénieurs anglo-saxons, proposent un nouveau critère de plasticité. Il s'écrit de la manière suivante :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sqrt{m \sigma_3 R_C + s R_C^2} \qquad (2.8)$$

Avec :

– R_c : la résistance en compression simple de la roche saine;

– s : paramètre définissant le degré de fissuration (1 pour un échantillon intact et 0 pour un matériau complètement granulaire) ;

– m : paramètre lié à la nature de la roche (notion de cohésion, typiquement de 0.1 à 5).

Ce critère de rupture a été conçu pour pouvoir s'appliquer à l'échelle du massif (rôle du paramètre « s » qui prend en compte la fracturation aux échelles micro et macroscopique).

Le critère de Hoek et Brown modélise donc le massif rocheux dans sa globalité.

Même chose à l'essai pressiométrique pour les sols, l'essai dilatométrique permet d'accéder directement à la courbe de chargement de la paroi d'un forage dans un milieu rocheux.

Le principe est le suivant : on descend dans un forage, au bout d'un train de tige, la sonde dilatométrique qui permet d'appliquer au terrain une pression orthotrope sur une longueur d'environ 1m. Au milieu de la sonde sont disposés 3 capteurs de déplacement diamétral régulièrement espacés.

6.7. L'essai dilatométrique

En mesurant la pression de gonflement et le déplacement radial indépendamment, on obtient une courbe de chargement-déchargement.

- Les meilleurs dilatomètres peuvent aller jusqu'à 30 MPa de pression et descendre à plus de 1000m sous terre.

- Ils sont très utiles pour étudier le comportement du massif rocheux in-situ à l'échelle de la sonde (métrique).

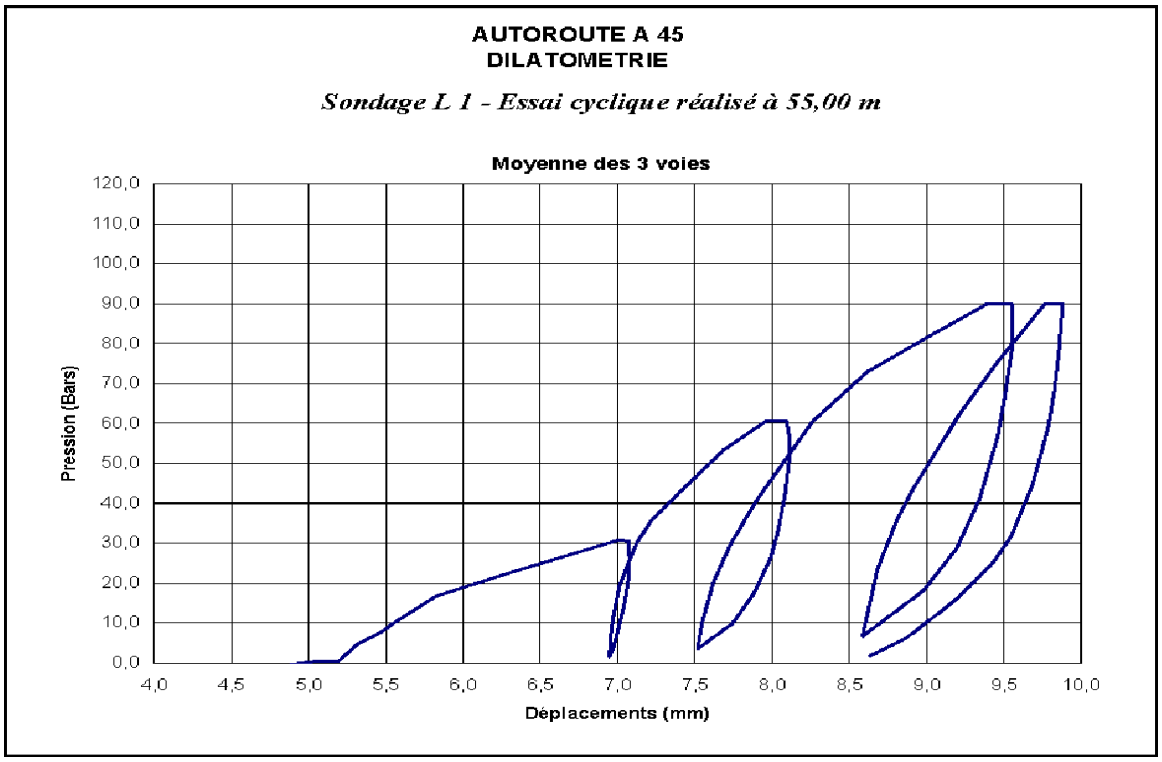

Figure 2.4. Essai cyclique

6.8. Fluage et effets différés

Avec de nombreuses roches tendres, on peut observer, sous charge maintenue constante, des ruptures à long terme. Ce sont les effets différés dus au phénomène de fluage.

Le fluage des roches est encore mal connu, L'enjeu est de taille pour les ouvrages souterrains où les calculs à long terme sont souvent dimensionnant.

En zones d'infiltrations, l'eau peut s'accumuler et on peut avoir une augmentation de pression de confinement. Il s'agit du gonflement, qui survient en présence d'argiles. Les dégâts occasionnés peuvent être spectaculaires si le dimensionnement n'a pas été suffisant (ruptures du radier).

Chapitre 3:
Méthodes de réalisation

1. Introduction

Lors de la construction des tunnels, l'objectif principal est bien entendu d'assurer la stabilité de l'ouvrage, à court terme et à long terme, pour le personnel et en même temps pour l'environnement. Pour tous les projets en milieu urbanisé ou d'une façon générale en environnement sensible, la maîtrise des déformations induites par le creusement est également un facteur clé, souvent dimensionnant vis-à-vis du choix des techniques.

La gamme des projets de tunnels et des conditions géologiques est extrêmement large, mais on peut citer au moins deux catégories principales:

- **Tunnels au rocher**

Y compris à grande profondeur, où l'on a affaire à un milieu naturel résistant par rapport aux niveaux de contraintes, mais découpé par les discontinuités du massif, c'est-à-dire à un milieu fortement discontinu. La stabilité générale du tunnel et des terrains environnants y est le plus souvent assurée, il n'y a pas rupture généralisée sauf éventuellement à très grande profondeur, et le principal enjeu est d'éviter les chutes de blocs rocheux, risque que l'on traite par boulonnage du rocher.
En revanche les failles y jouent un rôle majeur, d'autant plus délicat à traiter que l'on éprouve souvent de grandes difficultés à les localiser précisément à grande profondeur, à les qualifier mécaniquement, et à les traiter depuis la surface.

- **Tunnels en sols ou roches tendres**

Souvent relativement peu profonds, terrains que l'on peut traiter comme un milieu continu : la stabilité générale n'y est pas assurée naturellement, ce qui impose la mise en œuvre de soutènements (provisoires) et revêtements (définitifs) pour garantir cette stabilité et donc la sécurité.
En outre, le rôle majeur des déformations induites par le creusement va nécessiter des études détaillées pour évaluer ces déformations, vérifier si elles sont acceptables pour l'environnement, et développer des méthodes de construction permettant de les limiter à des niveaux acceptables.
Il convient de compléter ces sujets d'ordre géologique et géotechnique par le rôle de l'hydrogéologie : les eaux souterraines vont très largement influencer le comportement des terrains lors du creusement, à la fois par les débits qu'elles sont susceptibles de générer et par les pressions hydrauliques qu'elles induisent et qui vont modifier le comportement géomécanique des terrains. La perméabilité des terrains et les charges hydrauliques résultant du régime hydrogéologique sont à évaluer au mieux. Ces multiples problématiques doivent

guider le choix des informations géologiques, hydrogéologiques et géotechniques que l'on cherche à connaitre, et donc les reconnaissances qu'il y a lieu de faire.

2. Facteurs géologiques principaux pour le choix des méthodes de creusement

Les interrogations géologiques particulièrement déterminantes pour le choix des techniques de construction des tunnels sont les suivantes.

- **Dans quels types de terrains devra être creusé le 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).

- **Quelle est la variabilité géologique le long du projet ?**

Il s'agit bien sûr d'identifier les différentes natures de terrains et leur linéaire prévisible le long du projet, mais aussi de qualifier les zones de contacts entre les différents terrains : contact normal, contact par faille, zones de chevauchements tectoniques ….

- **Quel est le contexte hydrogéologique dans un environnement assez large autour du projet ?**

Il convient 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.

- **Quel est le contexte environnemental du projet ?**

Il s'agit de 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: bâtiments et leurs fondations, canalisations, infrastructures de surface ou souterraines… On peut également inclure sous ce thème environnemental 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 « diffusion » dans les terrains des produits polluants ou dangereux introduits du fait de la construction elle-même.

3. Méthode de creusement

Il existe plusieurs méthodes pour creuser un tunnel. On distingue deux grandes tendances :

- **Le creusement conventionnel (ou traditionnel) ;**

- **Le creusement au tunnelier.**

3.1. Méthode conventionnelle

3.1.1. Explosifs

a)- Attaque à l'explosif:

La technique de l'excavation à l'explosif est très ancienne mais reste encore, en nombreuses situations, la plus économique. La poudre noire (salpêtre + charbon + soufre) fut longtemps utilisée, avant que n'apparaissent des produits plus performants, tels la dynamite ou les émulsions , mais plus dangereux.

En souterrain on utilise des explosifs brisants (vitesse de détonation > 4000 m/s) dont l'effet sur la roche est double :

- L'énergie de choc véhiculée par une onde fissure le terrain ;

- L'énergie de gaz, engendrée par le dégagement d'un important volume de gaz à haute température et pression, ouvre ces fissures et disloque le matériau. Le "surplus" de cette énergie expulse les blocs disloqués.

Les explosifs actuels sont dits de sûreté car ils ne peuvent détoner sous l'action d'un simple choc ou d'une élévation de température. Ils détonnent sous l'action d'une onde de choc générée par l'un des quatre types de détonateurs :

- à mèche (non-utilisés en tunnels) ;
- électriques instantanés ou à retard (très utilisés en tunnel) ;
- non-électriques ;
- électroniques.

b)- Nuisances dues aux explosifs

Les nuisances causées par les tirs sont plus ou moins importantes : projections de blocs, bruits, vibrations, etc. Les vibrations transmises au terrain peuvent engendrer des désordres sur les habitations voisines, à plusieurs centaines de mètres du front de taille. Leur mesure, est réalisée par des capteurs -appelés géophones- scellés sur les murs porteurs de bâtiments et les reliefs naturels.

On déduit la vitesse et la fréquence des vibrations, dont les seuils sont fixés par le CCTP de l'ouvrage à construire (vitesses de 3 à 8 mm/s pour les monuments, 10 à 20 mm/s pour les habitations, etc...). Dans un terrain vierge et hétérogène, il est impossible de prédire le niveau de vibration sans tirs d'essais. On peut estimer ce niveau après calages grâce à la formule d'amortissement dite "Loi Chapot" :

$$V = K.\left(\frac{D}{Q_i^n}\right)^{-\propto} \qquad (3.1)$$

Où: V est la vitesse maximale estimée (mm/s), D la distance au front (m), n souvent pris à 0.5, Qi la charge unitaire d'explosif (kg), K et alpha sont deux paramètres en fonction du terrain et du type de tir.

La figure 3.1 représente un exemple d'un plan de tire pour l'explosif. Cependant la figure 3.2 montre l'évolution de matériel perforation de trou de forage.

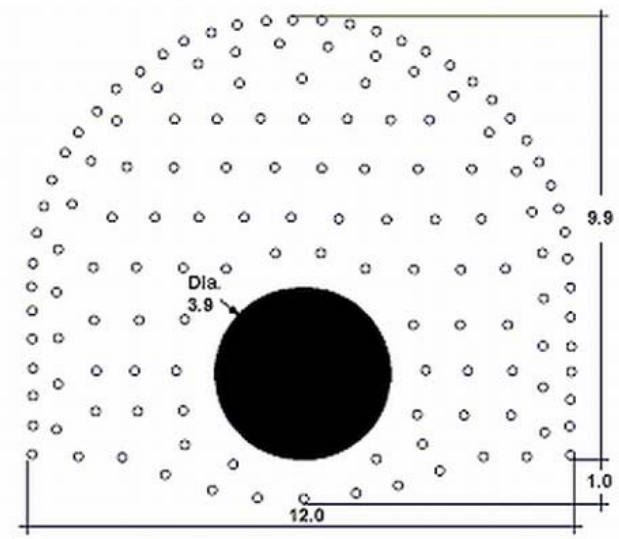

Figure 3.1. Exemple de plan de forge de tir pour l'explosif

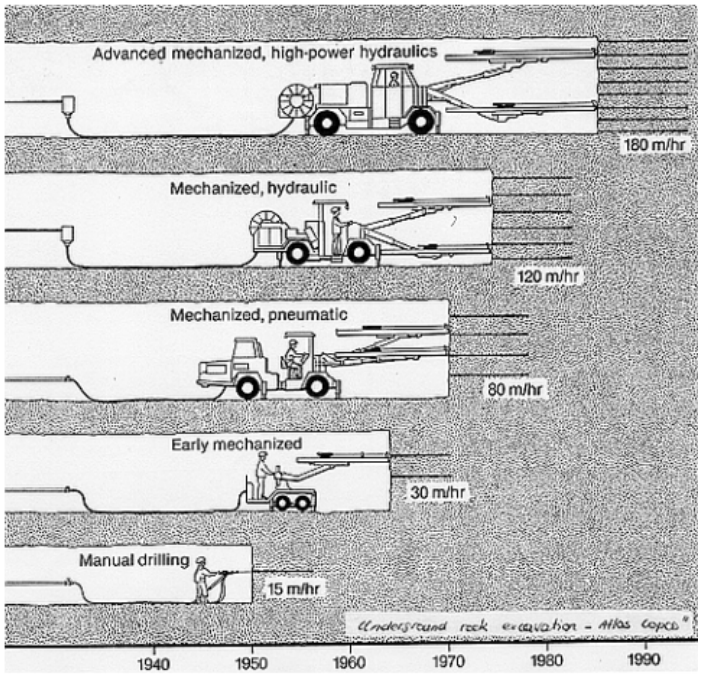

Figure 3.2. Evolution de matériel perforation de trou de forage pour l'explosif

3.1.2. Machines à attaque ponctuelle

Dans les roches tendres (craies, marnes, schistes altérés...), l'usage de l'explosif est efficacement remplacé par l'emploi de machines à attaque ponctuelle. Elles s'inspirent

directement du travail du mineur : un bras articulé vient "gratter" et abattre le terrain du front (Figure 3.3). Progressivement l'engin excave la section entière par un cheminement adapté. Ces machines mobiles peuvent être une adaptation directe des haveuses à pics de l'industrie minière, un Brise-Roche Hydraulique (BRH) ou bien simplement une pelle retro de chantier.

Lorsque le terrain s'y prête (Rc < 80MPa), le rendement de cette méthode est bien meilleur que l'explosif.

Ce procédé de creusement apporte toutefois son lot d'inconvénients : bruits, poussières et chaleur dégagée difficiles à combattre dans un milieu confiné.

Figure 3.3. Machine à attaque ponctuelle sur le tunnel de Tartaiguille

3.1.3. Jumbos

Le repérage et le forage des trous sur le front de taille est maintenant réalisé par des "Jumbos", qui est un engin automatisé dont le pilotage est assisté par ordinateur sur les gros chantiers permettant de forer plusieurs trou en même temps, Figure 3.4.

Les perforateurs doivent être portés par un bras télescopiques placés sur un véhicule porteur spécial que l'on appelle jumbo, dans le cas de marteaux ou perforatrices lourds et de chantier important. Les bras télescopiques sont mus hydrauliquement et permettent de placer la perforatrice dans toute position nécessitée par le forage des différents trous du plan de tir (emplacement et orientation) et de résister aux efforts et aux vibrations transmis (poids et poussées)

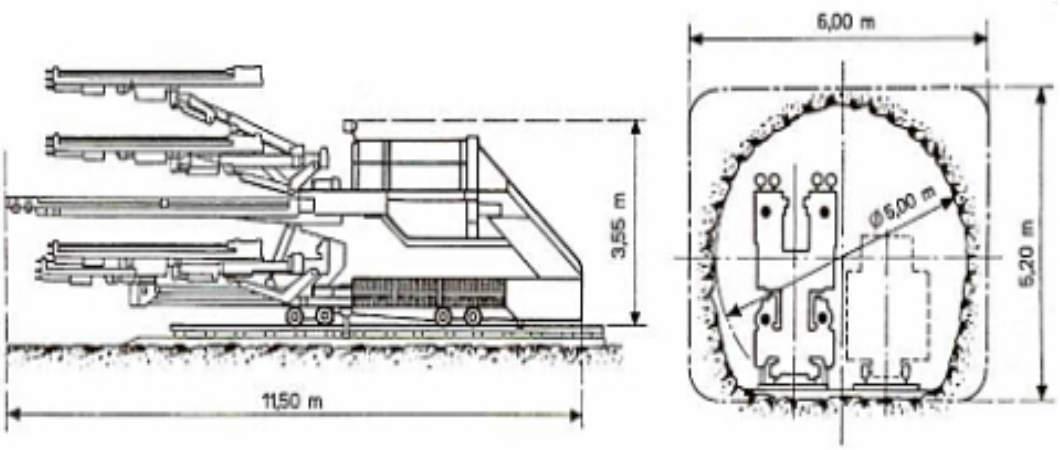

Figure 3.4. Type de jumbo compact à 4 bras

a) Jumbo classique

Les jumbos sont des châssis mobiles portant plusieurs bras (2 à 6) et pouvant se déplacer soit sur pneus, soit sur des chenilles, soit sur rails. Ils peuvent être compacts ou en forme de portique, Figure 3.5.

Figure 3.5. Jumbo classique.

b)- Jumbo robotisé

Les nouvelles générations des jumbos sont équipées d'automates qui assurent le positionnement précis des bras de perforation en coordonnées de départ en direction pour un strict respect du plan de tir. De même, le forage de chaque trou s'arrête de façon que tous les

fonds de trous soient situés dans un même plan. Ce matériel correspond à un progrès considérable du triple point de vue :

- de la précision du découpage ,
- de la planéité du front ,
- du raccourcissement de la durée du cycle de forage.

L'emploi des jumbos à trois bras robotisés (la première fois en 1992) pour le creusement du tube Sud de la Chamoise et le tunnel du Mont -Blanc a permis une augmentation considérable des vitesses d'avancement.

La conduite manuelle des jumbos a été améliorée par l'adoption d'une gestion informatisée de la perforation; en effet tout est réglé par ordinateur : gestion des bras, profondeur des trous, et vitesse de pénétration, Figure 3.6 et 3.7.

Figure 3.6. Jumbo au travail sur le tunnel des Pennes-Mirabeau (TGV Méditerranée).

Figure 3.7. Jumbo en action de perforation

3.1.4. Le forage intelligent

Le forage et devenu un poste critique en terme de sécurité et d'environnement ,a cause de l'importance de cette tache ils existe du matériel répondant aux norme en vigueur sur les pollutions sonores, atmosphérique et des sols.

A titre d'exemple les foreuses smartRig développées par Atlas Copoc (Figure 3.8) intègrent des équipements qui répondent à ce contexte exigeant :

- système HNS (Hole Navigation System) de navigation entre trous grâce à la technologie GPS,
- gestion et contrôle électronique des élément moteurs de la foreuse ,
- augmentation de la productivité et diminution de la consommation d'outillages par la souplesse de la régulation électronique du marteau perforateur ,
- limitation des émission sonores ,par caisson d'insonorisation, et atmosphérique par réduction de la consommation de carburant, ect..,

L'ensemble de ces informations étant compilée et analysées sous le même logiciel qui garantit un reporting précis et complet des forge.

Figure 3.8. Série SmartRig équipée du système HNS pour un forage haute précision, réduisant le niveau sonore de 10 dB

3.2. Précautions particulières

Doivent être faire vis-à-vis:

3.2.1. Vibration et effets sismiques de l'explosif :

Vibrations engendrées par les tirs et se propageant sous forme d'ébranlements vers les structures avoisinantes (une étude doit obligatoirement être effectuée par des spécialistes pour déterminer un seuil admissible, fonction de la qualité de l'ouvrage et du terrain encaissant).

Les vibrations produites par l'usage d'explosifs lors de la construction d'un tunnel sont susceptibles d'endommager celui-ci ou, plus souvent, la structure rocheuse dans le voisinage de celui-ci. En effet, une partie de l'énergie explosive utilisée pour fragmenter et abattre la matrice rocheuse se propage et se dissipe dans l'environnement du tunnel sous forme d'ondes vibratoires qui s'amortissent avec la distance. C'est pourquoi, afin d'évaluer ce phénomène et son incidence sur la réalisation des travaux, il est procédé à une étude préalable des vibrations et, si besoin est, des procédures de contrôles sont préconisées. Les risques étant directement liés à la proximité, l'expérience montre qu'il convient de faire un inventaire dans une bande minimale de 200m autour de l'axe du projet. Au-delà de cette distance, les amplitudes des vibrations sont généralement très faibles mais dans un contexte géologique particulier (horizon de marnes faisant office de réflecteur par exemple) des oscillations peuvent être ressenties beaucoup plus loin (1 à 2 km).

Solution :

- Faire l'inventaire des structures sensibles aux vibrations situées au voisinage de l'ouvrage à réaliser,

- Définir pour chacune des structures des seuils admissibles qui feront l'objet de clauses contractuelles,

- Etablir pour le site des travaux une loi d'amortissement des vibrations engendrées par l'explosif,

- Estimer les charges maximales d'explosif à mettre en œuvre de manière à préconiser les méthodes de terrassement adaptées et à appréhender leur incidence sur les coûts et les délais,

- Estimer les charges maximales d'explosif à mettre en œuvre de manière à préconiser les méthodes de terrassement adaptées et à appréhender leur incidence sur les coûts et les délais.

3.2.2. Les effets parasites de l'explosif :

Création d'hors-profils d'excavation et/ou d'une zone de massif fortement perturbée au pourtour de l'excavation. Pour y remédier, il faut faire appel à du matériel perfectionné de perforation (asservissement des bras du jumbo, traçage automatique, projection du plan de tir), ainsi qu'à des techniques particulières de tir de découpage soigné.

3.3. Utilisation de tunneliers «Full face »

Un tunnelier, Tunnel Boring Machines T.B.M, est un engin permettant d'automatiser le forage des tunnels, Figure 3.9~3.12. Chaque tunnelier est adapté à l'ouvrage qu'il doit réaliser. Un tunnelier assure plusieurs fonctions simultanément.

Figure 3.9. Exemple d'une machine TBM (Tunnelier)

Figure 3.10. Vue en longueur d'un tunnelier

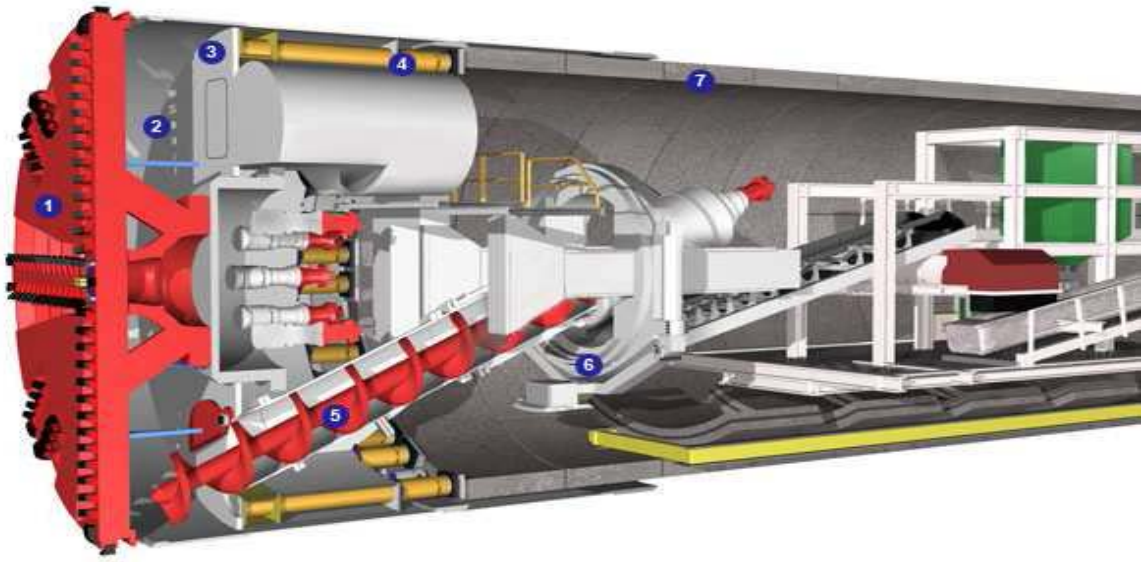

Figure 3.11 . Section transversale de la machine TBM.

Récemment, plusieurs grands tunneliers ont été en service, on cite les plus gros tunneliers au monde dont leurs diamètres dépassent les 15m (Top Six):

(6) - Tunnelier de Caucasus: Caractérisé par un diamètre de 15.08m et 182m de longueur, fabriqué en Chine par la société China Railway Tunnel Group. Il a une poussée maximale de 22 000 tonnes. En 2019, un tunnel de 9 km de long dans les hautes terres de Géorgie a commencé à être construit. Ce tunnel pénètre dans les montagnes du Caucase et se connecte à

une route importante reliant plusieurs nations. Ce projet fait partie d'un vaste réseau de liaisons maritimes et ferroviaires entre la Chine et l'Europe.

(5) - Tunnelier TBM S-317: Caractérisé par un diamètre de 15.4m et 135m de longueur, fabriqué en Allemagne. Le tunnelier est conçu pour supporter des pressions d'eau élevées et extraire une combinaison de sable, d'argile, de roches et d'eau souterraine. Cette machine a été utilisée en 2006 en Chine pour construire un tunnel de 7,4 km de long sous le fleuve Yangtze à Shanghai, à 65 mètres sous le lit du fleuve.

(4) - Tunnelier Martina: Caractérisé par un diamètre de 15.6m et 130m de longueur, fabriqué en Allemagne par le fabricant **Herrenknecht**, est utilisé pour creuser le tunnel routier Sparvo à double tubes de 2,4 km chacun situé entre Bologne et Florence (Italie). Le creusement est achevé le 29 juillet 2013.

(3) - Tunnelier Santa Lucia: Caractérisé par un diamètre de 15.8m et 130m de longueur, fabriqué en Allemagne par le fabricant Herrenknecht. Il a parcouru 7,5 km à travers la chaîne des Apennins, entre Barberino di Mugello et Florence nord (Italie), dans un terrain géologique complexe composé de calcaire, de marne, de schiste, de grès et surtout constellé de poches de gaz de méthane,

(2) - Tunnelier de Bertha: Caractérisé par un diamètre de 17.5m et 99m de longueur, fabriqué au Japon par la société Hitachi Zosen Sakai Works à Osaka. Construit spécifiquement pour le projet de tunnel de remplacement du viaduc d'Alaskan Way du département des transports de l'État de Washington (WSDOT) à Seattle, Washington, États-Unis. L'assemblage de la machine a été achevé à Seattle en juin 2013. Le forage du tunnel a commencé le 30 juillet 2013, la machine étant initialement prévue pour terminer le tunnel en décembre 2015.

(1) - Tunnelier de Tuen Mun : Il s'agit du plus grand tunnelier au monde en terme de diamètre, c'est un record mondial avec 17,6 m. La longueur est de 120m, Figure 3.12. Ce tunnelier fabriqué en Allemagne a été utilisé pour construire deux tunnels sous-marins de 5km de long dans la région de Hong Kong. La construction a commencé en 2015 et le tunnelier avait une performance de plus de 30m par jour. Les tunnels sont à 60m sous le niveau de la mer. L'ouverture à la circulation automobile était prévue en 2020.

Figure 3.12. Tunnelier de Tuen Mun, la plus grande machine TBM au monde avec un diamètre 17.6m.

Chapitre 4:
Pose de Soutènement, Etanchéité et Revêtement

1. Pose du soutènement

En attendant le revêtement, il est de plus en plus prévu pour participer à la reprise des efforts du terrain à long terme.

Parfois il peut même rester le seul chemisage du tunnel après son achèvement lorsque la configuration hydro-géologique le permet.

Il a un rôle de protection et de sécurité pour le personnel travaillant sous terre (chutes de petits blocs), de supportage pour assurer la stabilité des gros blocs et de confinement pour limiter la convergence du terrain.

Il sert aussi de carapace (blindage) protectrice vis-à-vis de l'altération des terrains en paroi.

L'espace non-soutenu durant le travail au front s'appelle le décousu.

Selon la qualité du terrain, le décousu peu aller de quelques décimètres à plusieurs mètres.

1.1. Les différents types de soutènement

1.1.1. La Nouvelle Méthode Autrichienne

Appelé **NMA ou NATM, a**pparue dans les années 60, la technique de soutènement combinant boulons et béton projeté s'est imposée sur presque tous les chantiers de tunnels, tant que son efficacité est grande, Figure 4.1.

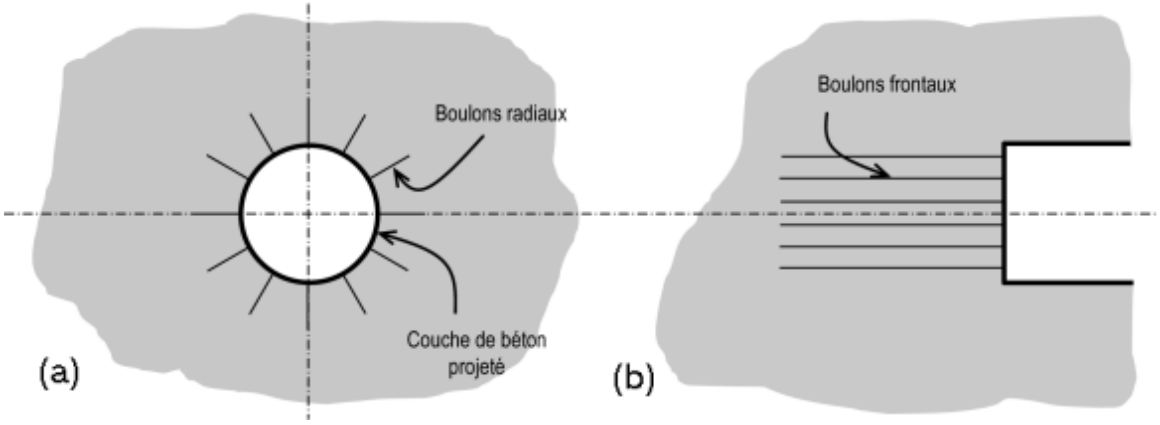

Figure 4.1. Application de la New Austrian Tunnelling Method (NATM)
Boulonnage du front

Attention !! le béton projeté appliqué en paroi peut donner une fausse impression de sécurité. Lorsqu'il n'est pas assez épais au regard du poids des blocs qu'il doit retenir ou tout simplement lorsqu'il est encore frais, il peut se détacher et entrainer avec lui une petite partie du terrain. Ce risque de chute n'est pas à négliger

1-1-2- Cintres réticulés

Pour les mauvais terrains, il peut s'avérer nécessaire de renforcer le béton projeté-boulonné par des armatures plus résistantes qu'un simple treillis soudé. Le cas des cintres constitués de 3 profils HA reliés entre eux par des aciers de plus faible section et facilement cintrables à la forme de l'excavation. Un fois placés contre le terrain, ces cintres réticulés avec ou sans treillis soudé sont recouverts de béton projeté pour former une coque solidaire.

L'espacement entre les cintres est de l'ordre du mètre, pour qu'il se crée une voûte de béton entre deux éléments (voûtains de béton).

Dans le cas de réparations d'ouvrages, les cintres réticulés peuvent avantageusement servir à supporter une étanchéité avant projection de béton.

1-1-3- Cintres lourds et blindage

Pour les terrains poussant, de mauvaise qualité, On choisit des techniques de soutènements lourds plus rigides, qui se déforment moins et qui doivent par conséquent reprendre plus de charges. Ces soutènements sont toujours constitués de profils normalisés cintrés suivant le rayon de courbure du tunnel.

Ces cintres sont assemblés près du front puis placés contre la paroi au moyen d'un érecteur (pelle équipée spécialement pour cet usage).

Entre chaque élément métallique, il se crée une voûte de terrain qui suffit dans de nombreux cas à reporter les charges sur ceux-ci (Figure 4.2).

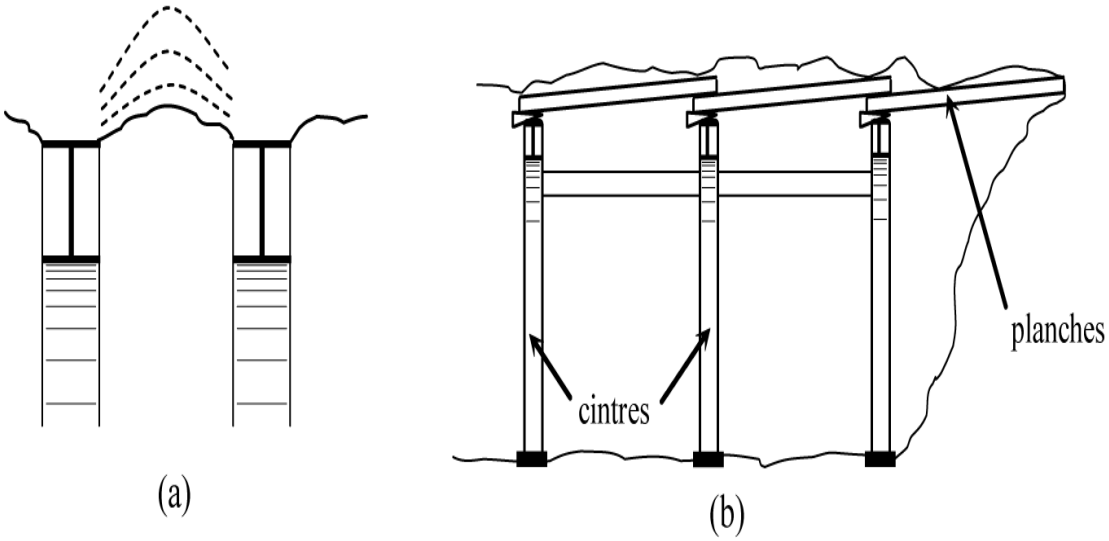

Figure 4.2. a) Voûtain de terrain entre deux cintres, b) Technique de l'enfilage

On réalise parfois un blindage ou un remplissage béton entre les cintres pour trois raisons principales :

- pour éviter que le terrain ne s'éboule sous le voutain naturel (rôle protecteur) ;
- pour répartir les charges sur les éléments porteurs lorsque le terrain ne permet pas d'avoir un effet de voûte suffisant (blindage lourd) ;
- pour éviter effet le cas d'effondrement au front de taille (rôle d'écartement et de maintien).

1-1-4- Cintres coulissants:

Lorsque les efforts sont trop importants dans des terrains de faible tenue on a recours à une technologie de cintres métalliques. Plutôt que de réaliser un cintre constitué d'un assemblage encastré et rigide de plusieurs morceaux de cintre, il est possible d'assembler entre eux plusieurs éléments qui coulissent les uns dans les autres.

Lorsque les efforts de chargement dépassent un certain seuil, on doit éviter la plastification de l'ensemble.

Pour augmenter l'efficacité de ce principe et faciliter le coulissement, ces cintres ont un profil spécial en forme de "U". On les appelle cintres TH du nom du premier fabricant qui a commercialisé ces profilés (Toussaint-Heitzmann), Figure 4.3.

Figure 4.3. Cintres TH, boulons radiaux et béton projeté. Détail de la voûte d'une galerie du laboratoire souterrain de l'Andra.

1-1-5- Soutènement au front de taille :

La maîtrise des convergences en parements par les différents soutènements présentés peut suffire à assurer la stabilité du front de taille et la sécurité des ouvriers. Une simple couche de béton projeté suffit habituellement à maintenir les blocs qui pourraient se décrocher accidentellement du front.

Dans les mauvais terrains cependant, une extrusion trop importante peut entraîner un effondrement localisé ou, plus grave, un fontis. Il convient dans ce cas de prévoir, selon l'état du terrain :

Un soutènement du front de taille, le plus souvent assuré par un boulonnage longitudinal. Un pré-soutènement consistant à limiter le déconfinement en avant du front de taille. La voûte parapluie fait partie de cette catégorie. Elle est constituée d'une série de tubes métalliques (Ø 30 à 90 mm) placés en auréole tout autour du front de taille et reposants sur les derniers cintres.

On excave ainsi sous une voûte protectrice assurant un report des charges sur les cintres que l'on place à mesure de l'avancement de l'excavation.

On peut également rencontrer la technique de la pré-voûte, où une coque de béton est projetée dans une saignée en avant du front sur tout le profil du tunnel (découpage puis bétonnage).

2. Pose de l'étanchéité

En général, entre le soutènement et le revêtement définitif en voûte, on place un film synthétique en PVC qui assure l'étanchéité partielle de l'ouvrage (étanchéité à l'extrados du revêtement).

Il convient donc de prévoir un réseau de drains et d'assainissement en piédroits pour l'évacuation des eaux d'infiltration collectées par cette membrane protectrice, Figure 4.4.

Dans certains cas, afin de ne pas perturber le réseau hydrologique local, une étanchéité totale - voûte et radier- est requise.

Dans ce cas le tunnel devient un véritable sous-marin et le revêtement doit être capable de supporter des pressions hydrostatiques élevées.

Figure 4.4. Couche d'étanchéité sur la parois de tunnel

3. Pose du revêtement

Après stabilisation des convergences, loin du front pour ne pas perturber le chantier et parfois même à la fin du creusement, on vient poser le revêtement définitif du tunnel, Figure 4.5.

Il a une fonction de résistance, car il doit reprendre les efforts à long terme (fluage, gonflement ou pression hydrostatique) et ceux dus à la perte éventuelle de résistance du soutènement (rouille, vieillissement,...).

Il a également une fonction de protection de l'étanchéité, de support des structures internes (panneaux, ventilateurs...) et enfin esthétique puisque c'est lui que les futurs usagers verront leur passage.

Figure 4.5. Revêtement définitif du tunnel

Références Bibliographiques:

1. A. Bouvard-Lecoanet, G. Colombet, F. Esteulle. « Ouvrages souterrains : Conception, réalisation, entretien ». Presses des Ponts, France, 1992.
2. B. Brady, E. Brown. « Rock Mechanics for underground mining ». Springer, 2004.
3. CFMR. « Manuel de mécanique des roches : Fondements ». Presses de l'ENSMP, Paris, 2000.
4. CFMR. « Manuel de mécanique des roches : Les applications ». Presses de l'ENSMP, 2004.
5. J.-L. Durville, H. Héraud. « Description des roches et des massifs rocheux (c352 »). Techniques de l'ingénieur, traité de construction, 1995.
6. M. Panet. « Le calcul des tunnels par la méthode convergence – confinement », Presses des Ponts, France, 1995.
7. Z. -T. Bieniawski. « Engineering Rock Mass Classifications ». Wiley, 1989.
8. K. Szechy. « Traité de construction des tunnels ». Dunod, 1970.
9. Site web:

https://fr.constructionreviewonline.com/

https://static.lpnt.fr/images/2019/

https://www.geo.fr/environnement/

https://www.bouygues-tp.com/fr/projets/tunnel-du-groene-hart

https://autojournalism.com/biggest-tunnel-boring-machines-in-the-world/