



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Abderrahmane Mira de Bejaïa**

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

*Polycopié de Cours*

---

**Creusement des Ouvrages  
Souterrains**

---

*Cours et exercices destinés aux étudiants de troisième année  
Licence en Génie Minier, (option : Exploitation des Mines)*

Réalisé par

*Dr.* SAADOUN Abderrazak

Maitre de conférences Classe B au Département des Mines et  
Géologie, Faculté de Technologie, Université Abderrahmane Mira de  
Bejaïa.

**Année Universitaire 2022 – 2023**

# TABLE DES MATIÈRES

Préambule.....	1
<b>Chapitre I. Introduction aux techniques de creusements souterraines.</b>	
Introduction .....	3
1. Historique de creusement des excavations.....	3
I.1. Conditions techniques et minières des gisements minéraux.....	6
1.2. Forme et dimensions des gisements.....	6
1.3. Puissance d'un gisement.....	6
1.4. Pendage d'un gisement.....	7
I.5. La forme des corps minéralisé.....	8
2. Choix d'une technologie d'extraction.....	8
3. Construction des excavations minières.....	9
3.1. Généralité.....	9
3.2. Parties d'une galerie.....	11
3.3. Excavations minières souterraines.....	11
4. Importance des ouvrages souterrains .....	14
4.1. Utilisations de l'espace souterrain .....	16
5. Classification des ouvrages souterrains.....	16
5.1. Creusement et construction des ouvrages souterrains.....	17
5.2. Techniques de construction des ouvrages souterrains.....	18
5.3. Les différentes méthodes d'exécution des ouvrages souterrains .....	18
6. Construction des tunnels.....	19
6.1. Facteurs géologiques principaux pour le choix des méthodes de creusement.....	20
Conclusion.....	21
<b>Chapitre II. Comportement des terrains autour d'une excavation minière souterraine</b>	
Introduction .....	22
1. Influence des travaux miniers sur le déplacement des roches, et l'état de surface:.....	22
1.1. Mécanisme et phénomène d'affaissement.....	24
1.2. Conséquence des affaissements miniers sur l'environnement.....	24
1.3. Effondrement.....	26

1.4 .Affaissement dus aux exploitations par foudroyage.....	27
1.5 .Affaissement dus aux exploitations par remblayage.....	28
2. Comportement des terrains et stabilité des excavations minières souterraines.....	31
2.1. Premier cas de stabilité.....	32
2.2. Deuxième cas de stabilité. ....	32
2.3 .Troisième cas de stabilité. ....	33
2.4. Quatrième cas de stabilité. ....	33
3. Profondeur limite pour le toit de l'excavation:.....	34
4. Profondeur limite pour Les parois de l'excavation:.....	34
5. Largeur limite de l'excavation.....	35
6. Mécanismes de déformation de tunnels.....	36
6.1. Déformation due aux forces horizontales asymétriques.....	36
6.2. Déformation due au manque de pression passive horizontale.....	37
6.3. Déformation due aux pressions horizontales (latérales) et verticales excessives.....	37
7. Rôle de l'eau dans les phénomènes d'instabilité.....	38
Conclusion.....	39

### **Chapitre III. Creusements des excavations horizontales et inclinés**

Introduction.....	44
1. Evaluation des ouvrages souterrains dans les phases de réalisation.....	44
2. Principaux étapes de l'exploitation minière souterraine.....	45
2.1. Reconnaissances essentielle dans le creusement des ouvrages souterrains.....	46
2.2. Facteurs de choix du tracé et du profil de creusement de l'ouvrage.....	46
3. Classification des massifs rocheux et pré-dimensionnement des ouvrages souterrains.....	49
3.1. La méthode de Terzaghi.....	50
3.2. Méthode de M. PROTODIAKONOV.....	52
3.3. Méthode de l'aire tributaire.....	54
3.4. Le Q system. ....	59
3.5. Recommandations de l'AFTES. ....	60
Conclusion.....	63

## Chapitre IV. Creusements et soutènement des excavations horizontales et inclinés

Introduction.....	67
1. Classification des modes de soutènement.....	67
2. Soutènement en bois.....	69
3. Soutènement par boulon. ....	70
3.1 .Boulons à ancrage ponctuel.....	72
3.2 .Boulons à ancrage réparti.....	73
3.3. Boulons mixtes.....	74
4. Soutènement par cintres. ....	75
4.1. Cintre réticulé.....	75
4.2. Cintres lourds et blindage.....	76
4.3. Cintres coulissants.....	76
4.4. Soutènement par voûte parapluie (les tubes perforés) .....	77
4.5. Soutènement par les treillis soudés.....	78
5. Soutènement Béton projeté.....	78
6. Choix du type de soutènement selon Classification de Bieniawski.....	79
7. Revêtement et étanchéité.....	81
7.1. Bétonnage de la voûte.....	81
Conclusion.....	81

## Chapitre V. Creusements des fouilles

Introduction.....	82
1. Paramètres des fouilles et mode de creusement.....	82
1.1. Creusement dans des terrains instables.....	84
2. Les tranchées couvertes. ....	85
2.1. Fouille talutée ouverte.....	85
2.2. Fouille blindée ouverte.....	86
2.3. Fouille blindée couverte.....	88
3. Méthodes de creusement des ouvrages souterrains.....	88
3.1. Abattage à l'explosif.....	88
3.2. Abattage mécanique.....	91
3.3. Méthodes d'excavation de la section d'un ouvrage souterrain.....	92
3.4. Excavation à pleine section et demi-section.....	93

3.5. Excavation par section divisée.....	94
4. Choix de la forme et dimensions des sections transversales des ouvrages minières .....	96
5. Forme trapézoïdale.....	97
Conclusion.....	100
Références bibliographiques.....	103

SAADOUN Abderrazak

## *Préambule*

Ce document est un polycopié de cours de la matière «Creusement des Ouvrages Souterrains» destiné aux étudiants de troisième année Licence en Génie Minier (option : Exploitation des Mines) du département des Mines et Géologie, Faculté de Technologie à l'université Abderrahmane mira de Béjaia.

Ce document est une synthèse tirée de différents ouvrages en relation avec le thème. L'objectif général de l'enseignement de cette matière est de compléter les connaissances préalables. Il présente, des définitions et des rappels sur le creusement des Ouvrages Souterrains, les techniques utilisé et la sécurité des ouvrages par l'utilisation des différents types de soutènement. Les études de conception d'un projet de construction souterrain on doit toujours considérer comme un préalable indispensable à l'étude d'un ouvrage souterrain : la collecte la plus complète possible des données et documents existants relatifs à la géologie, hydrogéologue et géotechnique et l'exploitation minière, ainsi qu'aux travaux réalisés à proximité.

L'ouvrage comporte le nécessaire pour faire le calcul pratique en termes de principes, méthodes, formules, tables et abaqués. Dans ce contexte, il représente un aide-mémoire couvrant les chapitres du programme officiel.

À l'issue du module, les étudiants auront acquis une bonne connaissance des spécificités du domaine des travaux souterrains ; ils auront en particulier pu comprendre les facteurs déterminants dans la conception et la conduite d'un projet de Creusement des Ouvrages Souterrains, et les étudiants obligé ayant connaissances préalables recommandées sur les notions de base de l'exploitation souterrain, la géotechnique et de la mécanique des roches appliquées aux travaux souterrains.

Ce support de cours est subdivisé en des chapitres, nous définissons d'abord dans chacun les notions relative au chapitre que nous illustrons par des exemples, ensuite nous proposons une série d'exercices avec solution qui permet d'approfondir les différentes notions du cours.

Le présent manuscrit est composé en cinq chapitres. A la fin de chaque chapitre, des exercices avec corrigés sont proposés

Le premier chapitre est une introduction et présentation aux techniques de creusement des ouvrages souterraines.

Le deuxième chapitre est une description du comportement des terrains autour d'une excavation minière souterraine et les principaux types des mouvements des terrains dans le creusement et excavations des ouvrages, ainsi les calculs de stabilité.

Le troisième chapitre présente le Creusements des excavations horizontales et inclinés avec le dimensionnement des ouvrages souterrains ainsi les méthodes utilisées.

Le quatrième chapitre est une description des Matériaux de soutènement utilisés dans la conception et sécurité des ouvrages souterraines.

Le cinquième chapitre traite le Creusement des fouilles .

SAADOUN Abdelhak

# Chapitre I. Introduction aux techniques de creusements souterraines

## Introduction

L'exploitation minière nous permet d'obtenir diverses substances minérales, jouant un rôle très important dans le développement de l'économie du pays. A l'avenir, le potentiel économique de chaque pays sera déterminé sur la base du niveau de la production des métaux et les diverses substances minérales.

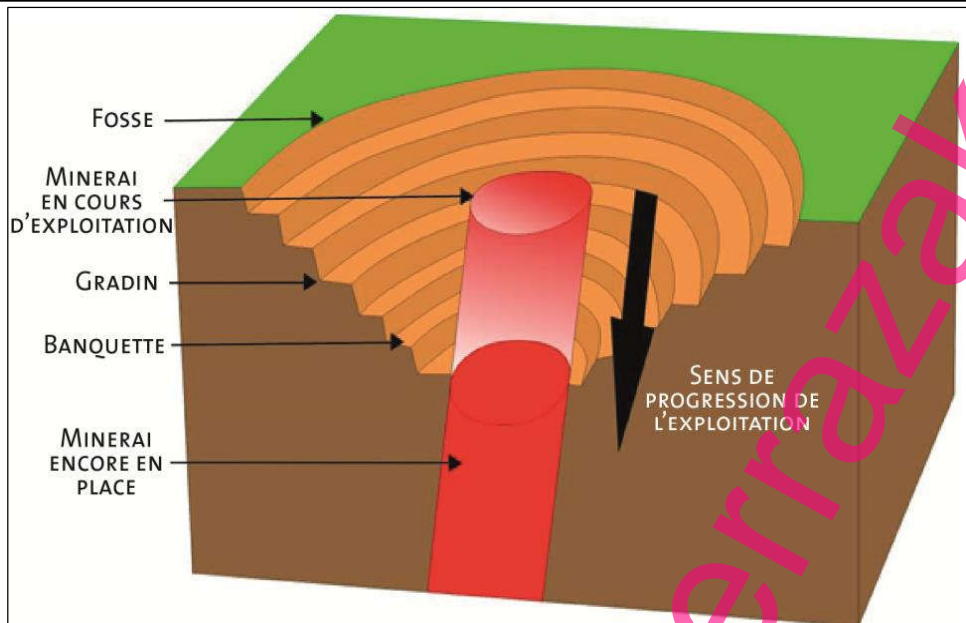
Dans l'industrie minière, l'exploitation des ressources est implantée un peu partout sur le territoire des pays. La demande des matières premières naturelles ne cesse pas d'augmenter, ce qui oblige à accentuer les travaux d'extraction, tout en préservant l'environnement. Pour cela, dans les prochaines années, d'une manière technique et scientifique, doivent être résolues d'importantes questions liées à l'exploitation minière : utilisation complète des ressources naturelles ; perfectionnement de la technologie, des paramètres constructifs, des modes de mécanisation, établissement d'une technologie d'extraction avec le minimum de déchets ; automatisation des principaux processus technologiques ; établissement et introduction d'un système de contrôle électronique, des processus technologiques et leur complexe, ainsi que l'ensemble de la mine.

## 1- Historique de creusement des excavations

Historiquement, l'homme a commencé le ramassage des minéraux utiles affleurant à la surface (exploitation à ciel ouvert). Au fil du temps, pour ses besoins, l'homme par son suivi des minéraux dont il a besoin, a commencé le creusement de fosses de profondeurs limitées accompagnées de mécanisations primitives, (Fig.1)

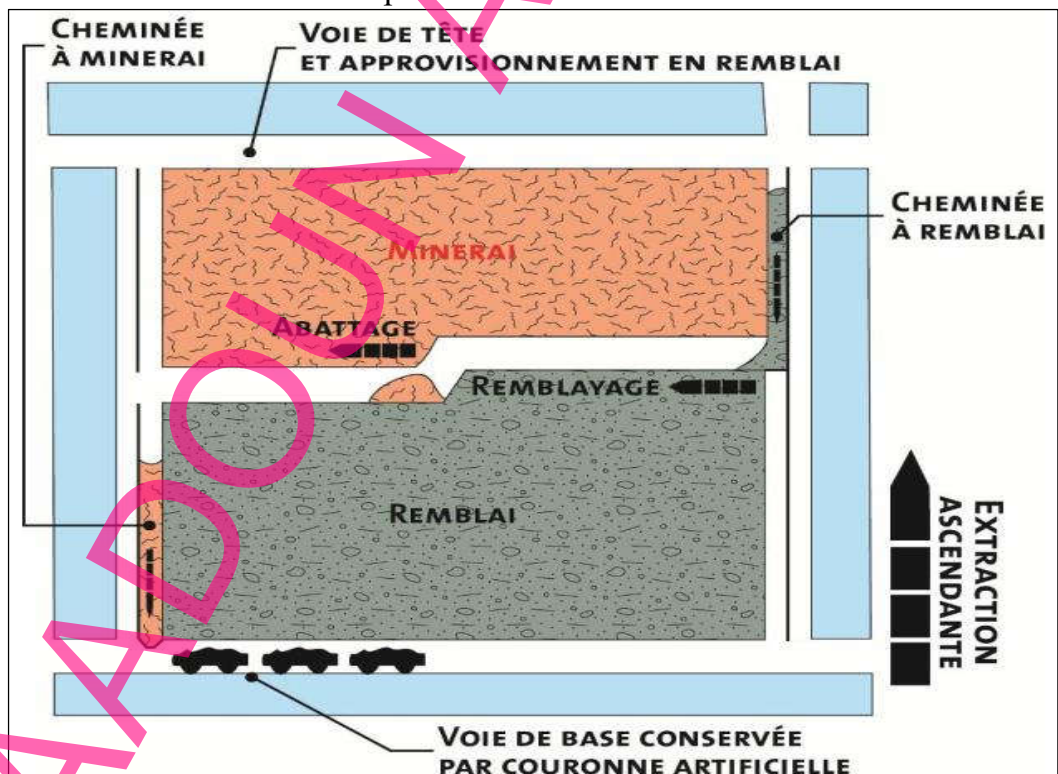
Seulement avec le temps, la quantité des minéraux utiles qui se trouve à la surface atteint son extinction et pour poursuivre l'extraction, il faut décapier plus de volume de roches stériles recouvrant les minéraux utiles, ce qui a poussé l'homme à revoir la technologie d'exploitation, et procéder à l'application d'une autre technologie avec le décapage du minimum de roches stériles (exploitation souterraine, Fig.2).





**Figure.1.** Extraction des minéraux par fosse à Ciel ouvert (Source : <http://ticri.univ-lorraine.fr>)

Après confirmation de l'existence d'un gisement des minéraux utiles exploitables, un projet sera établi, et des entreprises spéciales se penchent sur les modalités de son exploitation. Sous le terme technique « exploitation », on comprend l'ensemble des travaux miniers à réaliser pour l'extraction de la matière minéralisée du gisement.



**Figure.2.** Extraction des minéraux utiles par voie souterraine (Technique d'exploitation par tranches montantes remblayées (Source : BRGM)

La technologie d'exploitation appliquée, doit d'un côté garantir l'utilisation rationnelle des terres, et la protection de l'environnement, et de l'autre côté, de meilleurs

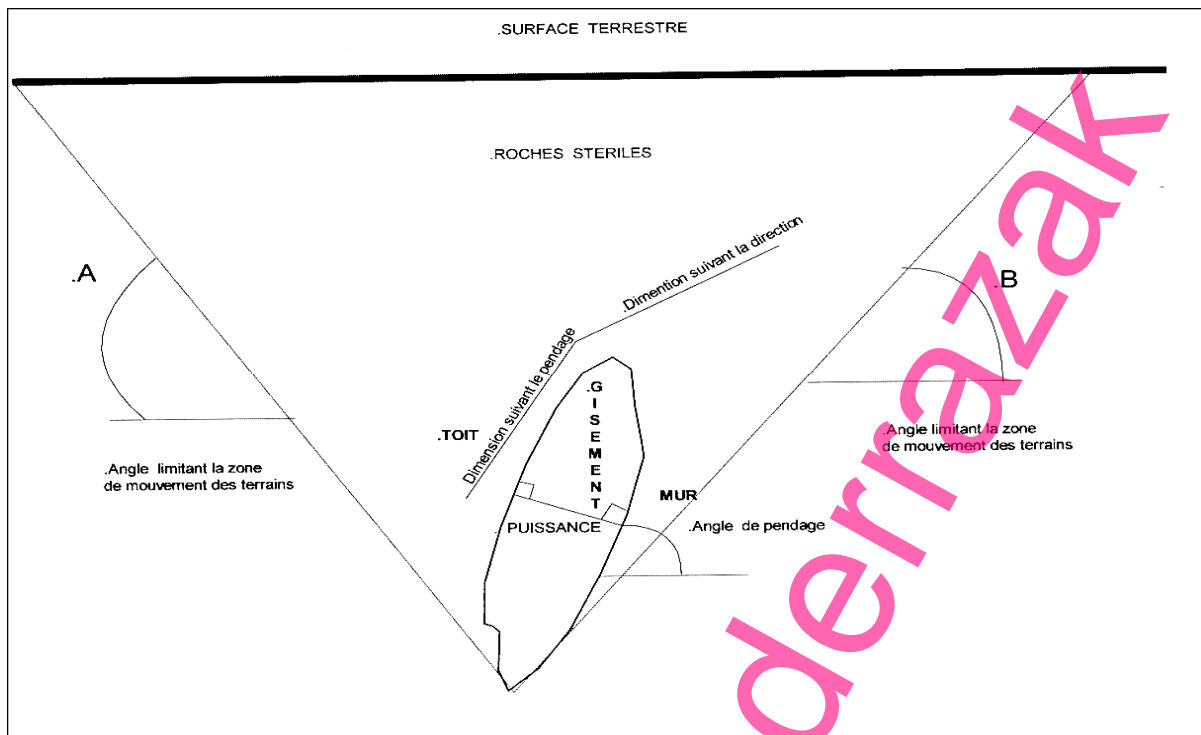
indices techniques et économiques de l'extraction, tout en tenant compte de la sécurité des mineurs et des populations avoisinantes.

L'utilisation rationnelle, et la protection de l'environnement consistent à respecter les conditions suivantes [1] :

- Extraction des gisements avec minimum de perte de minerai ;
- Extraction du sein de l'écorce terrestre de tous les composants utiles ;
- Utilisation des roches stériles, et les déchets de l'industrie pour les besoins de construction et d'autres branches (industrie sans déchets) ;
- Conservation des réserves non exploitables pour des objectifs d'avenir ;
- Protection de l'atmosphère, et les ressources hydriques des pollutions ;
- Conservation ou bien restauration, après liquidation des travaux d'exploitation des terres agricoles, et des forêts ;
- Préservation des monuments historiques et culturels contre la destruction ;
- Utilisation des cavités souterraines pour l'emmagasinage des déchets industriels, conservation du carburant, l'eau etc.

Actuellement, dans les pays riches en substances minérales, les gisements des minéraux utiles solides sont exploités soit par application d'une technologie à ciel ouvert, soit par application d'une technologie souterraine. Néanmoins, dans la pratique minière, les gisements solides peuvent être exploités par application de technologies à ciel ouverts, souterraines, combinées et sous-marines [2].

Le minerai est un agrégat minéral contenant un composant (ou des composants) de valeur en proportion suffisante pour son extraction industrielle. Ainsi, toute accumulation naturelle de matière minérale ne constitue pas nécessairement un gisement de minéraux utiles. La quantité de matière première contenue dans le sous-sol est appelée réserves. La disposition des gisements dans l'espace et leurs dimensions est déterminée par les éléments suivants : la direction, l'angle de pendage, la puissance, et la profondeur à partir de la surface terrestre jusqu'au sommet du gisement, et celle jusqu'à la limite du gisement en profondeur. (Fig3).



**Figure.3.** configuration d'un gisement des minéraux utiles avec ses différents éléments (Source : <http://ticri.univ-lorraine.fr>)

### 1.1- Conditions techniques et minières des gisements minéraux.

Dans l'exploitation minière, tous les gisements des minéraux utiles possèdent les éléments fondamentaux suivants :

La puissance, le pendage, la direction, le toit, le mur et la portée suivant le pendage.

**1.2-Forme et dimensions des gisements.** Souvent les gisements de minerai métallique, possèdent des formes irrégulières tout à fait loin des formes géométriques connues. Les dimensions des gisements, suivant la direction et le pendage varient de quelques dizaines de mètres jusqu'à des centaines de mètres ; Il existe des cas, où des gisements possèdent des portées pouvant aller jusqu'à quelques kilomètres. Les réserves d'un gisement se composent de quelques centaines de milliers de tonne, jusqu'à des milliards de tonnes.

Les gisements de manganèse et de sels minéraux possèdent des formes régulières sous formes de couches. La configuration d'un gisement des minéraux utiles avec ces éléments est indiquée dans la Fig. 3 [3].

**1.3. Puissance d'un gisement.** C'est la distance orthogonale entre le mur et le toit du gisement. Elle varie de quelques centimètres, jusqu'à 300 – 400 m, et peut, dans des cas atteindre un kilomètre et même plus (Sur la base de la classification des normes

technologiques de projection des mines, établis par l'institut de recherche russe GUIPROROU), on distingue les gisements suivants :

**- Gisement très minces :**

Ce type de gisement ayant de puissance allant jusqu'à 0,5m

**- Gisement faiblement puissant ;**

Ce type de gisement dont la puissance peut aller jusqu'à 5m. Cette catégorie de gisements renferme les gisements minces dont la puissance peut atteindre 0,8m, suivant laquelle, lors de la conduite des travaux miniers, elle nécessite l'abattage des roches stériles avec le minerai.

**- Gisement de puissance moyenne ;**

Dont la puissance varie entre 5 à 15m, suivant laquelle les blocs d'exploitations sont disposés le long de la direction du gisement.

**- Gisement puissant ;**

Dont la puissance est supérieure à 15m. Cette catégorie de gisement renferme les gisements puissants, dont la puissance est supérieure à 50m. Suivant cette catégorie de gisements, les blocs d'exploitation sont disposés suivant le pendage du gisement.

#### **1.4- Pendage d'un gisement.**

Il est déterminé en fonction de la disposition du gisement dans l'espace, et le plan horizontal. Cet angle varie de  $0 - 90^\circ$ .

Suivant cet élément, le chercheur russe V. IMINITOV, en collaboration avec des instituts de recherche et de projection des mines, a proposé la classification suivante :

**- Gisement dressant ;**

Dont l'angle de pendage est supérieur à  $45 - 50^\circ$ .

**- Gisements inclinés ;**

Dont l'angle de pendage varie entre  $20 - 25$  jusqu'à  $45 - 50^\circ$ .

- **Faiblement inclinés ou subhorizontal** ; dont l'angle de pendage peut atteindre 20 – 25°. Cette catégorie de gisements, renferme les gisements plateurs, dont l'angle de pendage peut aller jusqu'à 3°.

Cette classification des gisements des minéraux utiles, permet dans une certaine mesure de nous faciliter la tâche durant l'établissement d'un projet de mine [4].

La forme (morphologie), les dimensions et les conditions de formation des gisements, influent directement sur le choix de la technologie l'extraction de ces derniers.

**I.5-La forme des corps minéralisé** peut être divisée en trois groupes :

- **Forme isométrique** ; les gisements se développent d'une manière identique suivant les trois dimensions dans l'espace.
- **Forme de poutre (stot)** ; les gisements de cette catégorie, se développent suivant une seule dimension dans l'espace.
- **Forme de couche** ; Les gisements se développent suivant deux dimensions dans l'espace.

## 2 – Choix d'une technologie d'extraction.

Actuellement, le choix d'application de telle ou telle technologie d'exploitation d'un gisement donné se fait sur la base d'une étude technique et économique. Généralement dans la pratique minière, lors du choix du mode d'extraction, on peut rencontrer quatre cas :

- A-Gisements puissants, faiblement inclinés ou plateurs gisants à de faibles profondeurs. Ces gisements sont exploités par application d'une technologie à ciel ouvert.
- B-Gisement gisant à de profondeur importante. Ce type de gisement est exploité par application d'une technologie souterraine.
- C-Gisements gisants dans des conditions, qui peuvent permettre leurs extractions par application de technologies à ciel ouvert ou celles souterraines.

- D-Gisements gisant dans des conditions, nous permettant d'extraire leurs parties supérieures par application de technologies à ciel ouvert, et leurs parties inférieures par application de technologies souterraines (technologie combinée) [5].

Dans le premier, le deuxième et le troisième cas, la limite du mode d'extraction est exclue. Mais dans le quatrième cas, il est nécessaire d'arrêter la limite des travaux d'extraction entre la conduite des travaux d'exploitation à ciel ouvert et celle souterraine.

### **3- Construction des excavations minières**

#### **3.1 -Généralité**

La conduite des travaux miniers est caractérisée par la création, dans l'écorce terrestre, de diverses cavités de dimensions et de dispositions dans l'espace suivant un large diapason.

Ces excavations minières nous permettent d'explorer, d'étudier et d'extraire la matière minéralisée du sein de la terre.

Une excavation minière, est une construction technique réalisée dans l'écorce terrestre, ou bien à sa surface, crée par suite de la conduite des travaux miniers. Dans le but de remplir sa fonction technique suivant la durée déterminée, l'excavation minière doit être renforcé par une construction spéciale appelée soutènement, et par divers procédés de transport et techniques ingénieurs.

Les excavations minières réalisées au fond de l'écorce, sont appelés excavations minières souterraines, et celles réalisées à la surface de l'écorce terrestre sont appelés excavations à ciel ouvert.

En fonction de la tâche arrêter par projet, nous distinguons des excavations minières destinées pour l'exploration et la recherche des gisements des minéraux utiles, et celles destinées pour les travaux d'extraction de ces derniers.

En fonction de leurs destinations dans le processus technologique, les excavations minières peuvent être d'ouverture, de préparation et de dépilage.

Suivant leurs dispositions dans l'espace, les excavions minières peuvent être horizontales, verticales où inclinées [6].

La forme de la section transversale des excavations minières peut être circulaire, rectangulaire, en voûte, en arc, trapézoïdale, elliptique et d'autres.

Les excavations minières peuvent posséder deux sorties au jour – tunnels ; une seule sortie au jour, les puits de mines, galeries au jour, fouilles, descenderies : aucune sortie au jour, les travers – bancs, les galeries d'exploitation, les bures, les plans inclinés, les menteries.

En fonction du rapport de la surface de la section transversale et la portée, les excavations minières se divisent en excavations de portées (puits, galeries, travers – bancs etc.) et volumiques (chambres, recettes, niches etc.)

Les roches minières limitant l'excavation minière à sa partie supérieure s'appellent toit de l'excavation, celles-là limitant à sa partie inférieure s'appellent semelle (sol, pied), de l'excavation, et celles latérales s'appellent les parois de l'excavation.

Par front de taille d'une excavation minière, nous comprenons le déplacement dans l'espace des roches affleurent lors de la conduite des travaux de creusement.

Le début d'une excavation minière est appelé embouchèrent, et l'intersection de deux excavations minières est appelée jonction.

Nous définissons une galerie comme étant une excavation souterraine, plus ou moins horizontale, ayant un profil de toute forme, rectangle, trapèze, cercle, etc. et une longueur plus grande que ses dimensions en profil. En mécanique des roches, nous voyons que le meilleur profil est le cercle suite à la répartition uniforme des contraintes autour de l'ouvrage. En pratique, la forme dépend de l'utilité de l'excavation, de la durée d'usage, de l'expérience des exécutants en génie minier et génie civil, de la compétence des roches, etc [7].

### 3.2 -Parties d'une galerie

Une galerie a les mêmes parties qu'un tunnel. Un tunnel peut être représenté comme suite [8]

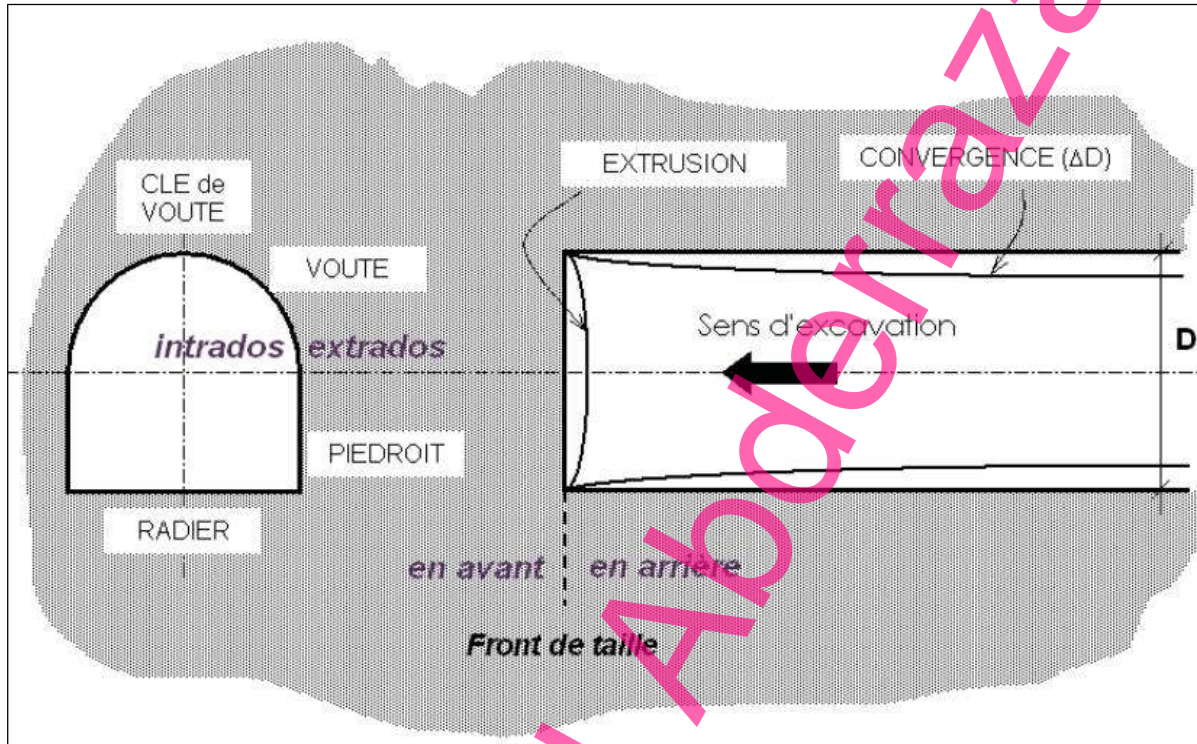


Figure .4. Partie d'une galerie ou d'un tunnel [8]

### 3.3-Excavations minières souterraines.

Suivant leurs dispositions dans l'espace, les excavations minières souterraines peuvent être horizontales, verticales ou suivant des inclinaisons bien déterminées.

Dans les excavations horizontales, nous rapportons les excavations suivantes : [9]

#### Galerie au jour :

Excavation minière, possédant une sortie immédiate au jour (surface terrestre), construite suivant un léger pendage (0,02 %) vers le jour, afin de faciliter l'écoulement des eaux et le mouvement des engins à chargés. Par rapport aux gisements des minéraux utiles, les galeries au jour peuvent être creusées suivant la direction ou suivant un certain pendage à ces derniers.



Il est destiné à des buts de prospection ou, lors de l'exploitation du gisement, au transport des charges, mouvement des personnels, livraison des matériels, aérage et exhaure

**Galerie d'exploitation :**

Excavation minière horizontales, ne possédant pas de sortie immédiate au jour, creusée, dans le cas de gisements inclinés ou dressant, suivant leurs directions, et dans les cas de gisements faiblement inclinés ou plateures, suivant n'importe quelles directions.

**Travers-banc :**

Excavation minière horizontale, creusée dans les roches stériles suivant un certain angle par rapport à la direction des gisements, ne possédant pas de sortie immédiate au jour, et servant à la réalisation des processus technologiques. il destinée au transport des charges, aux déplacements du personnel, à l'aérage, à l'écoulement des eaux, etc.

**Recoupe :**

Excavation minière horizontale ou incliné, ne possédant pas de sortie immédiate au jour, creusée uniquement, suivant un certain angle par rapport au toit et au mur de la couche minéralisée, dans les limites de la puissance du gisement. Les recoupes tracées après la découverte du gîte, pour réaliser la communication entre deux puits voisins, deux galeries ou deux étages et pour assurer la ventilation est une recoupe d'aérage.

**Salle :**

Excavation minière horizontale, ne possédant pas de sortie immédiate au jour, dont les surfaces des sections transversales sont beaucoup plus importantes aux portées, et servant pour l'emmagasinage des engins miniers et leurs accessoires ainsi qu'au dépôt des matières explosives.

L'ensemble des excavations minières disposées dans un seul niveau et servant la conduites des travaux miniers, est appelé horizon.

Dans l'excavation verticale, nous rapportons les excavations suivantes :

**Puits de mine :** excavation minière verticale, possédant une sortie immédiate au jour (puits capital ou secondaire) ou sans sortie immédiate au jour (puits aveugle (bure), servant l'ouverture des horizons du gisement des minéraux utiles (puits capital, bure) ou les travaux auxiliaires (puits d'aérage, descente et montée des mineurs et d'autres travaux.)

**Montage (Menterie):**

Excavation minière verticale, possédant deux ou plusieurs compartiments servant pour la dégringolade du minerai (roches stériles), montée et descente des mineurs, aérage et d'autres travaux. Dans le cas d'une excavation minière verticale, possédant un seul compartiment destiné pour une seule fonction, alors elle est nommée d'une manière relative à la fonction qu'elle réalise. Le montage peut être creusé dans la puissance du gisement ou en dehors des limites de cette dernière ; il peut aussi servir plusieurs horizons (cas de l'ouverture des horizons d'un gisement donné par des travers - banc de groupe.)

**Fouille :**

Excavation minière verticale de faible profondeur servant les travaux miniers auxiliaires (aérage, descente et montée des mineurs, issue de secours etc.)

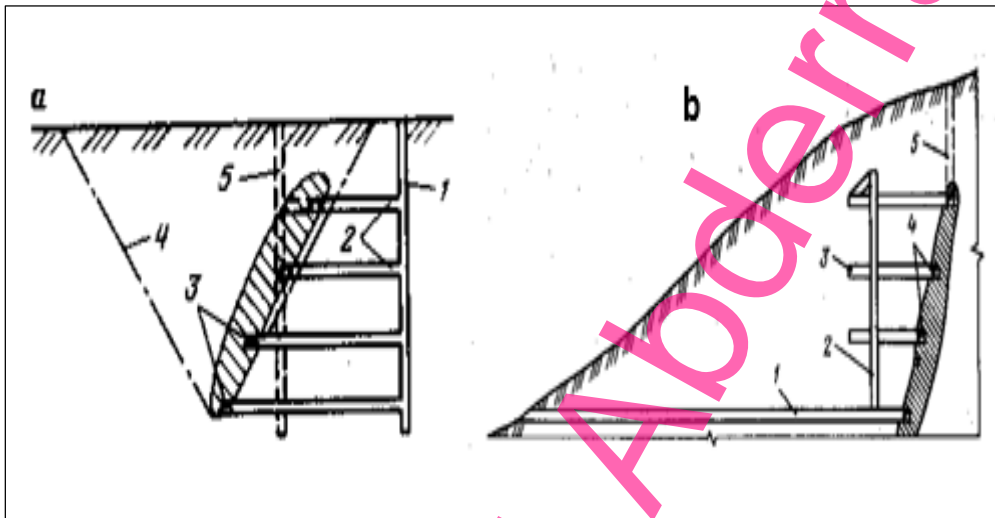
A l'exception des descenderies, aux excavations inclinées nous rapportons les mêmes excavations verticales.

**Descenderie :**

Excavation minière creusée suivant une certaine inclinaison, possédant une sortie immédiate au jour, et servant les travaux d'ouverture des horizons des gisements des minéraux utiles.

L'ouverture des gisements des minéraux utiles, consiste à creuser et construire, à partir de la surface terrestre, des excavations minières qui vont donner un accès à cette dernière ( Fig. .5)

Les puits de mines, et les galeries au jour sont les principales excavations minières d'ouverture des gisements des minéraux utiles. Parallèlement à ces excavations minières, on distingue les puits de mines secondaires, qui servent pour l'aération, et sortie secondaire à la surface ; les travers bancs liant le puits principal, et celui (ceux) secondaires au gisement. Pour l'ouverture des horizons inférieurs d'un gisement donné, ainsi que des portions de ce dernier, on creuse et on construit des puits aveugles, des montages, des plans inclinés, et d'autres excavations minières.



**Figure.5.** schémas d'ouverture des gisements des minéraux utiles. **a)**– ouverture par puits de mines : 1 – puits de mine capital, 2- travers banc, 3 – galerie, 4 – zone de mouvement des terrains, 5 – puits de mine secondaire.

**b)**– ouverture par galerie au jour : 1 – galerie au jour, 2 – montage (cheminée) capital, 3 – travers banc, 4 – galerie, 5 – fouille [9]

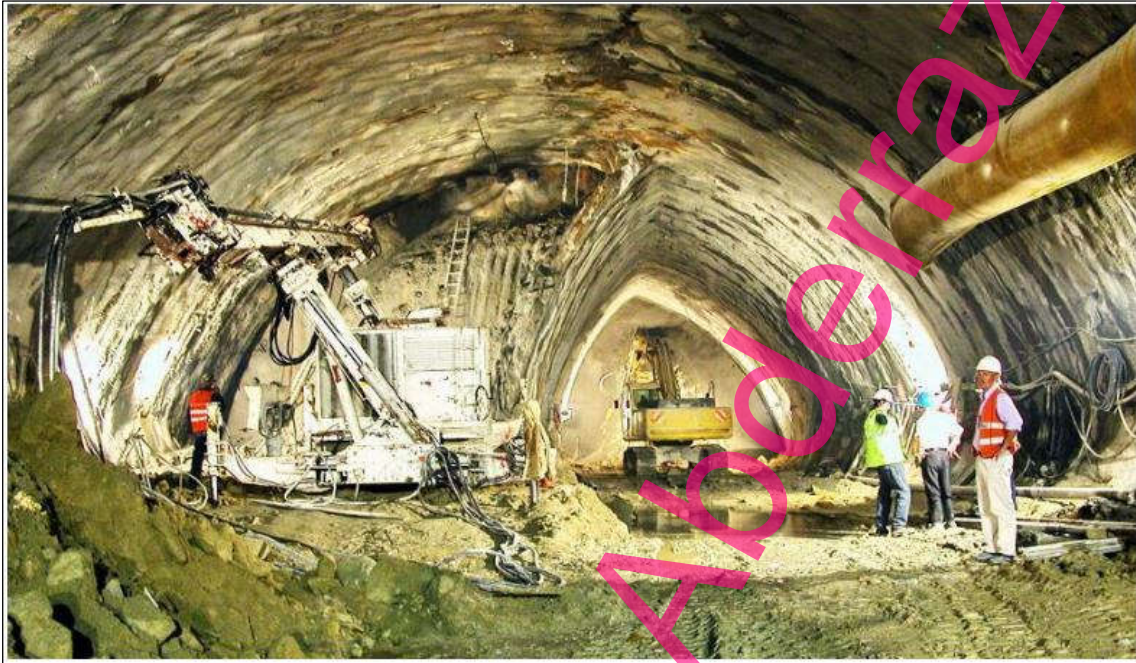
Les ouvrages souterrains regroupent un grand nombre d'ouvrages comme des puits et des galeries pour l'exploitation minière et pétrolière, des conduites, des canalisations et des collecteurs d'assainissement, des parkings, des réservoirs souterrains, des usines et des gares souterraines, des tunnels autoroutiers et ferroviaires, des galeries de métro etc. Ces ouvrages souterrains présentent la particularité d'être entièrement construits dans un massif de sol ou de roche

#### 4. Importance des ouvrages souterrains :

Les ouvrages souterrains constituent la solution la mieux adaptée à la création de nouvelles infrastructures en zone urbaine et au franchissement des zones montagneuses.

En zone urbaine, le sous-sol devient une alternative quasi incontournable aux problèmes d'occupation et d'encombrement de surface.

La réalisation des travaux en souterrain permet de s'affranchir des obstacles, d'utiliser au maximum l'espace souterrain quasi illimité et de libérer la surface au sol



**Figure.6.** Espace souterrain [10].

La multiplication des travaux souterrains et les difficultés rencontrées conduisent à une sophistication des méthodes d'investigation, de modélisation, de conception et d'exécution. De nos jours, il existe même de grands ouvrages sous mers : (Le tunnel sous la manche et plusieurs tunnels sous les fjords en Norvège ...etc.). Cependant, contrairement aux projets de structures tels les bâtiments ou les ponts, les ouvrages souterrains sont entièrement construits dans les terrains et requièrent des informations géotechniques précises concernant le massif environnant et plus abondantes tout au long du tracé. Ces conditions, chacun le sait, sont rarement satisfaites et rendent la réalisation des ouvrages souterrains d'autant plus difficile.

Ce problème se pose de manière plus aiguë encore dans le cas des tunnels profonds.

Les problèmes majeurs liés à la construction des ouvrages souterrains sont :

- La stabilité de terrain pendant les travaux notamment au front de taille

- Le choix de type de soutènement et de revêtement à mettre en œuvre pour assurer la tenue des parois à court terme, puis à long terme
- La maîtrise des mouvements engendrés en surface par le creusement particulier lorsque l'ouvrage est construit à une faible profondeur ou à proximité d'autres structures (en site urbain)
- Maîtrise les problèmes hydrauliques (présence d'une nappe phréatique). [11].

#### **4.1. Utilisations de l'espace souterrain :**

Pour la bonne compréhension des raisons d'aller en souterrain, il est nécessaire de citer quelques caractéristiques essentielles du sous-sol :

- Le sous-sol est un espace qui peut recevoir des infrastructures difficiles, impossibles en surface.
- Le sous-sol offre un espace naturel protégé mécaniquement, thermiquement et acoustiquement.
- Le sous-sol offre l'avantage de protéger l'environnement extérieur des risques et nuisances liés à certains types d'activités.
- Le sous-sol est généralement invisible, sauf aux points de liaison avec la surface.

Donc l'intérêt qui est porté à l'utilisation de l'espace souterrain urbain est grandissant car il peut être la solution à bien des problèmes actuels. Les aménagements possibles de cet espace peuvent répondre à des notions de valorisation des centres anciens figés dans leur historique et dans leur bâti inadapté à la vie urbaine actuelle. Cette utilisation rationnelle du sous-sol devrait être aussi appliquée aux villes nouvelles afin de répondre, de manière anticipée, aux logiques constructives qui font défaut à nos villes anciennes ; mise en galeries des réseaux concessionnaires, dessertes par des voies rapides, parkings, ... etc.

#### **5. Classification des ouvrages souterrains :**

Les ouvrages souterrains sont des ouvrages enterrés construits par percement dans les terrains vierges sans ou avec déblaiement des masses de terres supérieures. Parmi les différentes classifications qui sont présentes, nous citerons

celle de qui classe les ouvrages souterrains suivant leur destination, en caractérisant la sécurité requise par ordre croissant comme il est illustré dans le tableau 1.

**Tableau 1.** Classification des différents ouvrages souterrains [12].

Classe	Description
A	Excavation minière à caractère temporaire (mines souterraines)
B	Puits verticaux
C	Galeries hydrauliques, Collecteurs d'assainissement, Galeries de reconnaissances
D	Cavité de stockage, stations de traitement d'eau, tunnels routiers et ferroviaires, tunnels d'accès
E	Usines souterraines (plus souvent hydroélectrique), tunnels autoroutiers. Tunnel ferroviaires, Galeries du métro, Abries de défense civile
F	Centrales nucléaires souterraines, Gares souterraines.

### 5.1- Creusement et construction des ouvrages souterrains [13]. :

C'est la stabilité du terrain pendant la construction qui impose le choix des procédés de construction. Deux situations se présentent :

- Au cours du creusement, les variations de contraintes sont telles que le sol cohérent, ou le massif rocheux, reste stable dans son ensemble. Les dimensions de l'excavation ne sont alors limitées que par des conditions géométriques, telles que la proximité de la surface, l'épaisseur de la couche favorable, la présence de grandes fractures. Des instabilités locales de surface, dues à la fracturation, peuvent néanmoins se produire. Une protection de l'intrados doit donc être assurée vis-à-vis du chantier et, ultérieurement, en fonction de l'utilisation de la cavité. Les coûts les plus faibles sont obtenus lorsque le terrain est insensible à l'eau ou n'évolue pas à long terme. Cela est fréquent dans les calcaires ou les roches cristallines massives, jusqu'à une certaine profondeur.
- Le creusement perturbe les conditions d'équilibre du terrain encaissant, de telle sorte que la surface de l'excavation devient instable, soit localement, soit sur tout son périphérique.

## 5.2- Techniques de construction des ouvrages souterrains :

Depuis une trentaine d'années de nouvelles méthodes de construction ont été introduites sur les chantiers, elles permettent de réaliser des ouvrages en site urbain dans des terrains meubles et aquifères sans occasionner de dégâts importants en surface du sol, la simulation d'un ouvrage souterrain est liée étroitement à la méthode d'excavation et la réponse du massif, la connaissance des techniques de construction est importante pour arriver à des phases de modélisation satisfaisante.

Les ouvrages souterrains peuvent être creusés dans différents types de massif rocheux, depuis l'argile jusqu'aux roches les plus dures, et les techniques d'excavation dépendent de la nature du terrain. Quelques notions de base sont nécessaires avant de parler à proprement dit des techniques de constructions des ouvrages souterrains. Toute construction dépend du lieu où elle va être réalisée. Pour les excavations minières, il faut donc prendre en compte diverses données, comme le type de sol, la stabilité de celui-ci, la profondeur à laquelle on souhaite arriver, etc. C'est ainsi que les techniques de construction doivent tenir compte de l'hydrologie et la géologie du sol. Pour déterminer les caractéristiques du sol.

## 5.3- Les différentes méthodes d'exécution des ouvrages souterrains :

Dans l'exploitation et géotechnique minière, quatre principales méthodes d'exécution des ouvrages souterrains peuvent être utilisées. 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).

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

- A- ouvrages souterrains dans le rocher:

–Méthode traditionnelle à l'explosif;

–Méthode par attaque ponctuelle.

- B- ouvrages souterrains en terrain difficile:

–Méthode par prédécoupage mécanique;

–Méthode de creusement au tunnelier.

## 6. Construction des tunnels [14]:

La conception des tunnels demande des calculs complexes et l'identification des propriétés géomécanique des massifs rocheux qui abriteront les ouvrages. Lors de la conception, plusieurs méthodes de calculs (semi-empiriques, analytiques, numériques...etc.) aident à déterminer les contraintes auxquelles sont soumis les tunnels et permettent de choisir les méthodes d'excavation et de soutènement optimales à utiliser. Dans ce chapitre, nous étudierons les étapes d'exécution des tunnels ; nous aborderons également les méthodes de soutènement et d'auscultation indispensables pour assurer la stabilité et la sécurité des travaux.

### II.2. Critères de classification des tunnels

La construction souterraine s'est avérée efficace pour plusieurs utilités. Avec les différentes catégories de tunnels existant de nos jours, nous pouvons les classer en fonction d'un certain nombre de critères dont :

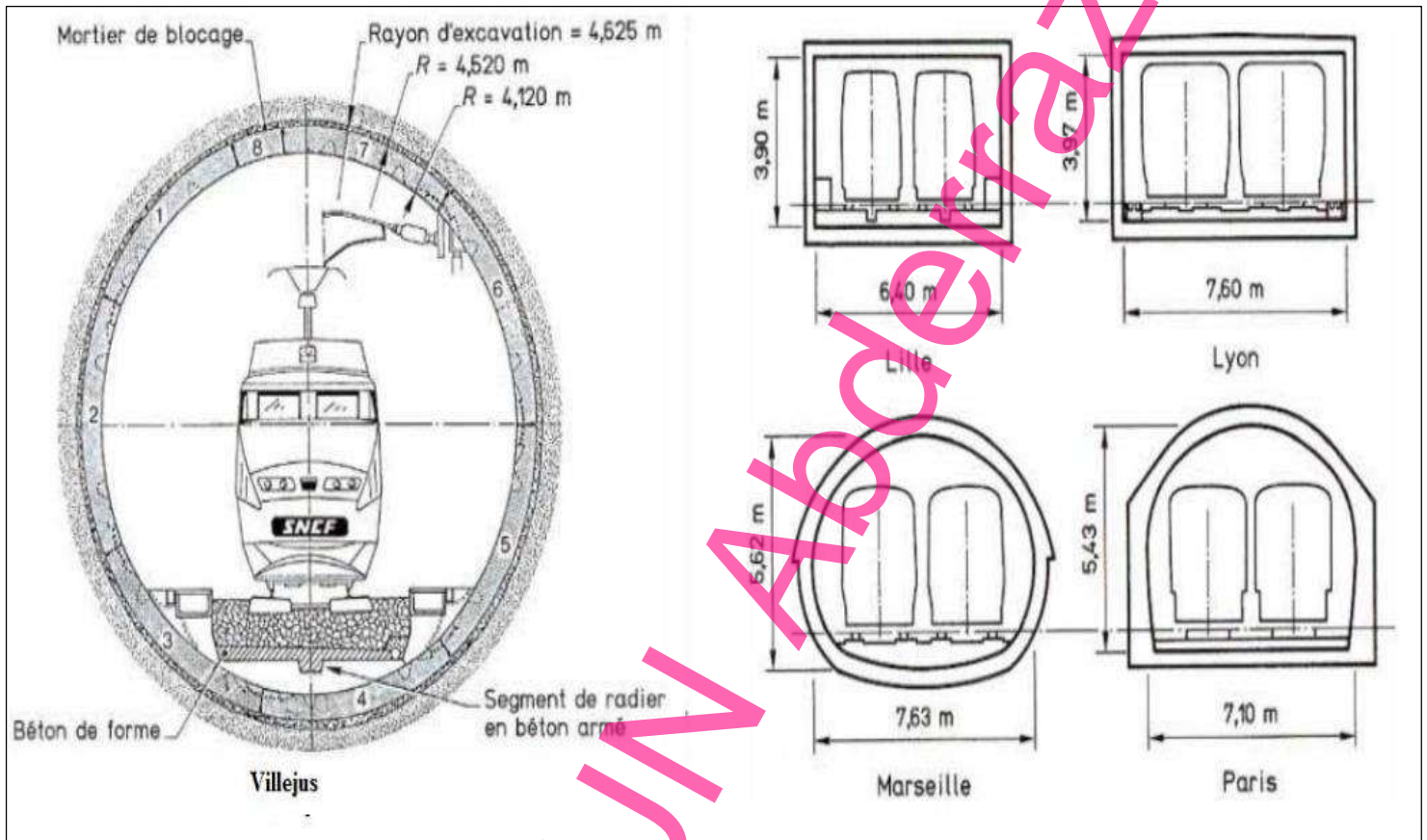
- L'objectif du tunnel** : ils peuvent servir de moyens de communication pour la circulation de personnes (tunnels routiers, ferroviaires...etc.), ou pour le transport de matériaux (égouts, galeries de canalisation), ou servir comme endroit de stockage (garage, parking...etc.).

- La forme du tunnel** : on peut distinguer d'un côté des tunnels proprement dits et les puits qui sont des ouvrages à grand développement linéaire et dont la section est constante ou peu variable ; d'un autre côté on peut avoir des cavités aux formes plus ramassées et souvent moins régulières dans lesquelles aucune des dimensions n'est prépondérante.

Cette considération de forme de la section est importante notamment dans la mesure où on envisage de traiter des problèmes de stabilité car la forme de cette section peut nous permettre ou pas de considérer les problèmes d'équilibre à 2 dimensions. Une autre considération de forme pourrait concerner la section du tunnel : circulaire,



polygonale (trapèze), en arc ou arrondie sur les bords avec des cotés latéraux droits. Nous noterons l'existence des galeries minières et autres ouvrages miniers souterrains qui s'apparentent aux tunnels réalisés dans le génie civil par leur méthode de dimensionnement et leur mode de creusement.



**Figure .7.** Sections transversales de quelques métros en France [14].

Pour tout projet de tunnel, les responsables du projet suivent des étapes incontournables.

Evidemment, les projets de tunnels peuvent être différents par leurs profondeurs, leurs géométries, la nature du terrain, la méthode d'excavation, le site d'implantation, ...etc. la connaissance du mode et techniques de creusement, ainsi que des différents modes de soutènement et revêtement, sont nécessaire pour tout projet de réalisation d'ouvrages souterrains.

### 6.1. Facteurs géologiques principaux pour le choix des méthodes de creusement

Comme évoqué précédemment, 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

**Conclusion :**

Les fondations et les ouvrages souterrains ont en commun le fait que leur comportement dépend essentiellement de celui du terrain encaissant l'ouvrage, et aussi du mécanisme d'interaction entre le terrain et la construction.

C'est pour cela, les conditions géologiques et hydrogéologiques sont, plus que tout autre, des facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage souterrain. Non seulement ces conditions ont une grande influence sur le choix des méthodes de creusement ; d'excavation, des soutènements et des revêtements.

# Chapitre II. Comportement des terrains autour d'une excavation minière souterraine

## Introduction

Le comportement de la roche et du massif rocheux autour des ouvertures souterraines dépend de nombreux facteurs. Pour les roches dures, l'amorce de la propagation des fissures, qui peut éventuellement conduire à une rupture par excès de contrainte, représente une propriété fondamentale – appelée ici seuil d'endommagement. Ce seuil, comme la résistance à court terme de la roche, est représenté à partir d'un nouveau critère multiaxial dans l'espace

Il convient de souligner que, lors de la construction et le creusement des ouvrages souterrains, l'objectif premier est bien entendu d'assurer la stabilité de l'ouvrage, à court terme comme à long terme, pour le personnel comme pour l'environnement. Mais, 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.

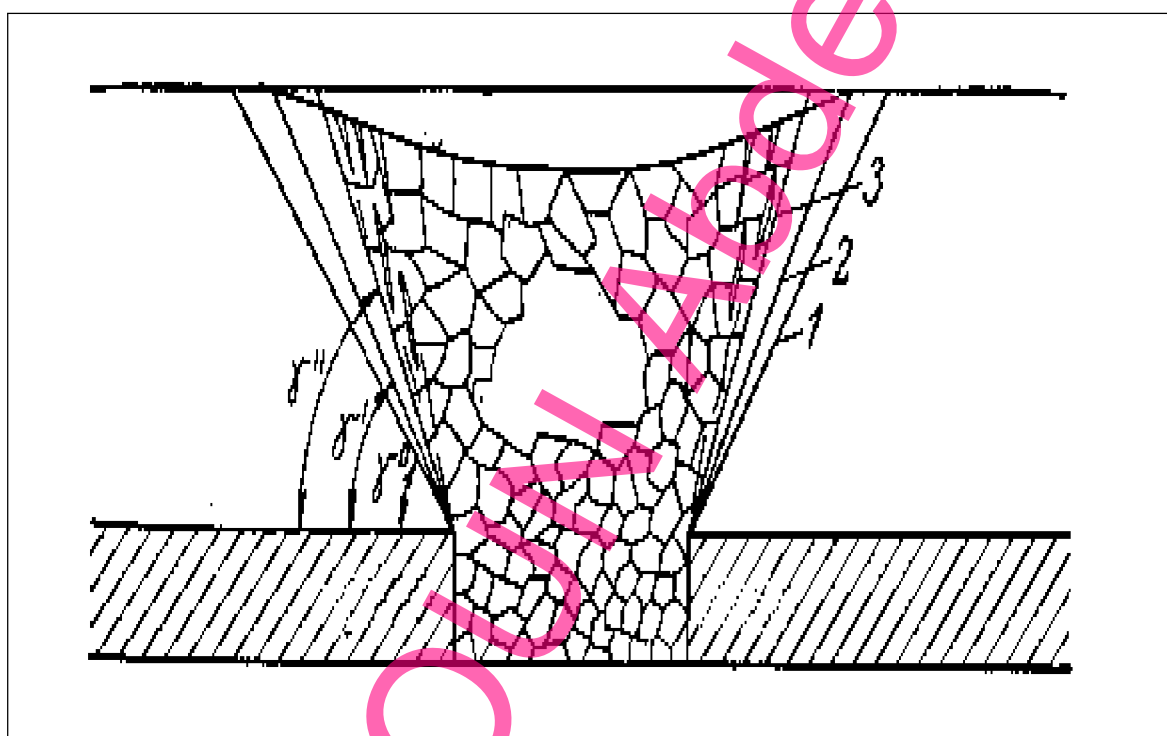
### 1-Influence des travaux miniers sur le déplacement des roches, et l'état de surface.

Le creusement des ouvrages souterrains ou l'exploitation des mines s'avère cependant une opération où les risques d'accidents sont très présents. Les travailleurs miniers sont ainsi exposés à diverses sources de danger, parmi lesquels le problème des instabilités et des chutes de terrain demeure, encore aujourd'hui, un des plus sérieux.

La conduite des travaux miniers engendre la création des vides dans le sein de l'écorce terrestre, ce qui va provoquer le déplacement, la déformation, et l'affaissement du massif rocheux se trouvant au-dessus du gisement. Ce processus, s'appelle mouvement des terrains (Fig.1) Suivant les limites du mouvement des terrains, on distingue les zones suivantes : zone de foudroyage, limitée par l'angle  $\gamma''$ , zone de fissuration, limitée par l'angle  $\gamma'$ , et la zone limite de mouvement des terrains, limitée par l'angle  $\gamma^0$ . Ces différentes zones, permettent de déterminer la disposition des excavations minières capitales, et les constructions techniques à la surface de la mine.

Dans le cas d'une faible puissance de gisement ou bien une profondeur importante, le déplacement des roches n'atteindra pas la surface. La profondeur suivant laquelle, la conduite des travaux miniers ne provoque pas le déplacement des roches s'appelle profondeur de sécurité. Le rapport entre la puissance minimale de gisement sécurisante, et la profondeur de la conduite des travaux miniers s'appelle coefficient de sécurité [15].

Les angles des zones de mouvement des terrains dépendent des propriétés physiques, et mécaniques des roches minières, la stratification, l'angle de pendage du gisement, la profondeur de la conduite des travaux miniers, et d'autres facteurs.



**Figure .1.** Schéma des zones de mouvement des terrains, lors de la conduite des travaux miniers. 1 – Frontière de la zone de mouvement des terrains ; 2 – Frontière de la zone dangereuse ; 3 – Frontière de la zone de foudroyage [9]

Comme règle, le comportement des terrains autour d'une excavation minière souterraine dans la pratique minière, est représenté que les excavations capitales (principale) sont creusées toujours hors de la zone de mouvement des terrains, afin de les préserver contre les effondrements. Comme les valeurs des angles limitant les zones de mouvement des terrains peuvent être inférieure à celle réelle, et afin de ne pas prendre de risque catastrophique, les excavations capitales, et les constructions techniques sont

creusées, à une distance de 30 – 60 m jusqu'à 120 m, hors de la zone de mouvement des terrains.

Les dangers les plus importants auxquels est confrontée la technique de creusement des ouvrages souterrains sont

### **1.1- Mécanisme et phénomène d'affaissement**

Les éventuels phénomènes d'instabilité susceptibles d'affecter les terrains de surface à l'aplomb des travaux souterrains prennent naissance au sein des travaux souterrains. Ils se manifestent par la dislocation et la chute du toit ou de parements des cavités. Les terrains s'éboulent en blocs de tailles et de formes variables s'entassent aléatoirement en laissant entre eux des vides résiduels. Une fois éboulés, les terrains occupent, de ce fait, un volume plus important que celui qu'ils occupaient dans leur état naturel initial, c'est le phénomène de foisonnement.

Lorsque le foisonnement est insuffisant pour combler le vide exploité, les terrains sus-jacents viennent s'appuyer sur les terrains foudroyés en gardant leur continuité. Ils se tassent progressivement en compactant la partie foudroyée. Le tassement progressif des terrains constituant le recouvrement se manifeste en surface par un abaissement de la surface qui se poursuit jusqu'à l'établissement d'un nouvel état d'équilibre stable dans le temps.

On parle d'affaissement minier, au sens large, lorsque le réajustement de la surface se fait de façon souple et progressive, en formant une dépression topographique, sans rupture cassante importante, avec une allure de cuvette (Fig. 2). Généralement, ce type de manifestation ne concerne que les exploitations situées à grande profondeur et présentant des extensions horizontales importante. [16]

### **1.2 -Conséquence des affaissements miniers sur l'environnement [17].**

Généralement, les conséquences les plus dommageables sont celles qui affectent la stabilité des bâtiments et infrastructures de surface. En termes de dégradation du bâti, ce ne sont pas tant les affaissements à proprement parler (déplacements verticaux) que les déformations du sol (déplacements horizontaux, flexions...) qui sont les plus à craindre. Les dommages consécutifs aux déformations du sol sont en relation avec

- La longueur des ouvrages qui les subissent (les bâtiments longs sont les plus sensibles) ;
- Leur position par rapport à la cuvette (ceux qui sont proches du point d'inflexion de la courbe d'affaissement sont les plus vulnérables) ;
- La nature du sol et des fondations ;
- Les tolérances des constructions (présence de joints de dilatation, déformabilité des matériaux...).

Si elles peuvent s'avérer importantes durant la phase d'exploitation, les déformations induites durant la phase post-exploitation sont en général très limitées. Les conséquences induites sur la stabilité des terrains et des infrastructures de surface sont donc, dans la plupart des cas négligeables [18].

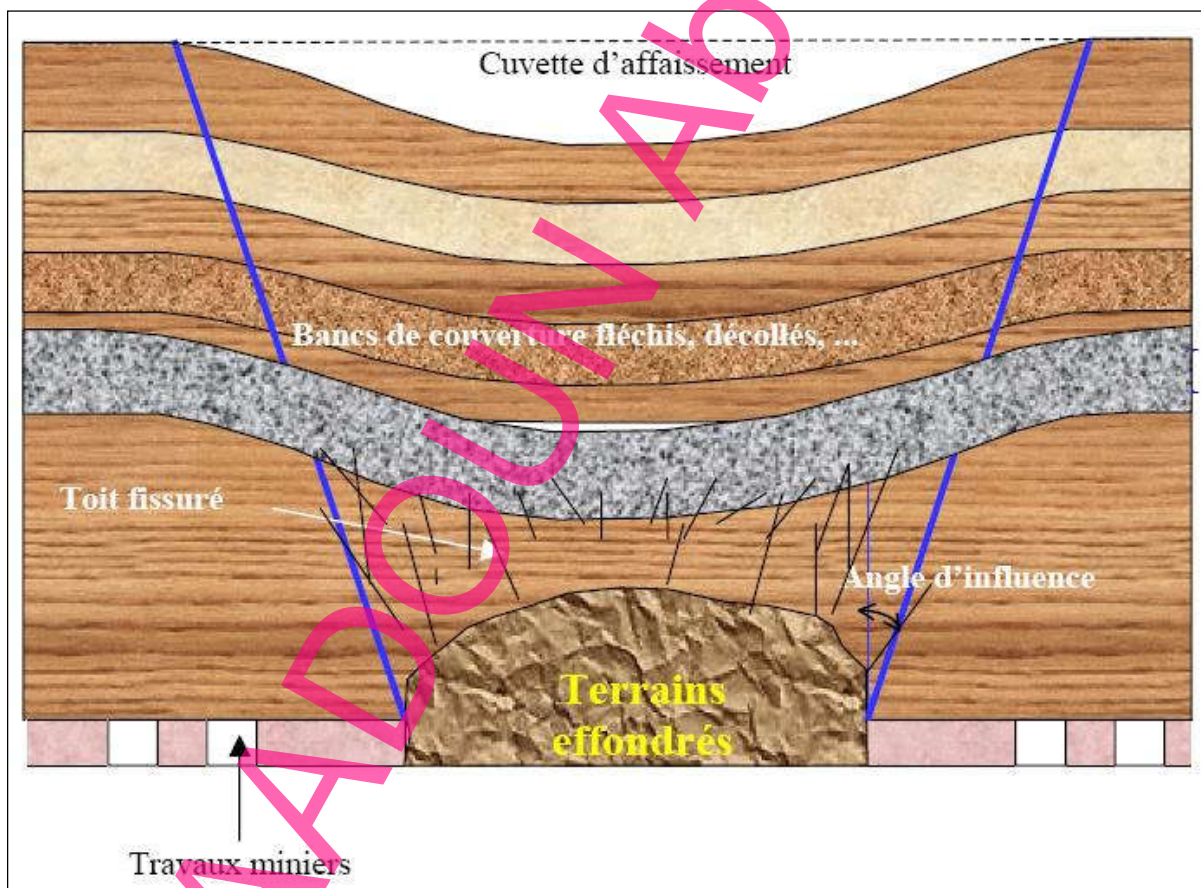


Figure .2. Formation d'une cuvette d'affaissement au-dessus de travaux miniers. [19]

### 1.3-Effondrement

#### 1.3.1- Mécanismes et phénomènes

Par opposition au phénomène d'affaissement, on parle d'effondrement (figure 3) lorsque l'abaissement de la surface se fait de manière discontinue dans le temps (événement rapide et brutal) et/ou dans l'espace (formation de fractures, de figures d'arrachement, de cratères...).

Les effondrements se caractérisent par un mouvement gravitaire à composante essentiellement verticale qui peut atteindre une amplitude sensiblement égale à la hauteur de la cavité sous-jacente ou de l'ouverture de la couche exploitée. Ce sont des phénomènes très spécifiques qui ne peuvent affecter que les mines souterraines exploitées par une technique permettant la persistance de vides souterrains



**Figure .3.** Tunnel de Patra avant et après l'effondrement (Grèce, août 1998)[19]

On différencie classiquement différents types d'effondrement en fonction de l'ampleur du phénomène, du contexte géologique, hydrogéologique et d'exploitation.

**Le fontis** On appelle fontis, une instabilité localisée qui s'initie par l'éboulement du toit d'une cavité souterraine d'assez faible extension et située à faible profondeur. Le phénomène, qui ne peut se stabiliser dans la configuration d'une cloche stable par effet

voûte, finit par déboucher brusquement en surface en créant un “ entonnoir ” dont le diamètre peut varier de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. Le terme de fontis désigne aussi bien le mécanisme d'effondrement que le cratère classiquement observé en surface. Les fontis se développent préférentiellement dans des zones où le toit présente de larges portées non soutenues (carrefours de galerie, piliers ruinés, chambres vides ou seulement partiellement remblayées). La présence d'un recouvrement peu épais constitué de matériaux peu cohérents et faiblement résistants (ex : sable, marnes ...) facilite la propagation de l'instabilité vers la surface et donc l'apparition du fontis (Fig. 4). [13]

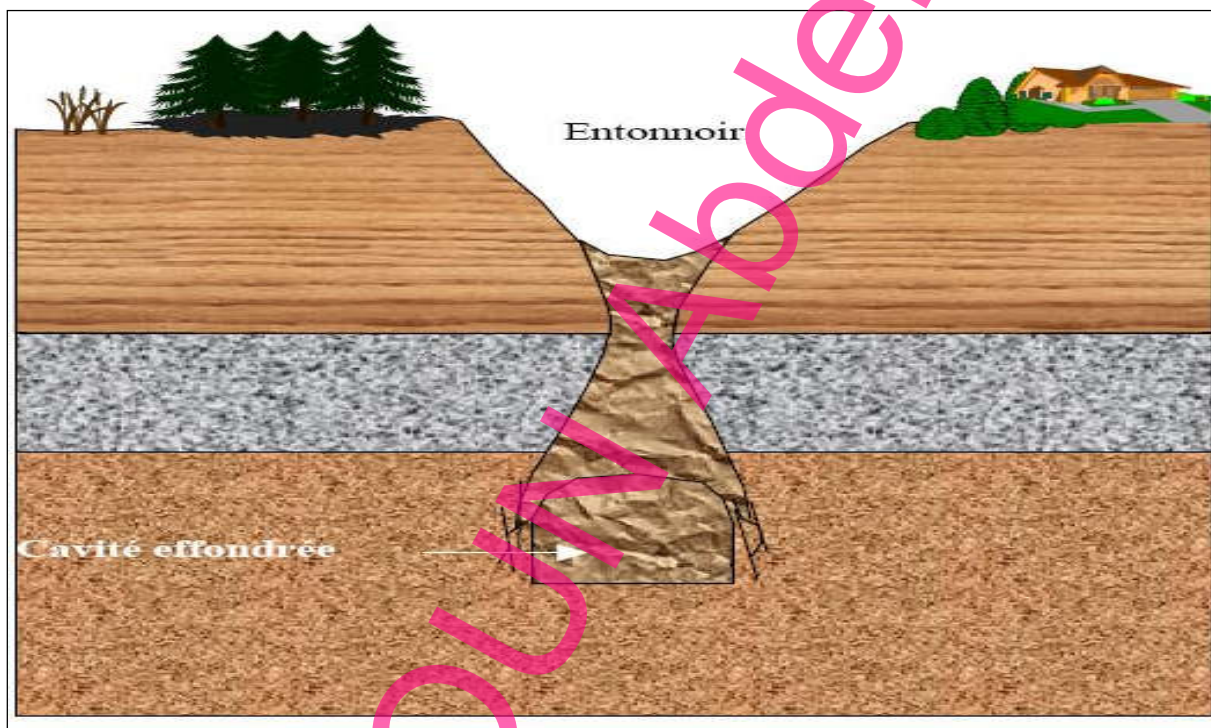


Figure .4. Formation d'un fontis au-dessus d'une cavité minière effondrée. [19]

#### 1.4- Affaissement dus aux exploitations par foudroyage

Dans le cas des exploitations par foudroyage, les vides souterrains ont été comblés par l'éboulement des terrains sus-jacents et par le foisonnement. Lorsque la zone foudroyée a atteint la largeur critique, des affaissements se produisent en surface. Ces affaissements se stabilisent au bout de quelques années. Le risque des mouvements ultérieurs est de ce fait très faible. Les répercussions en surface de ces mouvements demeureraient limitées.



### 1.5- Affaissement dus aux exploitations par remblayage

Lorsque l'exploitation se réalise avec remblayage des vides, les vides souterrains résiduels sont très réduits. Il n'est pas totalement exclu que se produise un tassement

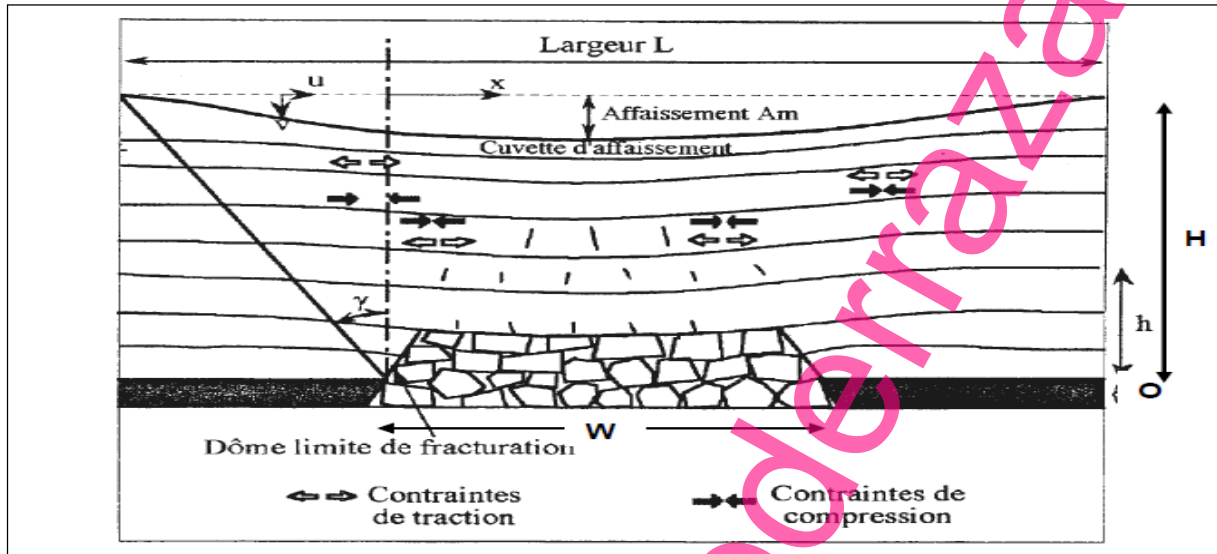


Figure .5. Schéma de base ayant servi à l'établissement des zones à risque [13]

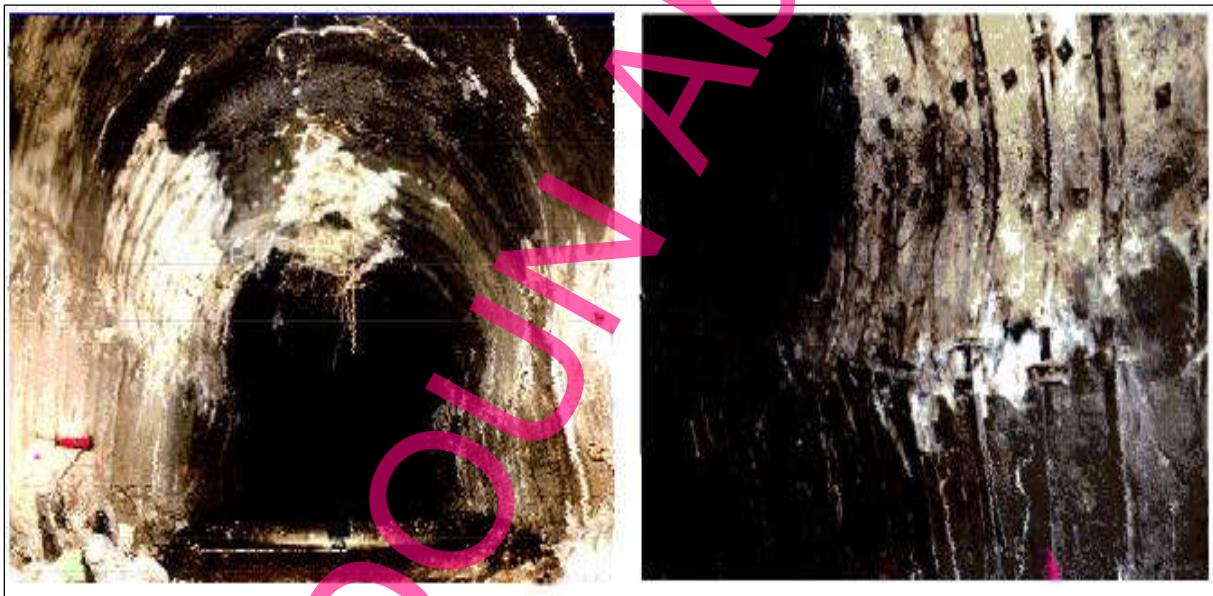
**Inondation** : c'est une conséquence de l'envahissement d'un ouvrage souterrain par une grande quantité d'eau souterraine ou par une grande quantité d'eau de pluie, ces phénomènes entraînent des pertes matérielles importantes et des arrêts de travaux dans les ouvrages souterrains affectés. L'inondation du tunnel routier de (Wushantou, Japon, 1992) est un bon exemple. La Fig 6 montre une partie des dégâts observés après cet accident.



Figure .6. Inondation du tunnel de Wushantou, Japon 1992 [20].

La catastrophe est due à l'infiltration de quantités considérables et non prévues d'eau de pluie dans l'ouvrage en construction.

**Fortes déformations (convergence extrême) :** il s'agit de la réduction de section associée aux fortes convergences qui compromet l'utilisation de l'ouvrage dans des conditions de sécurité optimale. La forte déformation peut résulter de plusieurs facteurs comme le gonflement, le fluage, les déformations plastiques, les contraintes tectoniques. Les conséquences de la convergence sont la fermeture de la section, la destruction du soutènement. Parfois, ce phénomène nécessite la ré- excavation de l'ouvrage souterrain. Le tunnel routier de Tymfristos en Grèce est un exemple exceptionnel de l'ampleur des déformations (convergence) pouvant être observées (Fig.7). Pendant l'exécution du tunnel une diminution de la section (diamètre) de l'ordre de 2 m a été mesurée. Par conséquent le soutènement provisoire a été totalement détruit et le tunnel a été ré-excavé.



**Figure .7.** Rupture de soutènement du tunnel routier de Tymfristos à cause d'une forte convergence [21].

***Tassement en surface ou tassement différentiel :***

Le creusement des ouvrages souterrains urbains dans de terrains meubles engendre, souvent, un tassement du sol au-dessus du tunnel, pouvant endommager les infrastructures situées en surface. Le tassement différentiel s'exprime par des déformations dues à la différence des valeurs des tassements des deux éléments

structuraux successifs du tunnel. Nous l'avons relevé notamment dans des tunnels immergés.

### *Les sous-groupes*

La base de données comporte deux sous-bases principales : celle des ouvrages affectés par les phénomènes d'instabilités pendant le creusement et celle des ouvrages affectés par les phénomènes d'instabilités pendant la phase de service ou exploitation (Fig. 8).

Les phénomènes d'instabilité ont été décrits par deux groupes de variables : un premier groupe de variables qualitatives caractéristiques du phénomène d'instabilité, de l'ouvrage lui-même et du milieu de construction et un deuxième groupe de variables quantitatives décrivant la géométrie et le positionnement de l'ouvrage (sa profondeur, son diamètre et sa longueur)

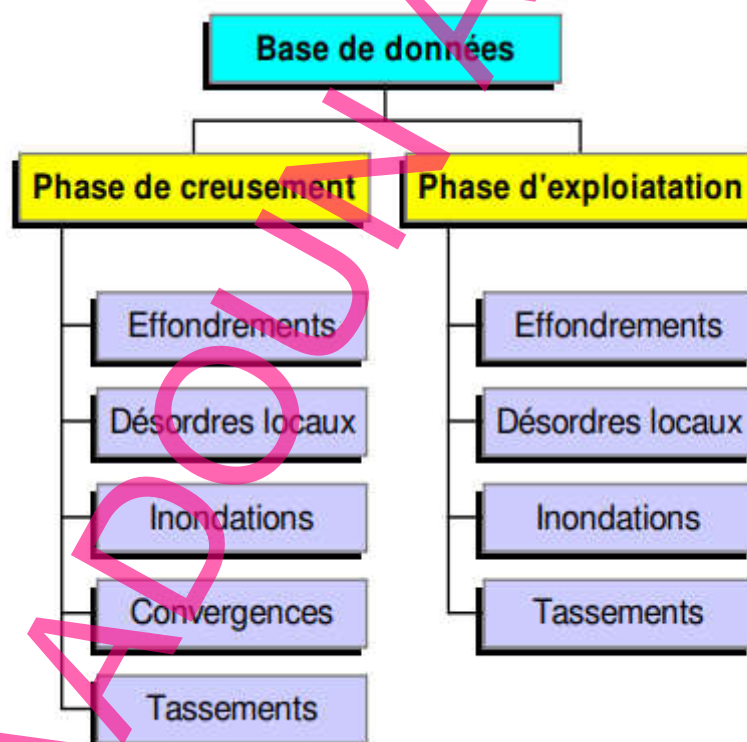


Figure .8 . Structure de la base de données des ouvrages souterrains [22].

**2- Comportement des terrains et stabilité des excavations minières souterraines**

Le creusement des excavations minières consiste à créer des vides dans l'épaisseur de l'écorce terrestre, ce qui provoque une certaine redistribution des contraintes autour de ces derniers. Auparavant, le massif vierge est en équilibre naturel, mais juste après commencement des travaux de creusement des excavations minières, des pressions s'exercent sur les roches qui affleurent dont la stabilité dépend de leurs propriétés physiques et mécaniques.

Pour évaluer la stabilité des excavations minières, on peut appliquer la formule structurale de stabilité.

$$m \cdot \delta \rightarrow H \cdot \gamma \cdot k_c \dots \dots \dots (1)$$

Où

**m** : coefficient de correction, tenant compte de la perte de résistance des roches, en fonction du temps et de l'humidité des roches. La valeur de ce coefficient peut être déterminée à l'aide du tableau 1.

**Tableau 1:** Estimation de coefficient de correction m en fonction de Durée de service de l'excavation et la nature des roches

Durée de service de l'excavation,( année)	m	
	Roches sèches	Roches humides
< 5	1,00	0,95
5 - 10	0,90	0,80
> 10	0,80	0,70

**δ** : paramètre de résistance des roches soit (compression ou traction) Kgf/cm<sup>2</sup> ou MPa

**k<sub>c</sub>** : coefficient de correction tenant compte de la concentration des contraintes, dépendant beaucoup plus de la forme de la section transversale de l'excavation ;

**γ**- masse volumique des roches (t/m<sup>3</sup>)

**H**- profondeur de l'excavation a creusé. (m)

On distingue quatre cas de stabilité :

### 2.1 -Premier cas de stabilité.

Le massif rocheux dans lequel doit être creusé l'excavation minière est entièrement stable. Cela veut dire que la résistance des roches du côté du toit, des parois et de la semelle (sole) est supérieure ou égale aux contraintes.

Résistance à la traction (horizontale)  $m. \delta_t > K_c^1. \gamma. H$

Résistance à la compression (verticale)  $m. \delta_c > K_c^2. \lambda. \gamma. H$

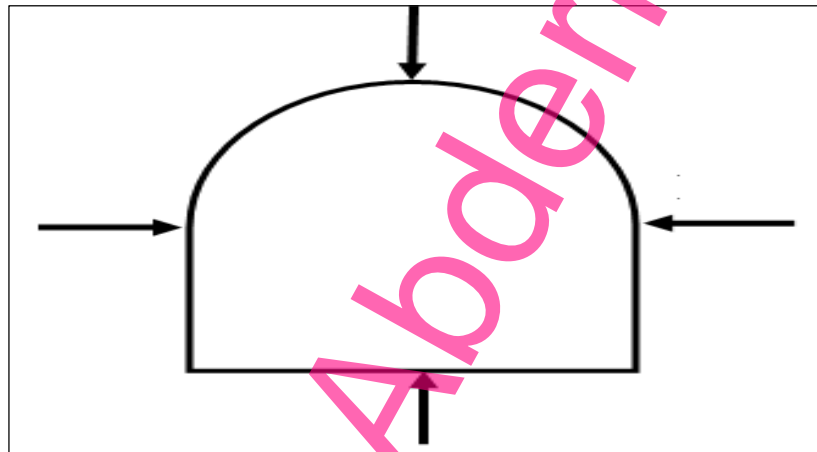


Figure .9. Distribution des résistances autour de l'excavation dans le 1<sup>er</sup> cas de stabilité

### 2.2 -Deuxième cas de stabilité.

Suivant ce cas, le massif rocheux dans lequel doit être creusé l'excavation est stable du côté des parois et la semelle de cette dernière, tandis qu'il est instable du côté du toit de l'excavation, ce qui exige un soutènement de ce dernier.

$m. \delta_t < K_c^1. \gamma. H$

$m. \delta_c > K_c^2. \lambda. \gamma. H$

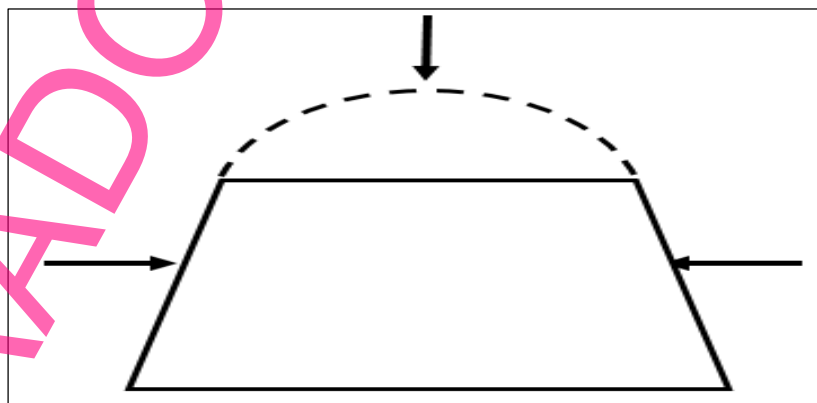


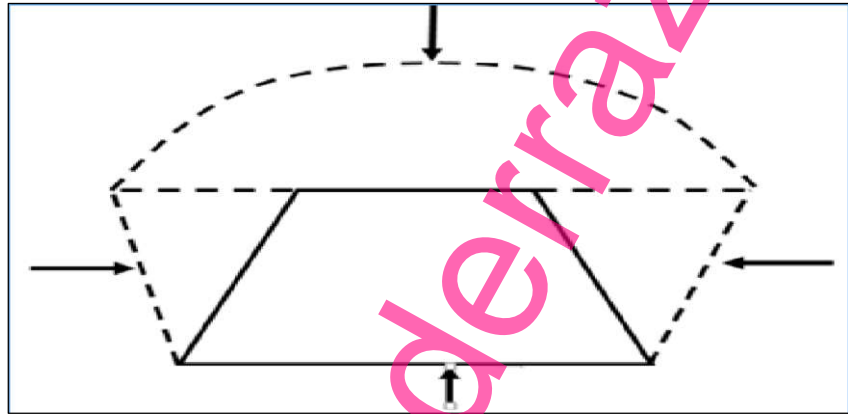
Figure .10. Distribution des résistances autour de l'excavation dans le 2eme cas de stabilité

### 2.3 -Troisième cas de stabilité.

Suivant ce cas de stabilité, la résistance des roches autour des parois et du toit est inférieure aux contraintes tandis que, elles sont supérieures ou égale à ces dernières du côté de la semelle (sole) de l'excavation. Des prismes de déformation se distinguent du côté des parois et la voute est beaucoup plus importante par rapport au deuxième cas de stabilité.

$$m. \delta_t > K_c^1 \cdot \gamma \cdot H$$

$$m. \delta_c < K_c^2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H$$



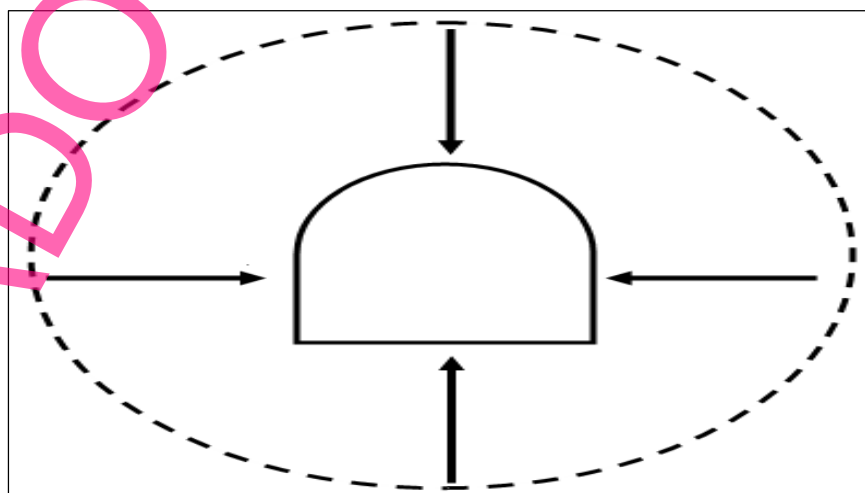
**Figure .11.** Distribution des résistances autour de l'excavation dans le 3eme cas de stabilité

### 2.4- Quatrième cas de stabilité.

Suivant ce cas de stabilité, la résistance des roches composant le massif rocheux dans lequel doit être creusé l'excavation minière est inférieure aux contraintes du côté du toit, des parois et de la semelle de l'excavation ce qui exige un soutènement et une forme adéquate de la section transversale de l'excavation minière. Des déformations suivant un large rayon sont distinguées autour de l'excavation.

$$m. \delta_t < K_c^1 \cdot \gamma \cdot H$$

$$m. \delta_c < K_c^2 \cdot \lambda \cdot \gamma \cdot H$$



**Figure .12.** Distribution des résistances autour de l'excavation dans le 4eme cas de stabilité

$\lambda$  : coefficient de correction tenant compte de l'affaiblissement de la structure du massif rocheux

Le choix des formes des sections transversales, des excavations minières souterraines, est conditionné par les propriétés physiques et mécaniques des roches composant le massif rocheux dans lequel doit être creusé l'excavation, la destination des excavations, leurs durées de service, la pression des terrains et le type du matériau de soutènement. Suivant ce dernier point, le soutènement des excavations minières peut être en bois, métallique, en béton, en fibres synthétiques, en béton armé et d'autres matériaux.

Pratiquement pour calculer le cas de stabilité dans des conditions concrètes, et relativement à la formule structurale de stabilité des excavations minières, on peut appliquer les formules suivantes :

**3- Profondeur limite pour le toit de l'excavation** : suivant laquelle son dépassement provoque la dislocation des roches et leurs cassements. Cette profondeur peut être calculée par application de la formule suivante :

$$H_L^T = \frac{K_{f1} \cdot \delta_t \cdot m}{\gamma \cdot n}, (\text{m}) \dots \dots \dots (2)$$

Où :

$K_{f1}$  : Coefficient de correction tenant compte de la fissuration des roches, ce coefficient varie entre 0,005 et 0,2

$\delta_t$  : Limite de résistance des roches du toit à la traction, tf/m<sup>2</sup> ou Kgf/cm<sup>2</sup> ou MPa

n: facteur de sécurité.

**4-Profondeur limite pour Les parois de l'excavation** :

Qui indique que s'il ya dépassement de cette profondeur il se produit cassure des roches et éboulement de ces dernières. On peut la calculer par application de l'expression mathématique suivante :

$$H_L^P = \frac{K_{f2} \cdot \delta_c \cdot m}{3,3 \cdot \gamma \cdot n}, (\text{m}) \dots \dots \dots (3)$$

Où ;

$K_{f2}$  : Coefficient de correction tenant compte de la fissuration des roches, ce coefficient varie entre 0,3 et 0,35 ;

$\delta_c$  : limite de résistance des roches des parois à la compression, tf/m<sup>2</sup>, Kgf/cm<sup>2</sup> ou MPa

### 5- Largeur limite de l'excavation :

Son dépassement provoque le gonflement des roches de la semelle (la sole) de l'excavation. On peut la calculer par application de la formule suivante :

$$B_L = \frac{K_e \cdot \delta_c \cdot m}{\gamma \cdot H} \dots \dots \dots (4)$$

Où:

$K_e$  : Coefficient de correction tenant compte du type de l'excavation, pour les galeries il est égal à 1,22 ; pour les travers bancs il est égal à 1,66 ; pour les autres types d'excavations il est égal à 1,4.

H : profondeur de l'excavation, (m)

On peut résumer les quatre cas de stabilité comme suite :

**Première cas :**  $H < H_L^T$  et  $H < H_L^p$  et  $B < B_L$

**Deuxième cas :**  $H > H_L^T$  et  $H < H_L^p$  et  $B < B_L$

**Troisième cas :**  $H > H_L^T$  et  $H > H_L^p$  et  $B < B_L$

**Quatrième cas :**  $H > H_L^T$  et  $H > H_L^p$  et  $B > B_L$

**B:** largeur de l'excavation (l'ouverture) a creusé, (m)

En fonction du cas de stabilité calculé, on peut choisir le type du soutènement sur la base du tableau suivant :



**Tableau 1.** Types de soutènement utilisés en fonction des cas de stabilité

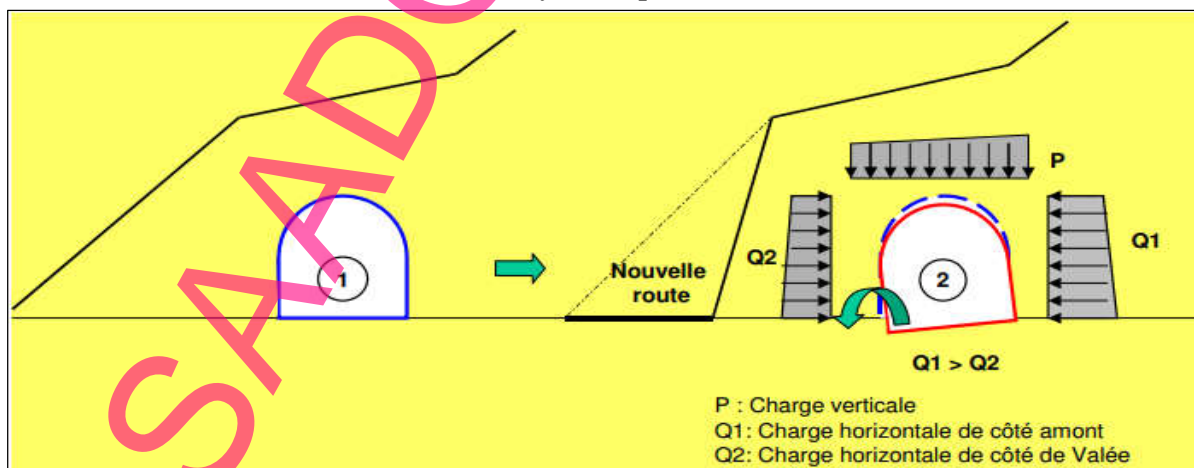
Cas de stabilité	Type de soutènement
I	1) sans soutènement ; 2) boulonnage du toit de l'excavation.
II	1) boulonnage du toit de l'excavation ; 2) béton injecté ; 3) béton injecté avec boulonnage ; 4) soutènement en bois.
III	1) soutènement métallique ; 2) soutènement en bois avec tamponnage des roches autour de l'excavation ; 3) soutènement en béton armé ; béton injecté avec boulonnage.
IV	1) Soutènement métallique avec tamponnage des roches ; 2) soutènement en béton armé.

## 6-Mécanismes de déformation de tunnels

Les tunnels subissent plusieurs déformations dues à différents modes de changement de la distribution du champ de contraintes autour du tunnel. L'analyse du système de contraintes autour des tunnels permet d'identifier plusieurs mécanismes de déformations des tunnels,

### 6.1- Déformation due aux forces horizontales asymétriques

Dans le cas des tunnels situés à proximité d'une vallée, une modification de la pente par la construction d'un autre ouvrage (une route par exemple) ou par un éboulement important peut engendrer une déformation du tunnel, la déformation est souvent due aux forces horizontales asymétriques.



**Figure .13.** Déformation due aux forces horizontales asymétriques [22].

Les forces horizontales sont clairement plus grandes du côté amont que du côté de vallée, la distribution des contraintes provoque la déformation du tunnel, souvent aggravée par un pivotement général dû au tassement des fondations du côté le plus bas.

### 6.2- Déformation due au manque de pression passive horizontale

Ce type de déformation se produit dans les tunnels et les ouvrages souterrains creusés dans des sols et des terrains meubles. Les terrains encaissants subissent des altérations importantes souvent dues à une charge supplémentaire au-dessus du tunnel (Fig. 14), par exemple à l'implantation de nouveaux ouvrages, un remblai .....etc.

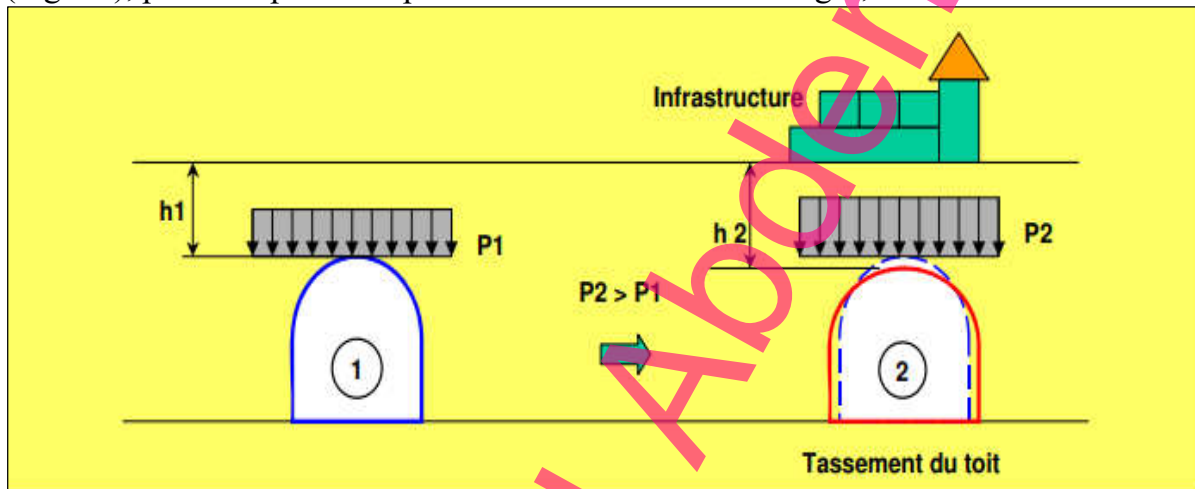


Figure .14. Déformation due au manque de pression passive horizontale [22].

### 6.3- Déformation due aux pressions horizontales (latérales) et verticales excessives

Ce cas est un exemple typique d'un terrain encaissant gonflant, les conséquences sont l'élévation de voûte et le soulèvement de radier, Fig 15, 16.

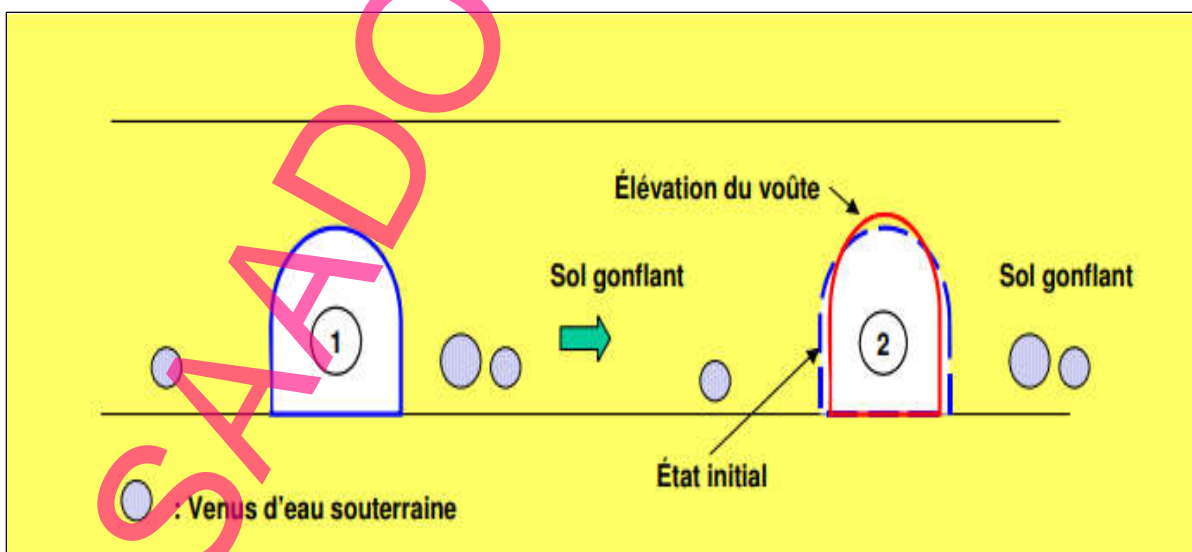


Figure .15. Déformation due aux pressions latérales excessives [22].

Les reconnaissances et études hydrogéologiques doivent être effectuées en même temps, que les reconnaissances et études géologiques et elles ont pour but de d'éviter les risques de déformation

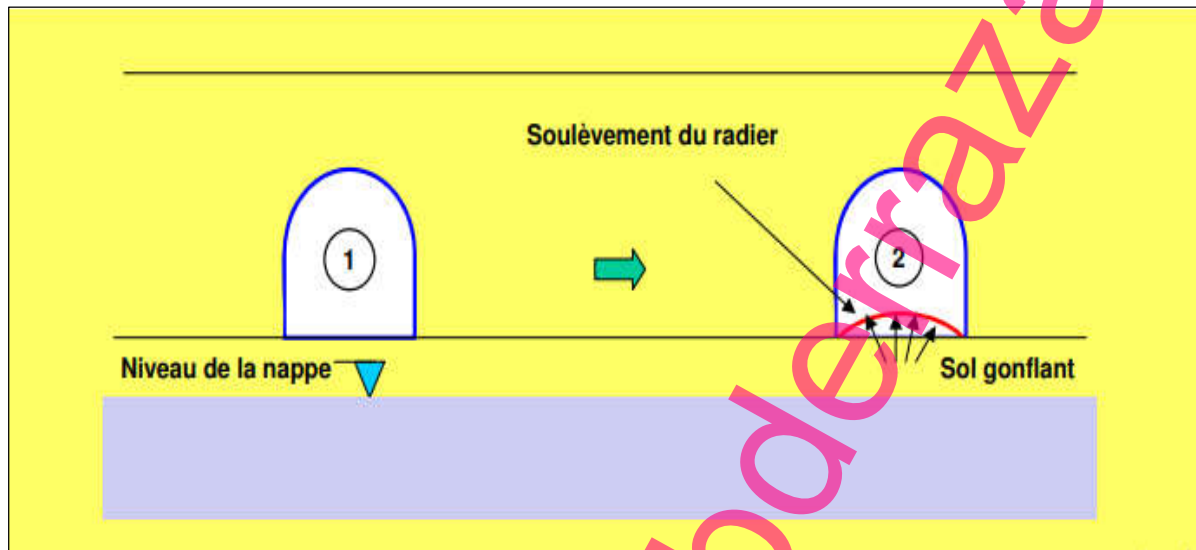


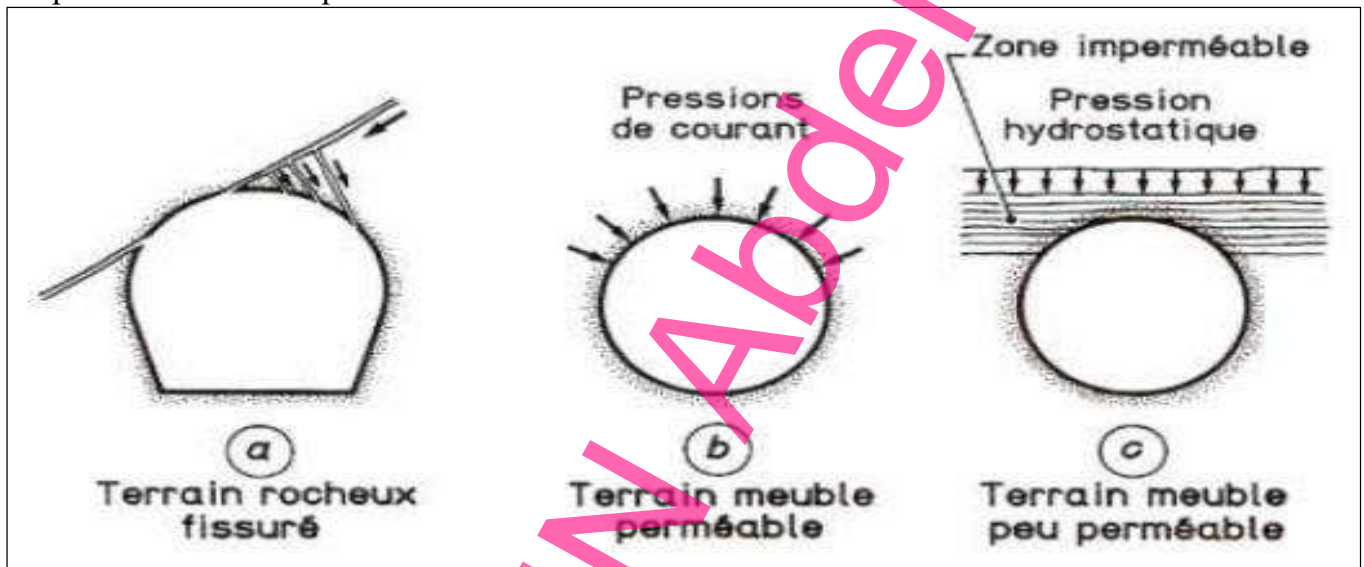
Figure .16. Déformation due aux pressions verticales excessives [22].

### 7-Rôle de l'eau dans les phénomènes d'instabilité

Qu'il s'agisse de massifs rocheux ou meubles, l'eau est très souvent présent dans le terrain sous forme de nappes statiques ou d'écoulements. Le fait de creuser une cavité modifie l'équilibre hydrostatique ou hydrodynamique par la création d'un nouvel exutoire. De nouveaux parcours d'écoulement se créent.

- Dans le cas d'un **massif rocheux fissuré** (Fig. 17a), l'eau utilise les fissures existantes où se concentrent les forces de courant dont l'action s'exerce en priorité sur les blocs situés en parement de la cavité souterraine. Les blocs peuvent être chassés un à un et créer de véritables « cloches » mettant en péril la stabilité de la cavité. Cette érosion régressive peut également se traduire par un déboufrage brutal des matériaux meubles qui remplissent parfois les fissures et par une irruption de débits d'eau importants et soudains qui sont à l'origine de bien des accidents et nécessitent des dispositions onéreuses pour la reprise des chantiers. L'eau peut agir à la fois par réduction des contraintes effectives auxquelles est soumis le matériau rocheux, par altération des surfaces des fissures et par réduction de l'angle de frottement interne du matériau de remplissage.

- Dans le cas d'un **massif meuble** semi-isotrope et relativement perméable (Fig. 17 b ), l'écoulement vers la cavité se fait plus régulièrement et les forces d'écoulement radiales s'ajoutent aux contraintes effectives sur le squelette solide. S'il s'agit de terrain peu perméable (Fig.17 c ) et si la vitesse de creusement est forte, l'essorage ne peut se faire au fur et à mesure de l'avancement et les gradients de pression peuvent être importants au voisinage de la paroi. Dans tous les cas, la présence de l'eau est un facteur très aggravant de l'instabilité. Chaque fois que de tels phénomènes sont à craindre, des dispositions préventives sont à adopter (forages à l'avancement, procédés spéciaux) pour réduire les risques d'accidents.



**Figure .17 .** Influence des écoulements d'eau dans le comportement des terrains [13].

### Conclusion

Les études de conception d'un projet de creusement des ouvrages souterrains soit dans le génie minier (différents excavations minières souterraines) ou bien en génie civil ( tunnel) débouchent sur la préconisation de procédés de construction, prenant en compte l'ensemble des contraintes liées au parti fonctionnel retenu, à l'environnement de l'ouvrage, et au terrain encaissant.

Selon le problème posé, l'analyse de ces facteurs conduit à limiter l'éventail des procédés de construction possibles. Le recours à tel ou tel procédé de construction doit être assorti de précautions d'exécution, souvent fondamentales et coûteuses, qui ne peuvent être définies sans étude préalable et quelquefois même sans essais in situ en vraie grandeur (galeries d'essais, essais de traitement des terrains...)

**Exercice d'application 1**

Pendant le creusement d'une galerie d'exploitation dans une mine souterraine en terrain humide ; ce galerie est situé à une profondeur égale 160 m et ayant une largeur égale 3,5 m.

Sachant que la durée de service de cette galerie est 15 ans et creusé au roche de nature calcaire ayant une résistance à la traction égale 700 kgf/cm<sup>2</sup> et résistance à la compression égale 7000 kgf/cm<sup>2</sup> et un masse volumique égale 2,7 t/m<sup>3</sup>, une étude géotechnique mentionné que la stabilité du terrain est moyen avec facteur de sécurité égale 1,15.

1) Quel cas de stabilité on applique pendant le creusement de cette galerie ?

On prend  $kf_1=0,2$  ,  $kf_2=0,35$

2) Quel type de soutènement utilisé pendant le creusement ?

**EXERCICE 2**

NB: deux chiffres après la virgule

Selon les données suivantes :

Type d'excavation : travers-banc

Nature des terrains : terrain sèche ;

Situé à une profondeur égale 90 m et sa largeur égale 8 m.

La durée de service est 33 ans

La résistance à la traction égale 60 MPa et la résistance à la compression égale 7000 kgf/cm<sup>2</sup>

Le poids volumique égale 25996,5 N/m<sup>3</sup>, L'accélération de pesanteur  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>.

Facteur de sécurité égale 2,75. Sachant que  $kf_1= 0,1$  et  $Kf_2=0,3$

Quel cas de stabilité on applique pendant le creusement de ce travers-banc ?

**Solution exercice 1**

Les quatre cas de stabilité sont:

*Première cas:*  $H < H_L^T$  et  $H < H_L^p$  et  $B < B_L$

*Deuxième cas:*  $H > H_L^T$  et  $H < H_L^p$  et  $B < B_L$

*Troisième cas:*  $H > H_L^T$  et  $H > H_L^p$  et  $B < B_L$

*Quatrième cas:*  $H > H_L^T$  et  $H > H_L^p$  et  $B > B_L$

Type d'excavation : Galerie d'exploitation donc  $K_e=1,22$

Terrain humide, durée de service 15 ans > 10 ans donc  $m=0,7$

*Profondeur limite pour le toit de l'excavation*

$$H_L^T = \frac{K_{f1} \cdot \delta_c \cdot m}{\gamma \cdot n}, (m)$$

$$H_L^T = \frac{0,2 \cdot 700 \cdot 0,7}{2,7 \cdot 1,15}$$

$$H_L^T = 31,56 \text{ m}$$

*Profondeur limite pour Les parois de l'excavation*

$$H_L^p = \frac{K_{f2} \cdot \delta_c \cdot m}{3,3 \cdot \gamma \cdot n} \quad (m)$$

$$H_L^p = \frac{0,35 \cdot 7000 \cdot 0,7}{3,3 \cdot 2,7 \cdot 1,15}$$

$$H_L^p = 167,37 \text{ m}$$

*Largeur limite de l'excavation*

$$B_L = \frac{K_e \cdot \delta_c \cdot m}{\gamma \cdot H} \quad (m)$$

$$B_L = \frac{1,22 \cdot 7000 \cdot 0,7}{2,7 \cdot 160}$$

Après le calcul on trouve  $B_L=13,83 \text{ m}$

D'après les résultats trouvés :  $H > H_L^T$  CTD (165 > 31,56)

$H < H_L^p$  CTD (160 < 167,37)

$B < B_L$  CTD (3,5 < 13,83)

Donc on applique le deuxième cas de stabilité

Type de soutènement utilisé pendant le creusement :

- 1) boulonnage du toit de l'excavation ;
- 2) bétons injectés ;
- 3) béton injecté avec boulonnage ;
- 4) soutènement en bois.

### Solution exercice 2

type d'excavation : travers bancs donc  $K_e=1,66$

Terrain sèche, durée de service 33 ans >10 ans donc  $m=0,8$

$K_{f1}=0,1$  et  $K_{f2}=0,3$

Résistance à la traction =60 MPA=600 kgf/cm<sup>2</sup>

Masse volumique égale  $25996,5/9,81=2650$  kg/m<sup>3</sup>=2,65 t/m<sup>3</sup>

#### Profondeur limite pour le toit de l'excavation

$$H_L^T = \frac{K_{f1} \cdot \delta_t \cdot m}{\gamma \cdot n} \quad (\text{m})$$

$$H_L^T = \frac{0,1 \cdot 600 \cdot 0,8}{2,65 \cdot 2,75}$$

$$H_L^T = 6,58 \text{ m}$$

#### Profondeur limite pour Les parois de l'excavation

$$H_L^P = \frac{K_{f2} \cdot \delta_c \cdot m}{3,3 \cdot \gamma \cdot n} \quad (\text{m})$$

$$H_L^P = \frac{0,3 \cdot 7000 \cdot 0,8}{3,3 \cdot 2,65 \cdot 2,75}$$

$$H_L^P = 69,85 \text{ m}$$

#### Largeur limite de l'excavation

$$B_L = \frac{K_e \cdot \delta_c \cdot m}{\gamma \cdot H} \quad (\text{m})$$

$$B_L = \frac{1,66 \cdot 7000 \cdot 0,8}{2,65 \cdot 90}$$

$$B_L = 38,97 \text{ m}$$

$$\text{On a: } H > H_L^T \quad \text{CTD} \quad (90 > 6,58)$$

$$H > H_L^p \quad \text{CTD} \quad (90 > 69,85)$$

$$B < B_L \quad \text{CTD} \quad (8 < 38,97)$$

Donc on applique le troisième cas de stabilité pendant le creusement

SAADOUN Abderrazak



# Chapitre III. Creusements des excavations horizontales et inclinés

## Introduction

Un des aspects majeurs de la conception d'un ouvrage souterrain est de connaître les conditions de stabilité du front de taille. Cette connaissance joue un rôle capital pour le choix de la méthode de creusement utilisée et, bien sûr, pour la sécurité des travaux. C'est aussi pendant la période allant jusqu'à la mise en place des éléments de soutènement définitifs, que se produit, en général, la plus grande partie des tassements.

La conception des ouvrages souterrains demande des calculs complexes et l'identification des propriétés géomécaniques des massifs rocheux qui abriteront les ouvrages.

### 1- Evaluation des ouvrages souterrains dans les phases de réalisation

Il existe plusieurs méthodes qui ont été utilisées depuis le passé pour l'analyse de la stabilité dans les phases de creusement et constructions des ouvrages souterrains dans le secteur minier, elles se basent sur 3 théories sont :

- la théorie de concentration des contraintes
- la théorie de l'effet de voûte (creusement à faible profondeurs)
- la théorie du milieu élastique (confinement –convergence)

Les premières méthodes considéraient que le soutènement devrait supporter le poids du volume de terrain décomprimé situé à une zone de décompression, les dimensions de cette zone étaient déterminées par des formules empiriques basées sur l'expérience accumulée.

Lors de la conception, plusieurs méthodes de calculs (empiriques, analytiques, numériques...etc.) aident à déterminer les contraintes auxquelles sont soumis les ouvrages souterrains et permettent de choisir les méthodes d'excavation et de soutènement optimales à utiliser.

Les interactions entre les conditions géologiques et les méthodes de construction sont un des enjeux fondamentaux des projets basés sur géotechnique minière souterraine.

ou bien 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 d'ouvrage souterrains et des conditions géologiques est extrêmement large, mais on peut citer au moins deux catégories extrêmes : -bien récupération des minéraux utiles dans les mines souterrains et -sécurité à long temps dans la construction du tunnel.

## 2-Principaux étapes de l'exploitation minière souterraine [23] .

L'extraction des gisements des minéraux utiles par application d'une technologie minière souterraine, doit impérativement passer par des étapes distinctes suivant un ordre rigoureux, à savoir :

\* **Ouverture des gisements** : c'est le premier stade de l'exploitation souterraine. Ce processus technologique consiste à creuser, et construire (à partir de la surface terrestre) des excavations minières donnant accès au corps minéralisé (gisement des minéraux utiles). On distingue les excavations minières, servant à l'ouverture, suivantes ; puits de mines, les recettes, travers banc, galerie au jour, montage capital etc.

\* **Préparation des gisements** : c'est un processus technologique, qui consiste, une fois que le gisement est atteint, de diviser ce dernier en portions (étage, bloc, panneau) par le creusement de différente excavation minière.

\* **Dépilage**, est un processus technologique, qui consiste à extraire la matière minéralisée d'un gisement, et procéder à un soutènement adéquat des excavations minières créés par la conduite des travaux miniers.

Dans l'exploitation minière souterraines, les principaux méthodes utilisé dans l'excavation et l'exploitation des gisements minéraux incliné et dressant et les gites métallifères peuvent être classées de la manière suivante

- 1) Méthode d'exploitation par chambres-magasins ;
- 2) Méthode d'exploitation par chambres vides ;
- 3) Méthode d'exploitation par chambres foudroyées ;
- 4) Méthode d'exploitation par chambres boisées ou charpentées ;
- 5) Méthode d'exploitation par chambres remblayées ;

Aussi, Il existe plusieurs méthodes d'exploitation applicable gisements en plateure, telle que :

- 1) L'exploitation par chambres et piliers.
- 2) L'exploitation par longue taille.

### **2.1-Reconnaissances essentielle dans le creusement des ouvrages souterrains**

Nous noterons l'existence des galeries minières et autres ouvrages miniers souterrains qui s'apparentent aux tunnels réalisés dans le génie civil et génie minier par leur méthode de dimensionnement et leur mode de creusement.

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont, plus que tout autre, des facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage souterrain. Non seulement ces conditions ont une grande influence sur le choix des méthodes d'excavation, des soutènements et des revêtements mais de plus, se trouver face à un problème imprévu comme par exemple la traversée d'un accident géologique avec venues d'eau sous forte pression, est ce qui peut arriver de pire au concepteur d'un ouvrage.

### **2.2- Facteurs de choix du tracé et du profil de creusement de l'ouvrage**

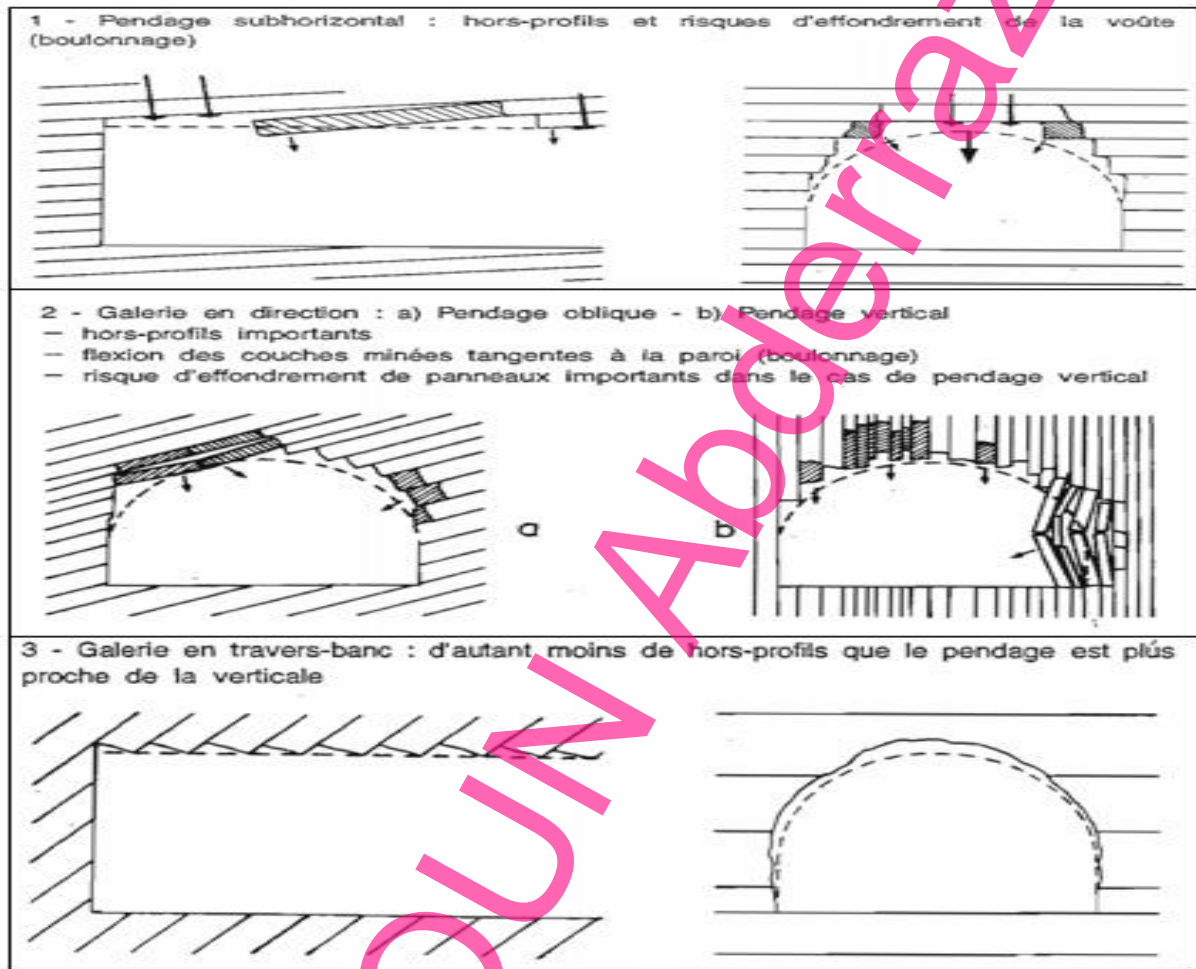
Le tracé en plan et en profil en long d'un ouvrage souterrain (galerie, tunnel ....) doivent respecter les conditions imposées par l'utilisation future de l'ouvrage, mais ils sont également conditionnés par :

- La nature des terrains à creusé et traverser
- La présence d'eau et les débits d'eau prévisibles
- L'orientation des ouvrages par rapport aux principales directions de discontinuités, la figure 1 donne quelques exemples
- La présence d'accédant géologique : On appelle couramment par ce nom un tronçon ou le terrain à traverser et de très mauvaise tenue et dont l'excavation nécessite modification fondamentale des méthodes d'exécution (c'est par exemple un tunnel au rocher rencontrant une zone faillée avec venues d'eau en charge nécessite un traitement à l'avancement par injections)

-Nature et épaisseur des terrains

-L'emplacement des têtes de l'ouvrage es qui nécessite une étude particulière : il faut éviter autant que possible les zones instables, les zones humides

-L'orientation et la valeur des contraintes principales naturelles, la recherche notamment d'éventuelles contraintes résiduelles tectoniques élevées



**Figure 1.**Influence de l'orientation de la stratification sur la stabilité des parois de la galerie [24]

Plusieurs méthodes de description et de classification des roches ont été développées, notamment ces dernières années, spécifiquement en vue du dimensionnement des ouvrages souterrains par Association Française des Travaux en Souterrains.(AFTES) Elle vise à définir des paramètres quantifiables que puissent recouvrir toutes les qualités du rocher, ainsi qu'un mode de quantification qui soit le plus universel possible. Aussi, le principal mérite de ces classifications réside dans le fait que si elles sont largement utilisées, elles facilitent la transmission de l'expérience.

Le tableau 1 présente la classification de l'orientation des discontinuités dans la condition de creusement selon AFTES

Tableau 1. Classification AFTES selon l'orientation des discontinuités [24]

Orientation des discontinuités			Conditions du Creusement	
Classe	Angle entre pendage et axe d'avancement de creusement $\lambda$	Pendage $\beta$		
OR1	quelconque	0 à 20°	en bancs subhorizontaux	
OR2	a	0 à 30°	En travers blanc	(a) avec le pendage
	b			(b) contre le pendage
OR3	30 à 65°	20 à 90°	conditions intermédiaires	
OR4	65 à 90°	20 à 60°	En direction	(a) pendage moyen
		60 à 90°		(b) pendage fort

La fracturation des massifs rocheux autour d'excavation minière (roches massive, roche fracturée et roche extrêmement fracturés) et la distribution des contraintes joue un rôle très important dans la stabilité des ouvrages, la Fig.2 explique quelques classes d'orientation (OR)

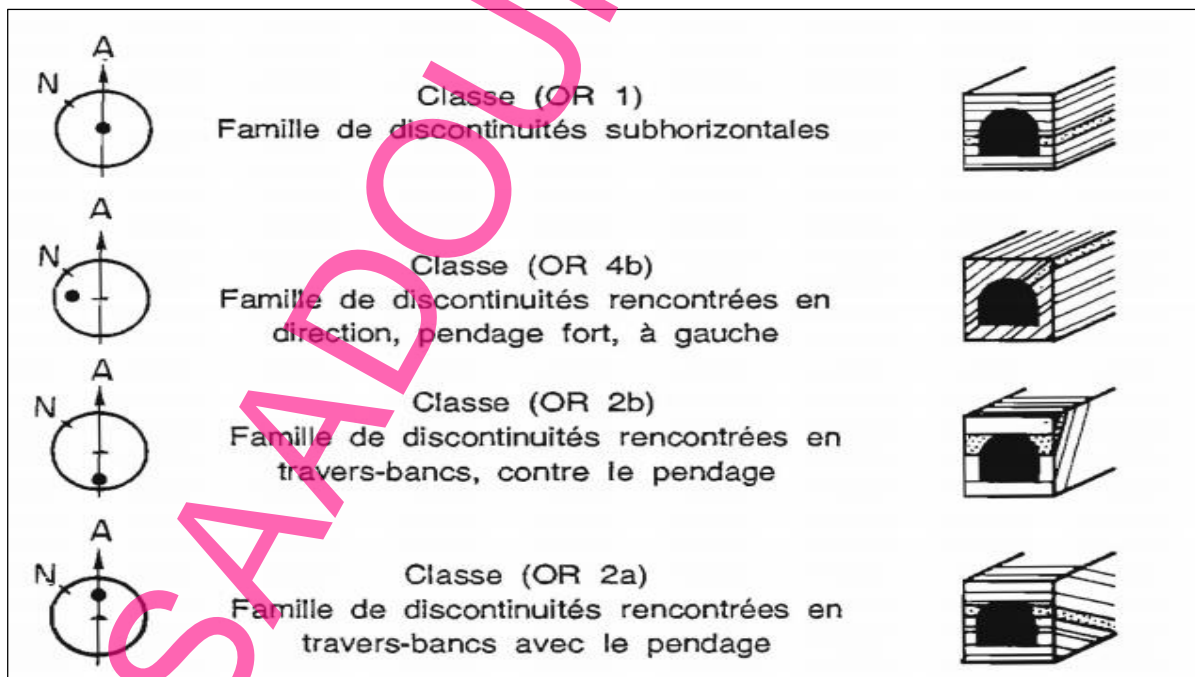


Figure.2. Illustration schématique de quelques classes d'orientation (OR) [24]

### 3-Classification des massifs rocheux et pré-dimensionnement des ouvrages souterrains

Au stade des études préliminaires, on dimensionne fréquemment les ouvrages souterrains à partir des classifications des massifs rocheux ; ces méthodes sont en effet rapides d'emploi, donc économiques.

Il existe de nombreuses méthodes de classification se basant sur différents paramètres géotechniques. C'est le choix de ces paramètres et la façon de les utiliser pour le dimensionnement de l'ouvrage qui font la différence d'une méthode à l'autre.

Parmi les méthodes empiriques actuellement les plus utilisées, à savoir celles de:

- L'AFTES
- Z. BIENIAWSKI
- N. BARTON.

Les méthodes de dimensionnement de piliers de mines peuvent être classées en deux catégories, chacune correspondant à une approche différente. La première catégorie regroupe les méthodes qui postulent que le pilier est en compression uniaxiale à la manière d'une éprouvette dans une presse hydraulique. Cette catégorie comprend les méthodes de dimensionnement les plus anciennes c'est les méthodes empiriques.

Dans la deuxième catégorie, on retrouve les méthodes qui n'imposent aucune simplification sur le champ de contrainte dans le pilier. Avec ces méthodes, les champs de contraintes requis pour le dimensionnement de piliers s'obtenaient par des techniques expérimentales comme la photoélasticité. Maintenant, ils sont générés par les méthodes numériques informatisées comme celles des éléments finis et différence finis utilisé Plaxis 3D et Flac 3D....

Les méthodes empirique se basent sur des retours d'expérience de chercheurs et de scientifiques ainsi que certains théorèmes. Elles prennent en considération les paramètres géotechnique s issus des essais et analyses réalisés sur les massifs rocheux ou au laboratoire et donnent par la suite des notes de classification aux massifs. À partir de ces notes on peut prévoir le dimensionnement ainsi que les méthodes d'excavation et de soutènement à adopter.

A titre d'exemple, le présent chapitre expose les méthodes empiriques actuellement les plus utilisées, à savoir celles de la méthode de Terzaghi, méthode de Protodiakonov, la méthode de l'aire tributaire, le Q system et Recommandations de l'AFTES

### 3.1-La méthode de Terzaghi

Cette méthode étant l'une d'est plus anciennes utilisées dans la conception des tunnels a été publiée par K. TERZAGHI en 1946. Elle s'intéresse à un volume de terrain décomprimé (la cloche) par les effets du creusement, qu'il considère par la suite pour estimer les caractéristiques du soutènement à adopter. La répartition horizontale de la surcharge sur le terrain surplombant la cavité sera considérée comme uniforme.

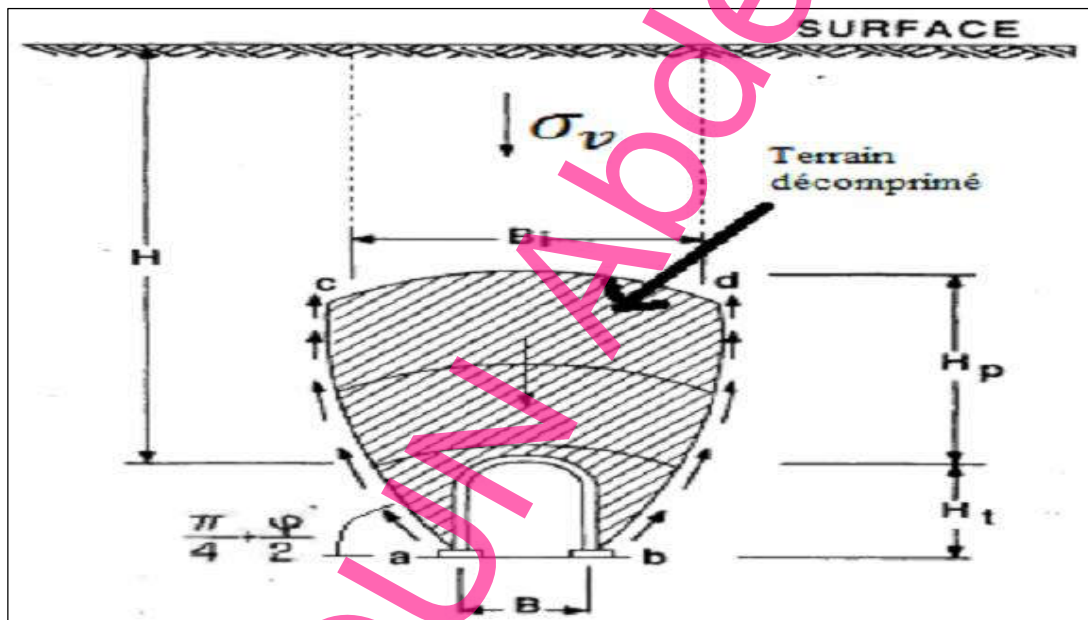


Figure 3. Zone décomprimée au-dessus d'une cavité [24]

Le principe de cette méthode est comme suite :

- Elles supposent une cinématique de rupture ou de décompression du terrain autour de l'ouvrage et proposition d'une charge apportée par le sol sur le soutènement.
- Calcul du soutènement à partir d'une hauteur de terrain décomprimée (cloche) au-dessus de la voûte
- Dimensions de la cloche en fonction des caractéristiques du terrain

Donc le poids de la pression  $W_t$  ou  $\sigma_v$ , le système d'équilibre doit supporter le bloc de dimensions  $B_t \times H_p$ , l'envergure de cette voûte dépend des caractéristiques de la roche entourant l'ouvrage (tunnel ,galerie, recoupe.....etc) et ses dimensions.

Pour le calcul la largeur de la voûte  $B_t$  ou  $X_b$  on applique la formule :

$$B_t = X_b = b + 2.H.tg\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2}\right), (m) \dots\dots\dots(1)$$

Les pressions verticales et horizontales exercé sur la voûte sont calculés par les relations suivantes :

$$\sigma_v = \frac{\gamma X_b}{2K \tan \phi} \left[ \left( 1 - e^{-\left(\frac{K \tan \phi \cdot 2D}{X_b}\right)} \right) \right], (Pascal) \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_H = 0,3. (0,5 H_t. \gamma + \sigma_v), (Pascal) \dots\dots\dots(3)$$

Où:

$B$ : largeur du tunnel ( Largeur de l'ouverture de l'ouvrage),(m)

$H_t$ : Hauteur du tunnel (Hauteur de la galerie), (m)

$H$  : Profondeur du tunnel,(m)

$\gamma$ : poids volumique des roches (N/m<sup>3</sup>)

$\phi$  : angle de frottement interne des roches,(°)

$K$  = coefficient variable suivant la nature du terrain

La méthode de Terzaghi préconise que le calcul du soutènement ce fait à partir d'une hauteur de terrain décomprimé (cloche)

La classification de Terzaghi devise les massifs rocheux en 9 catégories à partir d'un facteur appelé: **facteur de chargement (Rock load factor)  $H_p$**  dont la hauteur est donné par la relation suivante :

$$H_p = K. (B + H_t) \dots\dots\dots(4)$$

Les différents cas de calcul de facteur de chargement de différentes natures des roches avec les remarques de soutènement sont présentés dans le tableau 2.



Tableau2. Différent cas de calcul le facteur de chargement [25]

Nature de la roche	Charge $H_p$	Remarques
Dure et intacte	0 à 0.25 B	Quelques ancrages s'il y a chute de pierres
Dure et stratifiée	0 à 0.5 B	Soutènement léger
Massive avec quelques joints	0 à 0.25 B	La charge peut changer brusquement d'un point à l'autre
Modérément éboulouse	0.25 à 0.35 (B+H <sub>t</sub> )	Pas de pression latérale
Très éboulouse	0.35 à 1.1 (B+H <sub>t</sub> )	Peu ou pas de pression latérale
Complètement broyée Chimiquement inerte	1.1 (B+H <sub>t</sub> )	Pression latérale considérable
Roche fluante à profondeur modérée	1.1 à 2.1 (B+H <sub>t</sub> )	Grande pression latérale Cintres circulaires recommandés
Roche fluante à grande profondeur	2.1 à 4.5 (B+H <sub>t</sub> )	Grande pression latérale Cintres circulaires recommandés
Roche gonflante	jusqu'à 75 m indépendant de (B+H <sub>t</sub> )	Cintres circulaires Dans les cas extrêmes, cintres coulissants

### 3.2-Méthode de M. PROTODIAKONOV [26]

D'autres auteurs ont proposé par la suite d'autres formules pour des domaines d'emploi plus spécifiques.

C'est le cas de la méthode découlant de la théorie de M. PROTODIAKONOV qui s'est généralisée grâce aux bonnes expériences faites pendant la construction des tunnels du métro soviétique. Elle est basée sur la recherche de la forme de la voûte de terrain décomprimée au-dessus de l'excavation (Fig. 4).

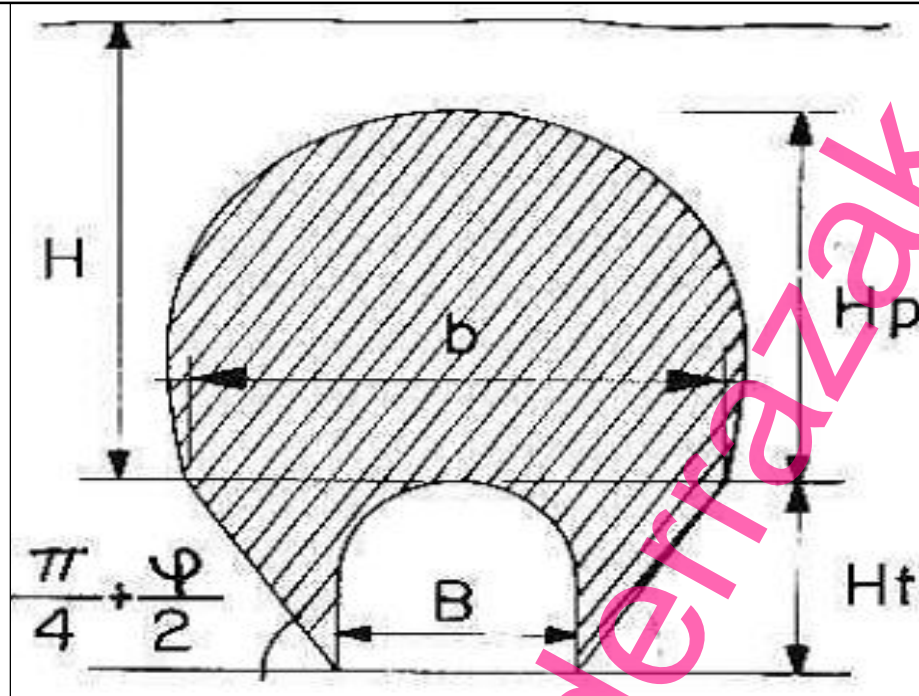


Figure .4.Zone décomprimée au-dessus d'une cavité [24]

Selon cette théorie cette voûte est de forme parabolique. Sa hauteur  $H_p$  vaut :

$$H_p = \frac{b}{2f} \text{ , (m).....(5)}$$

Où:

$b$  : est largeur de base de la parabole (figure. 3). La valeur de  $b$  est donnée par la formule :

$$b = B + 2 \cdot H_t \cdot \text{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\phi}{2} \right), \text{ (m).....(6)}$$

$f$ : est un coefficient de résistance, fonction des caractéristiques du matériau.

Les valeurs de  $f$  en terrain rocheux sont indiquées dans le tableau .3.

En terrain granulaire, M. PROTODIAKONOV [26] considère que  $f = \text{tg}\phi$ .

Cette méthode serait satisfaisante pour les tunnels situés à une profondeur  $H$  telle que

$$\frac{b}{2f} < H < \frac{b}{f}, \text{ (m).....(7)}$$

Lorsque la hauteur de couverture est plus faible, le soutènement devrait être dimensionné en tenant compte de la pression géostatique totale

$$P_v = \gamma \cdot H, \text{ (Pas).....(8)}$$

**Tableau .3** Coefficient de résistance  $f$  des roches (d'après Protodiakonov) [26]:

Nature de la roche	Description	Masse volumique (t/m <sup>3</sup> )	Coefficient de résistance $f$
Résistance extrêmement élevée	Basaltes, quartzites Granite le plus dure	2,8-3,0	20
Résistance élevée	Roches granitiques- Grès et calcaires de très bonne tenue	2,6-2,7	10
Roche de bonne tenue	Calcaires légèrement fracturés - Grès de bonne tenue	2,5	8
Roche assez résistante	Grès ordinaire	2,4	6
Résistance moyenne	Schistes divers – Marnes compactes	2,4-2,6	3
Roche meuble	Argiles compactes Alluvions cohérentes -Sols argileux	2,0-2,2	1

### 3.3- Méthode de l'aire tributaire

Les piliers de mines sont des blocs de minerai (soutènement naturel) laissés en place entre deux ou plusieurs excavations de production. Leur fonction est d'assurer un soutènement afin de minimiser les déplacements du massif rocheux dans la zone d'influence de l'excavation. Cependant lors du dimensionnement des piliers, nous devons choisir la quantité minimum de minerai à laisser en place. Cette quantité de minerai dans le pilier doit permettre le soutènement minimum nécessaire afin d'assurer la stabilité des excavations tout en assurant un taux de défrètement le plus élevé possible.

Le principal objectif du dimensionnement des excavations pour un ingénieur est d'en assurer la stabilité à court et/ou long terme à un coût minimum. Pour ce faire, l'ingénieur doit être capable de prédire le comportement de l'excavation pendant et après sa réalisation en déterminant les charges qui s'exercent sur les éléments de soutènement, la relation contrainte-déformation de ces derniers et leur résistance. La méthode convergence-confinement ou méthode des lignes caractéristiques, appliquée aux piliers de mines et qui représente l'interaction entre la poussée du massif et la réaction du pilier, peut être avantageusement utilisée pour dimensionner les structures en chambre et pilier ou tout simplement pour vérifier la stabilité de ces dernières. Cette méthode possède un avantage certain de par sa simplicité par rapport aux modèles numériques complexes

qui nécessitent un grand nombre de paramètres qui ne sont pas toujours connus ou disponibles.

La méthode de l'aire tributaire est la plus simple méthode pour déterminer la charge d'un pilier. Cette méthode permet, à partir de seulement quelques données, de déterminer la charge d'un pilier. La théorie de l'aire tributaire suppose qu'après l'excavation, le pilier supporte le poids des terres contenues dans un prisme imaginaire augmenté. S'étendant du niveau de l'excavation à la surface libre (Fig.5).

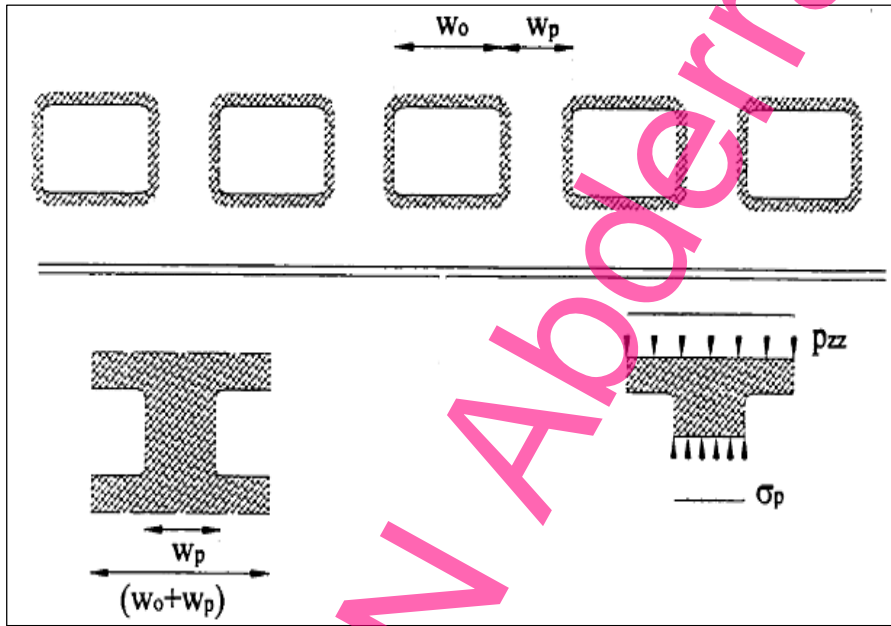


Figure .5. Théorie du bloc tributaire cas de piliers mur montrés en section longitudinale [27]

En utilisant les symboles de la figure 5, la théorie de l'aire tributaire accepte que la charge moyenne du pilier puisse être obtenue des équations suivantes :

1)- **Pour un pilier mur** : la contrainte axiale moyenne du pilier est définie par :

$$\sigma_p = P_{zz} \cdot \frac{(W_0 + W_p)}{W_p}, \text{ (Pascal)} \dots \dots \dots (9)$$

Où:

$P_{zz} = \sigma_v$  : Contrainte verticale de l'état initial des contraintes, (pas)

$W_0$ : Largeur de l'excavation, (m)

$W_p$ : Largeur du pilier, (m)

Si la contrainte verticale de l'état initial est due uniquement à la gravité ; on a :

$$P_{zz} = \sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i, \text{ (pas)} \dots \dots \dots (10)$$

$\gamma_i$  : Poids volumique propre du roche de surplomb pour la couche i.(N/m<sup>3</sup>)

$h_i$  : Épaisseur de la couche i.(m)

Si nous définissons un taux global de défruitement **r**:

$$r = \frac{\text{air exploitée}}{\text{Aire totale}} \dots \dots \dots (11)$$

$$r = \frac{W_0}{W_0 + W_p} \dots \dots \dots (12)$$

$$1 - r = \frac{W_p}{W_0 + W_p} \dots \dots \dots (13)$$

L'équation du pilier mur peut alors s'écrire:

$$\sigma_p = \sigma_v \cdot \frac{1}{1-r} \dots \dots \dots (14)$$

2)-*Pour des piliers colonnes* (Fig. 6) a section droite rectangulaire, le taux de défruitement devient :

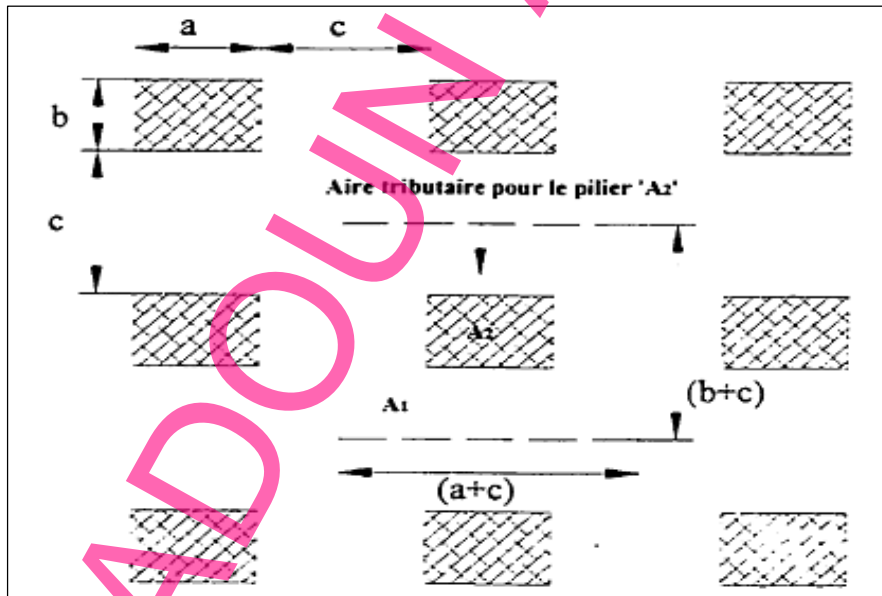


Figure .6. Théorie du bloc tributaire cas de piliers colonne montrés en plan [27]

$$r = \frac{(a+c)(b+c) - ab}{(a+c)(b+c)} \dots \dots \dots (15)$$

Avec :

**a,b**: largeur et longueur des piliers

C: distance entre les piliers (largeur de la chambre) en mètre

Ce qui permet de calculer la contrainte axiale moyenne des piliers  $\sigma_p$ :

$$\sigma_p = \sigma_v \cdot \left[ \frac{(a+c)(b+c)}{ab} \right] \dots\dots\dots(16)$$

3)-pour les piliers carrés on a:  $a = b$  alors:

$$\sigma_p = \sigma_v \cdot \left[ \frac{(a+c)}{a} \right]^2 = \sigma_v \cdot \left[ \frac{(W_0+W_p)}{W_p} \right]^2 \dots\dots\dots(17)$$

Finalement Hoek et Brown (1980) donnent une équation pour calculer la contrainte axiale moyenne des *piliers irréguliers*. Cette équation est représentée par formule 18 et est illustré à la Fig. 7:

$$\sigma_p = P_{zz} \cdot \frac{\text{air tributaie}}{\text{Aire du pilier}} = P_{zz} \cdot \frac{A_1}{A_p} \dots\dots\dots(18)$$

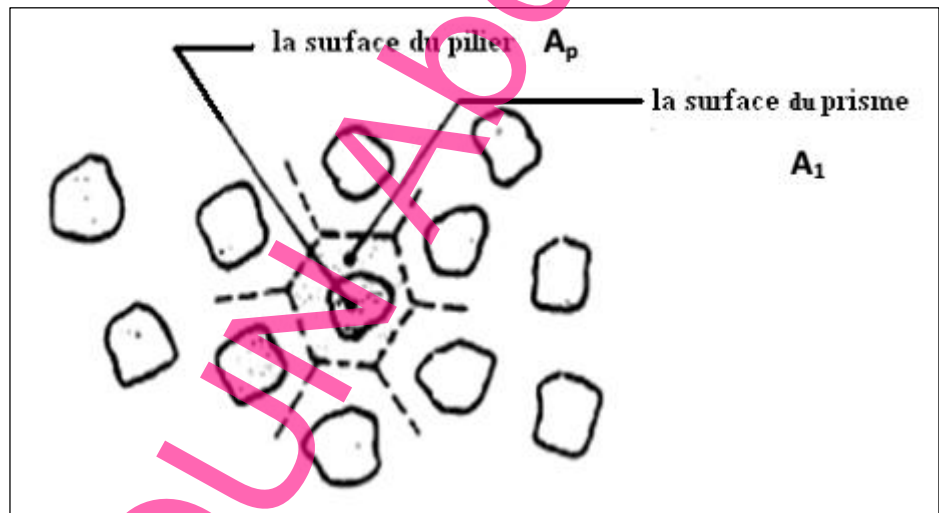
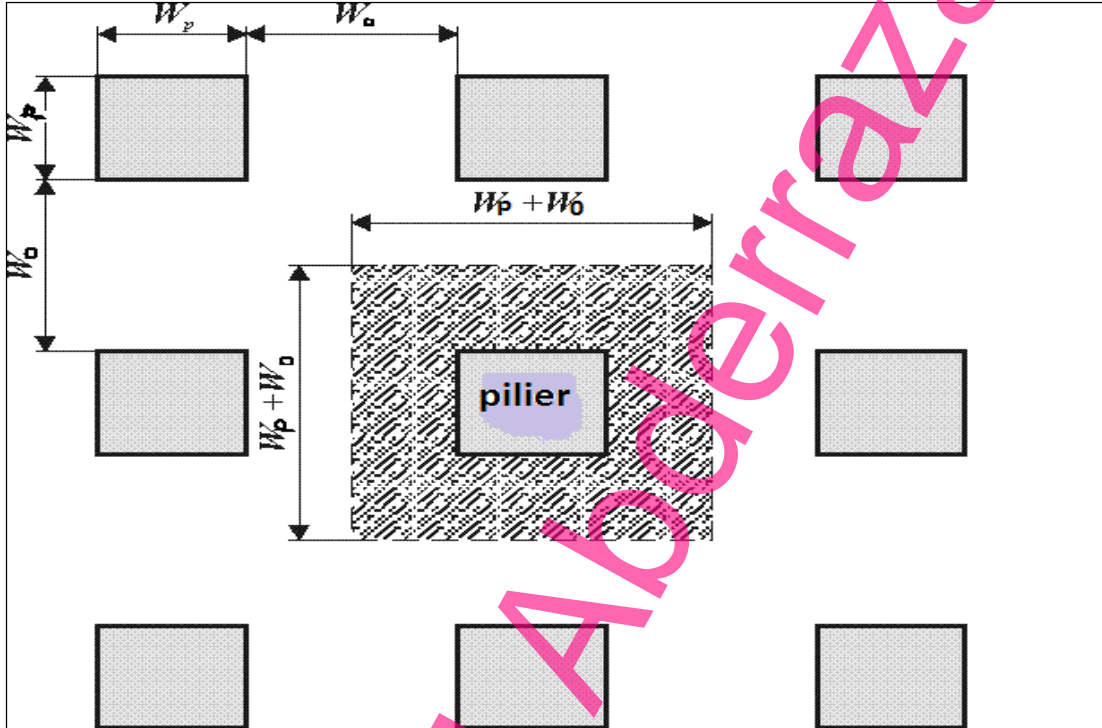


Figure .7. Piliers irréguliers à section droite ou moins circulaire montrés en plan. [27]

En résumé, la détermination de la contrainte axiale moyenne supportée par un pilier par la méthode de l'aire tributaie utilisant l'équation 18, s'obtient en calculant le rapport du poids de la colonne de roche supportée par le pilier par la surface de support du pilier. L'aire de la colonne de roche supportée par le pilier ( $A_1$ ) s'obtient en établissant des lignes frontières entre chacun des piliers. Ces lignes frontières s'obtiennent en traçant une droite à la mi-distance entre chacun des piliers. Puis finalement, on relie chacune de ces lignes frontières et on obtient autour de chacun des piliers un polygone dont la surface correspond à l'aire de la roche supportée par le pilier.

**Calcul taux d'extractions ( $T_{ex}$ )**

Dans l'exploitation des gisements plateure, le taux d'extraction " $T_{ex}$ " est introduit pour définir le rapport entre la surface au volume de minerai extrait et la surface au volume totale du minerai Fig. 8.



**Figure.8.** Section et plans des chambres et piliers avec des largeurs et dimensions d'analyse simple [27]

$$Tex = \frac{(W_0+W_p)(W_p+W_0)-W_p \cdot W_p}{(W_0+W_p)(W_0+W_p)} \dots\dots\dots(19)$$

$$Tex = 1 - \left(\frac{W_p}{W_0+W_p}\right)^2 \dots\dots\dots(20)$$

**Facteur de sécurité**

Le facteur de sécurité local considère le rapport des résistances ultimes des minerais et des contraintes des piliers

$$fs = \frac{S}{\sigma_p} \dots\dots\dots(21)$$

Où :

S : la résistance ultime du minerai

$$S = Rcu = Rc - 2,33 \sigma \text{ (pascal)}$$

$R_c$ : résistance à la compression du minéral

$\sigma$  : L'écart type sur les résistances de compression simple mesuré

$\sigma_p$  : la résistance du pilier, (pascal).

### 3.4- Le Q system

Développée par le Norwegian Geotechnical Institute (NGI), cette classification a été établie pour prévoir le soutènement des excavations exécutées dans des terrains à contrainte horizontale élevée [28]. Elle est caractérisée par un indice de qualité Q variant entre 0.001 pour un massif très mauvais et 1000 pour un massif très bon. Dans la pratique, cet indice est réduit entre 0.005 et 50.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \dots \dots \dots (22)$$

Où

- RQD caractérise la qualité des carottes de sondage ;
- $J_n$  représente le nombre de familles de discontinuités ;
- $J_r$  représente la rugosité des épontes de la famille de discontinuité la plus défavorable en terme d'orientation ;
- $J_a$  caractérise l'état d'altération des discontinuités ;
- $J_w$  est un facteur de réduction dû à la présence de l'eau dans les joints ;
- SRF est un facteur de réduction des contraintes dans le massif.

Le Q-system peut alors être considéré comme une fonction de seulement trois paramètres, qui sont une mesure directe :

1. de la taille des blocs (RQD/ $J_n$ ) ;
2. de la résistance au cisaillement inter-blocs ( $J_r/J_a$ ) ;
3. des contraintes actives globales et hydrauliques ( $J_w/SRF$ ).

La variation des paramètres existant dans Q est indiquée dans des tableaux. Ces paramètres sont présentés dans l'annexe 1 d'une façon plus détaillée.



**Limitations du système Q**

- L'utilisation de l'indice Q est spécifiquement développée pour des tunnels et des excavations en forme de voute, principalement pour le domaine du génie civil. En conséquence, il se présente quelques limitations lors de l'application à un massif rocheux dévoilant un comportement mécanique anisotrope.
- Ignore les paramètres d'orientation des excavations.
- Étant donné que la cote Q a été développée presque exclusivement avec moins de 3 séries de discontinuité, l'indice Q semble diminuer la compétence de la roche quand le massif présente 4 discontinuités espacées.
- L'indice Q ignore la résistance mécanique anisotrope lorsqu'appliqué au domaine minier. Étant donné que le quotient d'états de contraintes actives varie avec la profondeur du projet minier, il est jugé acceptable de le fixer comme constante afin d'évaluer les paramètres géologiques exclusivement dépendants au massif rocheux.
- l'efficacité du système n'est pas fiable pour une zone de faiblesse présentant un comportement convergent et/ou gonflant.

**3.5- Recommandations de l'AFTES (*Association Française des Travaux et de l'Espace Souterrain*) [29] [30] [31]**

A l'issue de la conférence internationale de Washington en 1970 traitant sur les travaux en souterrain, il est ressorti le besoin de développer et de coordonner les travaux réalisés dans ce domaine à travers le monde. Dans cet objectif, fut créée en janvier 1972 l'AFTES, d'abord sous le nom d'Association Française des Travaux en Souterrain, puis modifiée en 2005 pour devenir l'Association Française des Travaux et de l'Espace Souterrain.

La principale activité de l'AFTES consiste à diffuser des recommandations techniques dans le domaine des travaux souterrains. Ces recommandations sont préparées au sein de Groupes de Travail qui ont permis de constituer une classification, dite de l'AFTES.

Cependant, certains auteurs considèrent les recommandations de l'AFTES ne peuvent pas être considérées exactement comme système de "classification", car contrairement aux autres méthodes couramment utilisées pour cet effet, elles ne donnent

pas de note (issue de la combinaison de plusieurs paramètres) au massif rocheux. Les recommandations de l'AFTES se basent sur des paramètres des massifs pris indépendamment les uns des autres pour les décrire. Ainsi, cette méthode de choix des paramètres peut faire en sorte que chaque paramètre aura un poids différent sur le résultat final, en fonction de la spécificité du projet.

Parmi les paramètres retenus comme pertinents par le groupe de travail de l'AFTES, on peut citer :

- la résistance de la roche ;
- l'indice de continuité de la roche ;
- l'état d'altération ;
- l'indice global de densité de discontinuité ;
- le nombre de familles de discontinuités ;
- l'espacement des discontinuités de chaque famille ;
- l'orientation des discontinuités ;
- la charge hydraulique ;
- la perméabilité du massif ;
- l'état des contraintes naturelles.

Le passage des valeurs de chaque paramètre au choix des soutènements se fait à l'aide de tableaux qui préconisent ou excluent tel ou tel type de soutènement. Contrairement aux classifications, les recommandations de l'AFTES laissent le choix et le dimensionnement définitif du soutènement à l'intelligence et l'appréciation du projecteur.

À la différence des suivantes, cette classification ne vise pas à donner une « note globale » aux terrains mais à caractériser les terrains par différentes classes de paramètres permettant d'orienter les techniques de construction adaptées. Les 6 classes de paramètres considérées sont :

- les conditions géologiques générales (nature des terrains et degré d'altération) ;
- les conditions hydrogéologiques (charge et perméabilité) ;

- les données sur les discontinuités (orientations, nombre de familles, densité et état) ;
- la résistance (résistance en compression  $\sigma_c$ , gonflement, altérabilité) ;
- l'état des contraintes naturelles (caractérisé par le rapport de la résistance à la contrainte initiale  $\sigma_c / \sigma_0$ ), la déformabilité du massif.

Ces paramètres, complétés par les données sur les dimensions du tunnel et l'environnement plus ou moins sensible, sont utilisés comme données d'entrée dans des tableaux où les différentes méthodes de construction sont évaluées par rapport à chacun de ces paramètres (recommandé, neutre, défavorable, interdit), permettant ainsi une analyse multicritère. La Fig 9 montre un exemple de tels tableaux pour le paramètre « discontinuités »

Discontinuités (Cas où l'excavation est faite à l'explosif avec découpage) 1/ Matériaux rocheux (R1 à R4)			Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux			
Nombre de familles	Orientation	Espacement (1)			a ancrage ponctuel	a ancrage réparti	bâtres lances	lourds	Légers coulisants	plaques métal assemblées	béton			Injection	Air comprimé	congélation	
N1			●							×	×						
N2	Or 2 ou Or 3	S1 à S3	●							×	×						
		S1		●						×	×						
N2		S2		●	●					×	×						
N3	Quelconque	S3		●	Gr	Gr					×						×
ou N4		S4	×	●	Gr ou Bp	Gr ou Bp		●	●								×
		S5		●	×	Bp		●	●				×				×
N5				●	×	Bp		●	●	●			×	●			×
2/ Sol (R5 à R6) sans objet																	

NOTA : 1) Pour la famille la plus dense  
2) Scellement au mortier de préférence à la résine lorsque les fissures sont ouvertes

LÉGENDE : GR : avec grillage continu  
Bp : avec béton projeté  
Bl : avec blindage bois ou métallique

Figure.9 .Exemple de tableau de critère de choix des méthodes de construction

AFTES GT7R1F2 [32]

## Conclusion

Les multiples moyens et méthodes de reconnaissances présentés au chapitre ne peuvent être développés que progressivement au fur et à mesure du déroulement des études, et il est souvent nécessaire de pouvoir évaluer, même de façon souvent qualitative mais la plus objective possible, le comportement global prévisible des terrains et les techniques de construction envisageables. C'est pourquoi se sont développées des méthodes de classifications des terrains vis-à-vis de la construction d'ouvrages souterrains. Elles conduisent souvent à caractériser un terrain par une seule « note globale », ce qui peut apparaître comme réducteur voire trop simpliste, mais elles présentent l'intérêt d'obliger les concepteurs à une revue des principaux paramètres déterminants pour le comportement en souterrain, et de constituer une sorte de « langage universel » facilitant la communication entre acteurs.

## Exercices d'application

### Exercice 1

Pour le creusement d'un tunnel situé à une profondeur de 140 m à la surface terrestre, d'une hauteur de 5,5 m et 8 m de largeur creusé dans une roche ayant une masse volumique égale  $2,7 \text{ t/m}^3$ . L'angle de frottement interne de roche  $\phi$  égale  $40^\circ$  avec coefficient variable suivant la nature du terrain égale 0,3 pour accélération de pesanteur  $g=9,81 \text{ m/s}^2$

-Calculez Les contraintes horizontales et verticales exercé pendant le creusement de ce tunnel ?

### Exercice 2

Par les données suivantes :

Soit un tunnel situé à une profondeur modérée de 120m à la surface terrestre, d'une hauteur de 5m et largeur de surcharge des terrains de 12m creusé dans une roche de nature inconnu ayant une masse volumique égale  $2,5 \text{ t/m}^3$  et l'accélération de pesanteur  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ . L'angle de frottement interne des roches  $\phi = 28^\circ$  avec un coefficient variable suivant la nature du terrain égale 0,3.

-Le tunnel creusé dans une roche de quelle nature ?

**Exercice 3** Selon les données suivant :

Méthode d'exploitation : chambre et pilier par la théorie de l'aire tributaire

Les contraintes verticales des piliers murs égalent 5002846 Pas,

Largeur de la chambre est 6m,

Largeur du pilier mur 4m

La résistance ultime  $S = 3,125 \cdot H \cdot W_p^{0.5}$  MPa

Calculer la valeur de la hauteur des piliers pour atteindre un état d'équilibre pour  $F_s=1$

-Calculer taux d'extraction

-Si le facteur de sécurité est faible (inférieur à 1) quel est votre exigence ou proposition de sécurité pendant le creusement et l'exploitation de ce gisement ?

**Solution exercice 1**

Calcul la largeur de la voûte  $B_t$  ou (largeur de surcharge des terrains  $X_b$ )

$$B_t = X_b = b + 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$$

$$B_t = X_b = 8 + 2 \cdot 5,5 \cdot \operatorname{tg} (45 - 20) \text{ donc } \sigma_v = \frac{\gamma X_b}{2K \tan \phi} \left[ \left( 1 - e^{-\left( \frac{K \tan \phi \cdot 2D}{X_b} \right)} \right) \right]$$

$$X_b = 13,06 \text{ m}$$

La pression verticale  $\sigma_v$ :

$$\text{Le pois volumique } P_v = 2,7 \text{ t/m}^3 = 2,7 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 26487 \text{ N/m}^3$$

$$345920,22 / 0,498$$

$$\operatorname{Exp} (-5,33) = 0,0048 \quad 345920,22 / 0,498 \cdot 0,99$$

Après le calcul on trouve  $\sigma_v = 687672,72$  Pas

La pression horizontale :  $\sigma_H = 0,3 \cdot (0,5 H_t \cdot \gamma + \sigma_v)$

$$\sigma_H = 0,3 \cdot (0,5 \cdot 5,5 \cdot 26487 + 687672,72)$$

$$\sigma_H = 228153,59 \text{ pas}$$

**Solution exercice 2**

Largeur de surcharge des terrains égale 12 m

$$B_t = X_b = b + 2 \cdot H \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$$

Donc  $12 = B + 2 \cdot 5 \cdot \operatorname{tg}(45 - 14)$  on a  $\operatorname{tg}(31) = 0,60$

Donc largeur de tunnel  $B = 6 \text{ m}$

Pour connaître la nature des terrains il faut calculer le facteur de chargement

$$H_p = 0,3 \cdot (6 + 5) = \text{Donc } H_p = 3,3$$

d'après le tableau il ya plusieurs possibilité de choix le facteur  $H_p$ , donc on choisit le plus proche des intervalle suivant:

$$0,25 \text{ à } 0,35. (B + H_t) = ]0,25 \text{ à } 3,85[ \text{ ctd } ]3,3-0,25 \text{ à } 3,85-3,3[ ]3,05 \text{ à } 0,55[$$

$$0,35 \text{ à } 1,1. (B + H_t) = ]0,35 \text{ à } 12,1[ \text{ ctd } ]2,95 \text{ à } 8,8[$$

$$1,1 \text{ à } 2,1 (B + H_t) = ]1,1 \text{ à } 23,1[ \text{ ctd } ]2,2 \text{ à } 19,8[$$

$$2,1 \text{ à } 4,5 (B + H_t) = ]2,1 \text{ à } 49,5[ \text{ ctd } ]1,2 \text{ à } 46,2[$$

On remarque le premier intervalle est la plus proche de facteur de chargement Donc pour  $H_p = 3,3$ , nature des roches : Modérément ébouléuse

**Solution exercice 3**

$$F_s = s / \sigma_p$$

La résistance ultime est  $S = 3,125 \cdot H \cdot W_p^{0,5}$  MPa

$$F_s = 1$$

Quel est la valeur de la hauteur des piliers

Les contraintes verticales

$$\sigma_v = 5002846 \text{ pas} = 5,0 \text{ MPA}$$

$$\sigma_p = \sigma_v \left( \frac{(W_0 + W_p)}{(W_p)} \right)$$

$$\sigma_p = 5(6+4/4) = 12,5 \text{ Mpa}$$

$$F_s = s / \sigma_p = 1 \text{ donc}$$

$$S = 3,125 \cdot H \cdot 4^{0.5} \text{ donc } H = S / 3,125 \cdot 4^{0.5}$$

$$H = 12,5 / 6,25 \text{ ctd } H = 2 \text{ M}$$

Taux d'extraction

$$T_{ex} = 1 - \left( \frac{W_p}{W_0 + W_p} \right)^2$$

$$T_{ex} = 1 - \left( \frac{4}{6 + 4} \right)^2$$

$$T_{ex} = 0,84 = 84 \%$$

Un facteur de sécurité faible exige un redimensionnement soit:

-**Réduire** la largeur de l'excavation, -**Augmenter** la largeur du pilier, -**Réduire** la hauteur du pilier (augmente S)

SAADOUN Abderrazak

# Chapitre IV. Matériaux de soutènement.

## Introduction

les études géotechniques plus améliorées qui nous permettent ainsi de choisir les matériaux adéquats pour les états de contraintes et la nature géologique des terrains. C'est pourquoi, les techniques anciennes telles que le soutènement au bois, utilisé par les anciens mineurs, sont remplacées par des matériaux métalliques et parfois vitreux. Le procédé de soutènement peut se subdiviser en deux étapes à savoir : le présoutènement ou parfois directement le soutènement provisoire et le soutènement définitif.

Le but essentiel du soutènement est de contrôler et stopper les déformations engendrées par le creusement de l'ouvrage en souterrain. Pour cela, le dispositif à utiliser doit permettre de trouver un équilibre entre les poussées engendrées par le terrain et les résistances qui permettraient de stopper les déformations engendrées par ces poussées.

L'usage du pré-soutènement permet soit d'améliorer le terrain avant l'excavation soit de jouer un rôle de confinement de façon provisoire.

## 1 -Classification des modes de soutènement [13]

Le soutènement provisoire est une structure qui permet d'assurer la stabilité des parois d'une cavité souterraine pendant le temps qui s'écoule entre son creusement et la mise en place éventuelle du revêtement définitif.

Si l'on classe les soutènements provisoires en fonction de leur mode d'action par rapport au terrain, on peut en distinguer quatre catégories différentes :

- ✓ les soutènements agissant par **confinement du terrain encaissant** ; ce sont essentiellement :
  - le béton projeté seul,
  - le béton projeté associé à des cintres légers ;



- ✓ les soutènements agissant à la fois par **confinement et comme armature du terrain encaissant** ; il s'agit du boulonnage sous diverses formes, qu'il soit ou non associé au béton projeté, aux cintres légers ou aux deux dispositifs simultanément :

- boulons à ancrage ponctuel (à coquille ou à la résine),
- boulons à ancrage réparti (scellés à la résine ou au mortier),
- barres foncées ;

- ✓ les soutènements agissant par **supportage** :

- cintres lourds,
- cintres légers,
- plaques métalliques assemblées,
- voussoirs en béton,
- tubes préforés (voûte parapluie),
- boucliers ;

- ✓ les soutènements agissant par **consolidation du terrain et modification de ses caractéristiques géotechniques ou hydrologiques** :

- injections de consolidation,
- air comprimé,
- congélation.

L'action de supportage se distingue de l'action de confinement par une plus forte résistance relative des éléments de soutènement qui, en limitant l'amplitude des déformations de l'un et de l'autre, privilégie la résistance du soutènement par rapport aux capacités de résistances propres du terrain.

Au contraire, dans l'action de confinement, la résistance du soutènement est faible et le terrain joue le rôle essentiel ; le rôle du soutènement se limite à développer le long des parois une contrainte radiale de confinement généralement faible, mais

susceptible d'accroître fortement la résistance tangentielle du terrain et de permettre la formation des voûtes de décharge.

La classification qui précède doit être considérée comme une approche théorique exprimant le mode d'action habituellement prépondérant pour chaque type de soutènement. Ce mode d'action peut varier sensiblement pour un même soutènement en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve placé.

Plusieurs types de soutènement peuvent être utilisés simultanément sur un même chantier. C'est ainsi que le béton projeté est souvent associé au boulonnage ou (et) aux cintres légers, que les plaques métalliques assemblées peuvent être renforcées par des cintres légers ou lourds placés à l'intérieur des anneaux et que les boucliers ne sont généralement qu'un soutènement transitoire servant à la mise en place de plaques métalliques ou de voussoirs en béton qui prennent leur relais.

Certaines méthodes permettent de réduire la décompression du terrain encaissant, soit grâce à la mise en place anticipée du soutènement, soit en utilisant un dispositif capable d'exercer sur le terrain un effort actif dit de recompression. Le prédécoupage mécanique qui consiste à réaliser en extrados à la scie-haveuse une saignée remplie de béton projeté et qui permet d'anticiper le confinement appartient à la première catégorie. De même, il est quelquefois possible de procéder à un boulonnage anticipé des parois à partir d'une galerie d'avancement de petite section (préboulonnage).

Certains types de soutènement de supportage (cintres lourds ou voussoirs) peuvent être équipés de vérins provoquant une certaine recompression par expansion de l'anneau vers le terrain et relèvent ainsi de la deuxième catégorie. Il s'agit de conditions particulières d'emploi de quelques-uns de ces procédés de soutènement.

## 2-Soutènement en bois

Un boisage est un soutènement qui est monté entre deux murs d'un gisement incliné (semi-dressant). Pour l'utilisation comme boisage, habituellement les bois d'une longueur de plus de 4 ne sont pas disponibles. Prenons en considération tous ces paramètres, une méthode connue sous le nom de boisage a été conçue, ce qui veut dire une méthode d'extraction qui est applicable pour les corps minéralisés dressant mince avec des murs faibles requérant un soutènement sous la forme de boisage.

Les cintres en bois sont de plus en plus rarement utilisés en raison notamment du fait qu'ils nécessitent une main-d'œuvre très qualifiée pour la mise en œuvre ; ils sont réservés aux petits ouvrages ou aux ouvrages de section irrégulière.

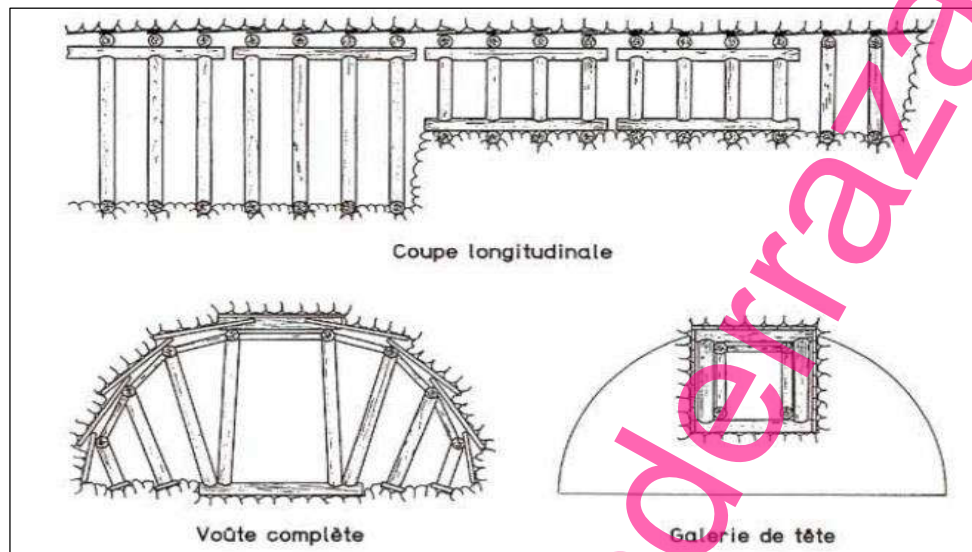


Figure .1. Soutènement par boisage [13]

Les systèmes d'exploitation ouverts et soutenus sont applicables pour l'extraction des gisements de toute forme, dimensions, et épaisseur. Mais le système de soutènement, sans remplissage et avec l'utilisation de bois, est utilisé pour exploiter les gisements allant jusqu'à 4 m d'épaisseur, rarement plus. Ceci est dû au fait qu'à part l'indisponibilité des longs bois, comme mentionné ci-haut, le boisage dans les corps minéralisés dressant sans remplissage, est compliqué. Avec l'augmentation de l'épaisseur, ça devient pratiquement impossible particulièrement dans le cas des murs rocheux faibles.

### 3- Soutènement par boulon [33]

Le boulonnage, dont la technologie est l'objet de cette recommandation, constitue l'un des éléments les plus fondamentaux intervenant dans les techniques de soutènement des tunnels principalement réalisés par méthode conventionnelle.

Cette recommandation traite (Fig. 2) :

- du boulonnage radial, voûte, pénédroits, radier
- du boulonnage de front (longitudinal)
- du boulonnage par enfilages longitudinaux obliques

Le boulonnage peut être complété par d'autres moyens de soutènement : cintres, béton projeté, treillis

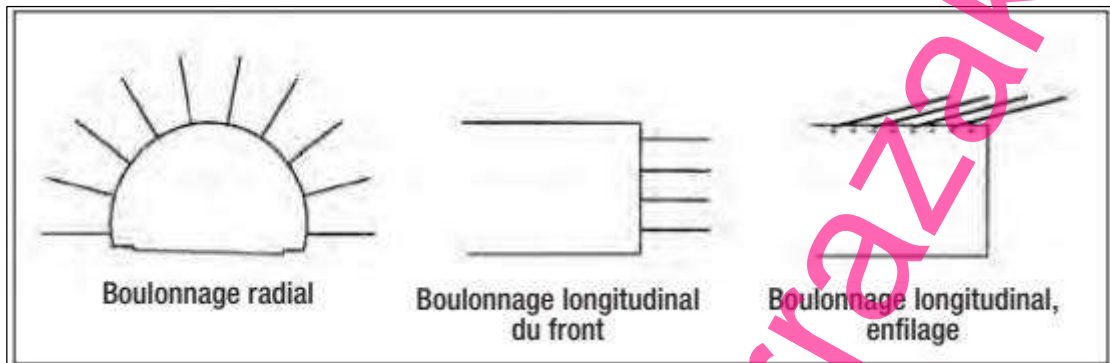


Figure. 2. Schéma des différents types de boulonnage utilisés. [33]

Elle se limite aux travaux utilisant des matériaux courants. Les technologies spécifiques faisant appel à des matériaux particuliers comme les boulons de très grande longueur (au-delà de 15m, câbles ou tirants) ne sont pas traitées.

La longueur des boulons radiaux est en générale comprise entre 1/3 et 1/2 de la plus grande ouverture transversale de l'excavation. De ce fait, pour des ouvrages classiques, leur longueur n'excède pas 6 m. Pour le boulonnage longitudinal, la longueur des boulons se situe classiquement entre 8 et 15 m.

Ces boulons peuvent fonctionner soit en mode actif (pour stopper le développement des instabilités), soit en mode passif (en prévenant tout déplacement ou perturbation au sein de l'ouvrage ou dans les roches environnantes).

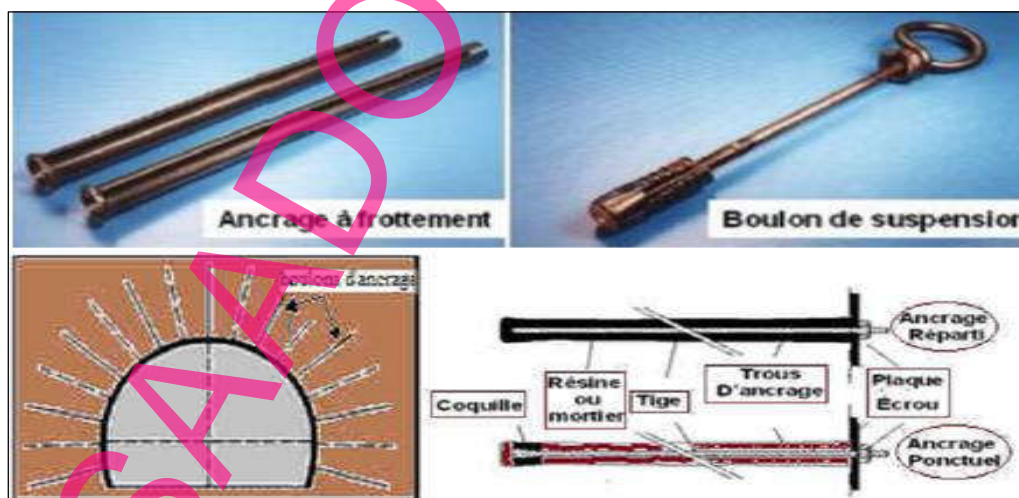


Figure .3. Exemples de boulons d'encrages utilisés dans le soutènement [33]

On distingue des boulons à ancrage ponctuel ou à ancrage reparté. Les matériaux sont soit de l'acier ou de la fibre de verre (particulièrement pour les fronts de taille)

La technique du boulonnage consiste à ancrer à l'intérieur du terrain une barre de matériau résistant qui apporte une résistance à la traction et, en confinant le matériau du terrain, permet de tirer profit des caractéristiques résistantes propres des terrains de manière à assurer ainsi leur soutènement.

Lors du creusement de tunnel, afin d'éviter le détachement des blocs et la chute sous l'effet de la gravité, le système de boulonnage est utilisé. Ce dernier assure un rôle porteur à condition qu'il soit ancré assez profondément dans la partie saine ou non fracturée. La tige est sollicitée à l'arrachement mais aussi en cisaillement selon la disposition des blocs et l'orientation des tiges. Les boulons doivent dépasser largement dans le terrain sain pour assurer un ancrage suffisant (un mètre minimum).

### **3.1- Boulons à ancrage ponctuel**

Le boulonnage à ancrage ponctuel consiste à relier le plan de la surface excavée à un point profond de roche intacte. L'ancrage est généralement assuré par un dispositif mécanique (Fig. 4) mais peut occasionnellement être associé à un scellement de la barre en fond de trou par résine. Classiquement, l'ancrage en fond de trou s'obtient par un blocage d'une coquille d'expansion sur la paroi du trou suite à l'enfoncement d'un coin par traction mécanique obtenue par vissage. La mise en tension du boulon par précontrainte, induite par serrage de l'écrou de tête ou par expansion ou décompression des terrains, est indispensable pour obtenir une efficacité optimale de ce système de soutènement.

L'avantage majeur du boulonnage à ancrage ponctuel est sa mise en œuvre rapide ainsi que son efficacité immédiate. Cette efficacité ne se maintient cependant dans le temps que si la roche ne flue pas au voisinage de l'ancrage.

Ce type de boulon peut de plus être mis en œuvre en cas de venues d'eau dans le forage. Les caractéristiques standard sont des diamètres de 16 à 20 mm pour des longueurs comprises entre 1,50 et 3,00 m

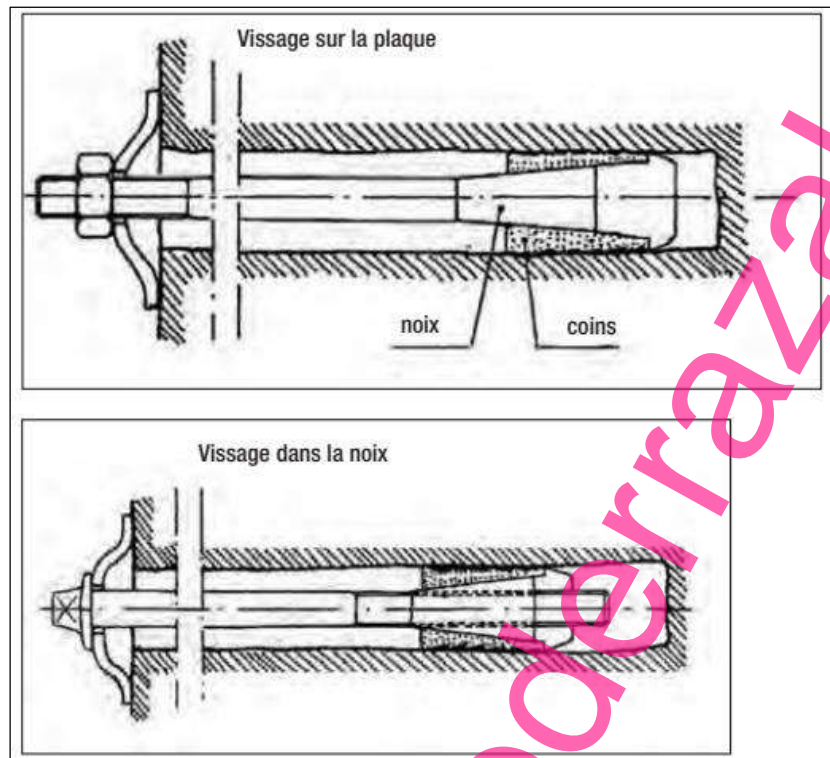


Figure .4. Schéma du boulon à ancrage ponctuel [33]

### 3.2 -Boulons à ancrage réparti

Le boulonnage à ancrage réparti consiste à sceller des barres métalliques (ou autres) sur toute leur longueur dans le trou d'ancrage. Le produit de scellement est généralement de la résine, du mortier de ciment ou du coulis (Fig. 5).

Le scellement réparti sur toute la longueur du trou d'ancrage garantit une bonne pérennité du boulon.

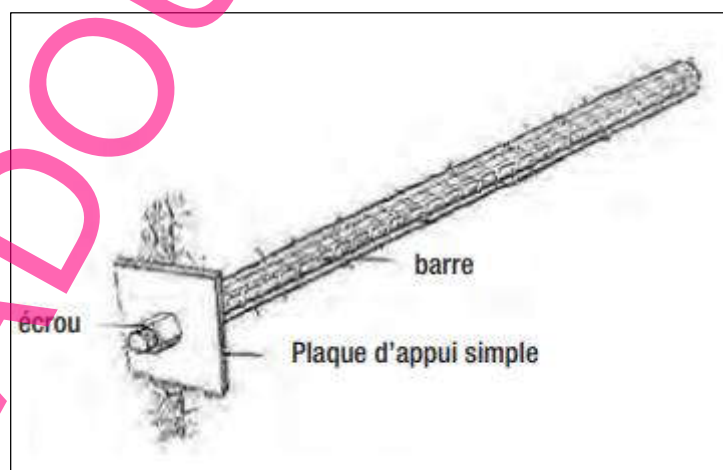


Figure. 5 . Schéma du boulon à ancrage réparti. [33]

### 3.3 - Boulons mixtes

Le boulon mixte (Fig. 6) est un boulon à ancrage ponctuel, scellé dans un deuxième temps par injection d'un produit de scellement. Ces boulons présentent l'avantage d'apporter une efficacité immédiate grâce à l'ancrage ponctuel, et de pouvoir ensuite être injecté, améliorant la pérennité et renforçant ses performances.

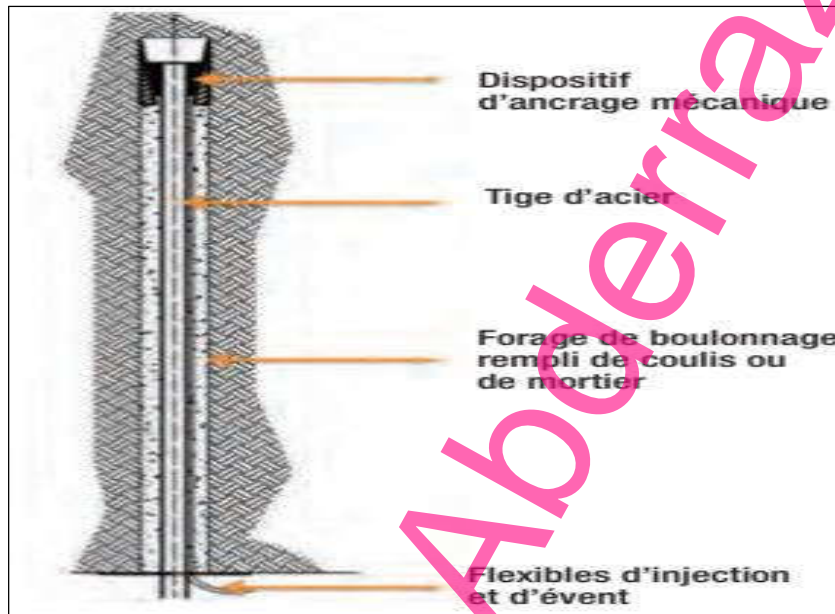


Figure. 6 . Schéma de principe du boulon mixte. [33]

Certains boulons à friction peuvent être équipés d'un taillant perdu utilisé pour la foration (autoforeurs) et deviennent mixtes par injection (Fig. 7)

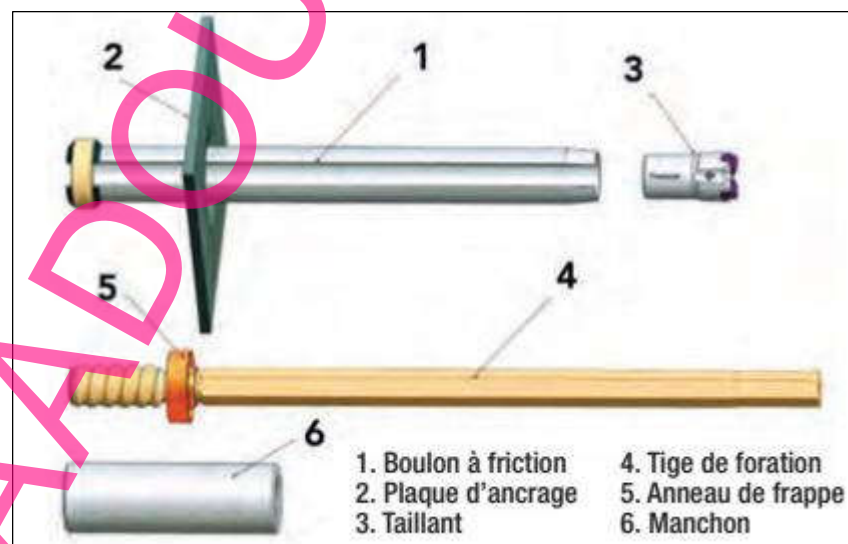


Figure. 7. Schéma du boulon à friction autoforeur [33]

## 4- Soutènement par Cintres

Les cintres peuvent être définis comme des ossatures le plus souvent métalliques en forme d'arcs ou de portiques disposés dans la section transversale de l'ouvrage et dont les membrures sont placées le long des parois où elles sont calées, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une peau de blindage.

Il s'agit d'une structure rigide de caractère discontinu, qui n'est pas liée de façon intangible au terrain. Suivant le rôle qu'ils assurent, les cintres peuvent être des éléments :

- de protection (contre la chute des blocs isolés sans chercher à s'opposer aux déformations d'ensemble) ;
- de soutènement (pour ralentir la convergence des parois) ;
- de renforcement, s'il s'agit de consolider un ouvrage ancien.

Du point de vue de la façon dont ils sont constitués, il existe différents modèles de cintres.

### 4.1-Cintre réticulé [13]

Dans certaines circonstances, notamment pour les mauvais terrains, les grandes sections et les sections divisées, il peut s'avérer nécessaire de renforcer le béton projeté-boulonné par des armatures beaucoup plus résistantes qu'un simple treillis soudé. Le cintre réticulé est constitué de 3 aciers HA reliés entre eux par des aciers de plus faible section constituant une "réticulation" et facilement cintrables à la forme de l'excavation.

Une fois placés contre le terrain, ces cintres réticulés sont recouverts de béton projeté pour former une coque solidaire. Les cintres réticulés présentent les deux avantages de facilité de mise en œuvre et de très bonne compatibilité avec le béton projeté. Ils sont déconseillés lorsque des fortes sollicitations sont prévisibles avant que le béton projeté puisse remplir son rôle.



## 4.2-Cintres lourds et blindage

Pour les terrains poussant (de mauvaise qualité), ou lorsqu'on traverse une zone plus difficile que prévue, les soutènements "classiques" présentés ci-avant, utilisant pleinement les propriétés de déformabilité du rocher trouvent leurs limites. On choisit alors 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).

## 4.3- Cintres coulissants

Lorsque les efforts qui transitent dans le soutènement sont trop importants dans des terrains de faible tenue on a recours à une technologie de cintres métalliques. Plutôt que de réaliser un cintre monolithique (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. Par ce biais, lorsque les efforts de chargement dépassent un certain seuil – le seuil de coulissement – les morceaux glissent les uns sur les autres par frottement. Pour augmenter l'efficacité de ce principe et faciliter le coulissement, ces cintres ont un profil spécial en forme de "v".



**Figure .8.** Barres métalliques pour les cintres (HEB 200) (Utiliser à Tunnel tizi ouzou- Algérie)

Dans les cintres métalliques en acier, les cintres les plus utilisés sont HEB X (X représente la catégorie du cintre). Les cintres agissent par supportage. On distingue des cintres lourds possédant une forte inertie (exemple : les HEB) et les cintres légers (exemple : les cintres réticulés ou les TH29 Kg/m). Le cintrage se fait suivant le rayon de courbure du tunnel.

#### 4.4- Soutènement par voûte parapluie (les tubes perforés)

La réalisation d'un tunnel en terrain meuble requiert souvent la mise en place d'une voûte parapluie pour assurer, en présence d'une faible couverture, la maîtrise des tassements de surface.

Le procédé consiste en la mise, en place, préalablement au creusement de l'ouvrage, d'une pré-voûte située immédiatement au contact de son extradoss futur. Cette dernière, constituée de tubes métalliques disposés en couronne subhorizontale suivant le contour de la section qui sera excavée, a pour objectifs d'assurer la stabilité de la travée en cours d'excavation et même de remplacer le soutènement provisoire, d'améliorer la stabilité du front par réduction des contraintes agissant en avant de celui-ci et de limiter les tassements.



**Figure .9.** Photo de voûtes parapluies utilisées dans le tunnel situé entre Bouira et Draa El-Mizan (tizi ousou-Algérie)

Cette technique est largement utilisée dans le pré-soutènement lors des excavations dans des terrains ayant une mauvaise tenue.

#### 4.5-Soutènement par les treillis soudés

Ce sont des sortes de grillages en acier. Ils sont utilisés pour renforcer le béton en augmentant sa résistance au cisaillement.

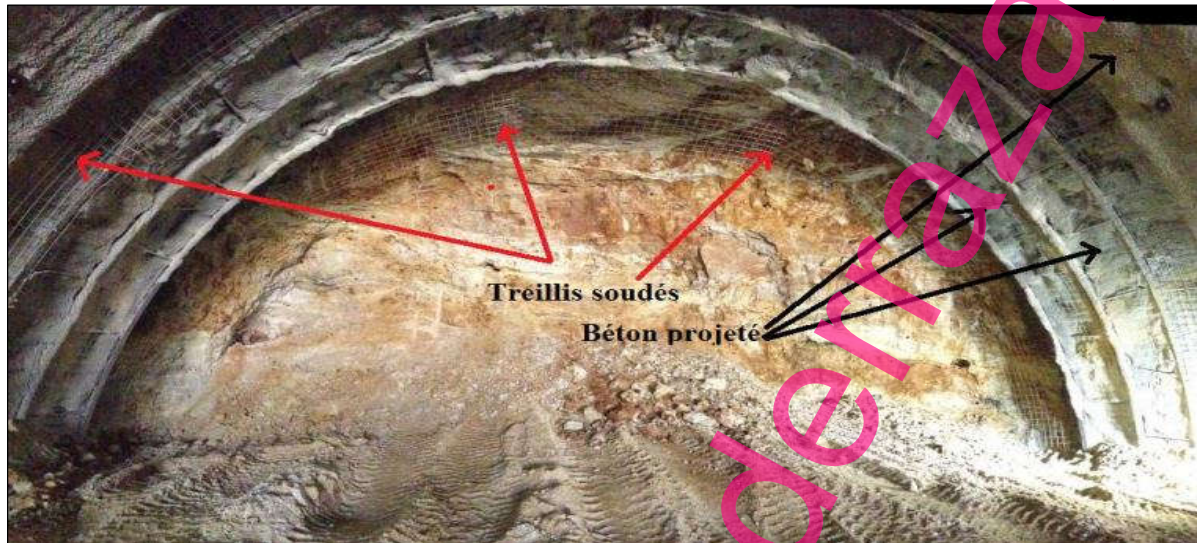


Figure .10. Photo de treillis soudés et du béton projeté

#### 5- Soutènement Béton projeté [13]

L'utilisation de béton projeté comme mode de soutènement en souterrain s'est considérablement développée au cours des dernières années. Utilisé près du front, seul ou en association avec le boulonnage et/ou les cintres légers, il constitue ce que l'on a appelé la méthode de construction avec soutènement immédiat par béton projeté et boulonnage et qui est également connue sous le nom de nouvelle méthode autrichienne (NATM).

Le béton projeté est mis en œuvre au niveau de la partie avancé où le cintre réticulé et le treillis soudé est mis en place conformément aux plans d'exécution. Au niveau de la partie avancée qui est prêt à recevoir du béton projeté, il ne doit exister aucun élément pointues gênant ou dépassant le gabarit du béton projeté. Après la vérification de la ligne interne et externe du béton projeté, il est procédé à l'application de béton projeté par plusieurs couches successives de 5 à 10 cm d'épaisseur. Le béton projeté contribue énormément dans l'action de confinement. Son efficacité dépend de la granulométrie des granulats, du type d'adjuvent, de la qualité du ciment utilisé et du dosage de ces différents éléments.

**6- Choix du type de soutènement selon Classification de Bieniawski [34]**

C'est une méthode adaptée aux milieux rocheux, dont le principe est de donner au massif une note globale, appelée RMR (Rock Mass Rating), calculée comme la somme de cinq notes partielles correspondant aux cinq familles de paramètres dont le rôle est essentiel vis-à-vis du comportement du terrain :

- A1 pour la résistance de la roche (résistance en compression simple  $\sigma_c$  ou indice Franklin *I<sub>s</sub>*) ;
- A2 pour la densité de fracturation (valeur du *RQD*) ;
- A3 pour l'espacement des discontinuités ;
- A4 pour la nature et l'état des joints ;
- A5 pour les conditions hydrogéologiques.

Ces notes sont ensuite complétées par une note corrective *B* selon l'orientation du tunnel par rapport aux discontinuités. Chacune de ces notes partielles peut varier entre 0 et 15, 20 ou 30, et la note globale, sur 100, est donnée par la formule :

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 - B$$

**Taleau1.** Classification RMR : choix du type de soutènement [34]

Classe de la roche	Type de soutènement						
	Boulons d'ancrage (Dia 25 mm – Longueur = 1/2 diamètre du tunnel – Scellement réparti)		Béton projeté			Cintres métalliques	
	Espacement	Complément d'ancrage	Voûte	Piédroits	Complément de soutènement	Type	Espacement
<b>I</b>	Généralement pas nécessaire						
<b>II</b>	1,5 à 2,0 m	Occasionnellement treillis soudé en voûte	50 mm	Néant	Néant	Non rentable	
<b>III</b>	1,0 à 1,5 m	Treillis soudé + 30 mm de béton projeté en voûte si nécessaire	100 mm	50 mm	Occasionnellement treillis et boulons si nécessaire	Cintres légers	1,5 à 2,0 m
<b>IV</b>	0,5 à 1,0 m	Treillis soudé + 30 à 50 mm de béton projeté en voûte et en piédroits	150 mm	100 mm	Treillis soudé et boulons à 1,5 à 3 m d'espacement	Cintres moyens + 50 mm de béton projeté	0,7 à 1,5 m
<b>V</b>	Non recommandé		200 mm	150 mm	Treillis soudé, boulons et cintres légers	Immédiatement 80 mm de béton projeté puis cintres lourds à l'avancement	0,7 m

On note que, dans cette note globale, 70 % du total correspond à des données sur les discontinuités, 15 % seulement à la résistance et 15 % également à l'hydrogéologie. Cette note permet un classement en 5 catégories de rocher (de très bon pour RMR entre

80 et 100 à très médiocre pour RMR entre 0 et 20), qui permettent d'évaluer le temps de tenue sans soutènement, l'ordre de grandeur des caractéristiques géo-mécaniques du massif, ainsi que le type de soutènement à mettre en place pour chacune de ces catégories

Après avoir l'indice de qualité Q (*Rock Tunnel Quality Q-System*) du rocher, les dimensions et la destination de l'ouvrage aboutissent et leurs soutènements. Le coefficient supplémentaire ESR (Excavation Support Ratio) dans le terme des ordonnées est un coefficient correcteur de dimension qui varie de 0.8 à 3.5 selon la nature de l'ouvrage et le caractère temporaire ou permanent de soutènement à pré dimensionné. A partir du paramètre ESR, N. BARTON définit la dimension équivalente de l'ouvrage (dimension normalisée, appelée dimension équivalente) donné par la formule

$$De = \frac{D}{ESR}$$

avec  $D$  : la dimension de l'excavation (portée, largeur ou hauteur) et ESR une quantité appelée rapport de soutènement (Excavation Support Ratio)

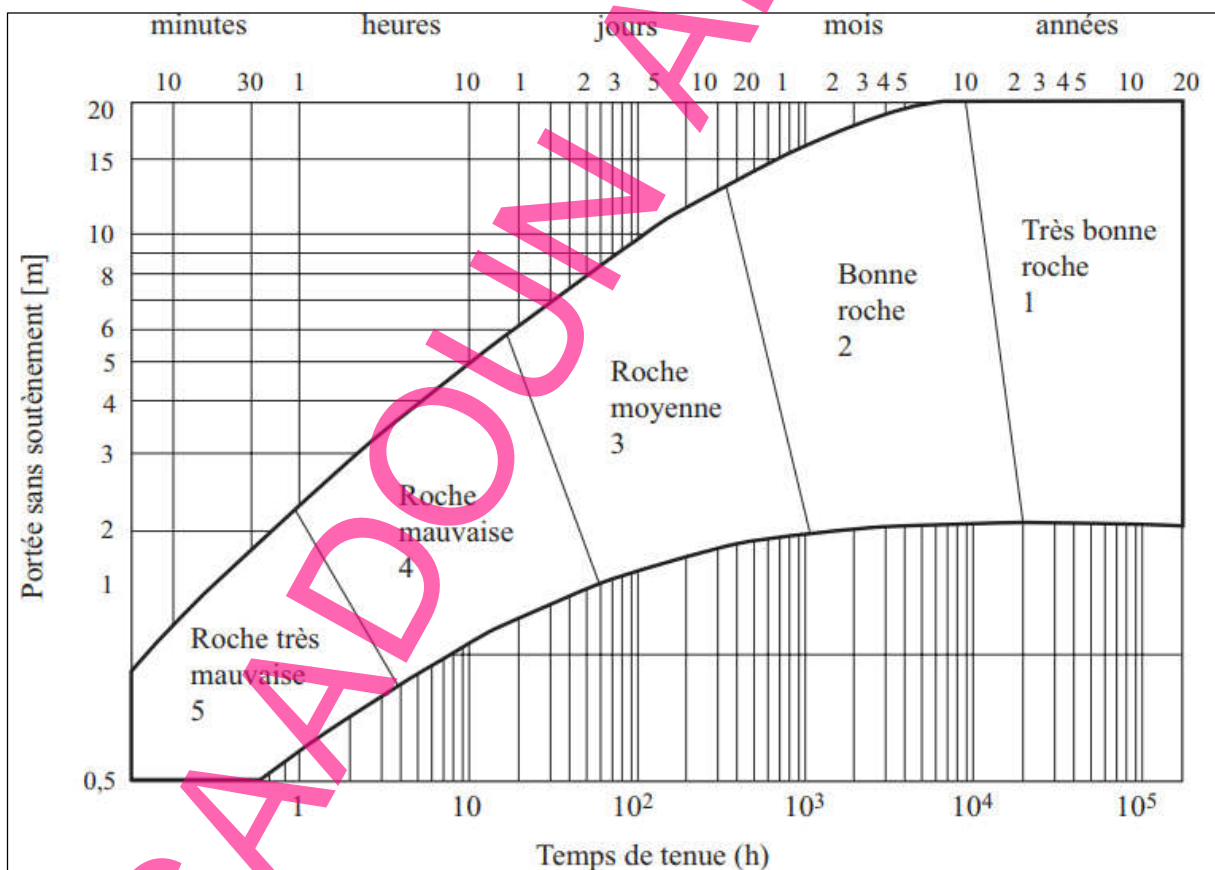


Figure .11.Soutènement basé sur la valeur Q d'après Bieniawski, [34].

## 7- Revêtement et étanchéité

Pour assurer la pérennité des tunnels, la mise en place du complexe d'étanchéité ainsi qu'un réseau de drainage des eaux s'infiltrant à travers la roche s'avère indispensable. Le complexe d'étanchéité se compose de deux membranes ; Le géotextile et le géo membrane. La mise en place du complexe nécessite le surfacage des parois intrados avec un béton projeté est entrepris pour éliminer tout matériau pouvant causer des dégâts au complexe d'étanchéité. Le réseau de captage se compose de différents tuyaux en PVC, selon l'hydrologie du site, afin d'assurer le drainage des eaux le long des parois intrados des tunnels. [13]

### 7.1-Bétonnage de la voûte

Les coffrages mobiles pour le béton de voûte ont des valeurs de déformation basse grâce à leurs structures rigides. Les coffrages qui peuvent résister à la pression de béton de 15 t/m à cause de la pompe de béton dans les tunnels, peuvent aussi être utilisés avec sécurité pendant des mises en place très rapides. Les coffrages de tunnel peuvent être utilisés au béton du radier sans ancrages et dans ce cas les valeurs de déformation restent entre des limites acceptables. Les coffrages de voûte mobiles, ouverture fermeture avec un système complètement hydraulique, diminuent les coûts avec leur main d'œuvre à bas prix et son utilisation sans problème. Le bétonnage de la voûte du tunnel sera fait par le coffrage en acier qui est construit conformément à la longueur et à la géométrie de l'anneau à bétonner indiqué dans le plan. [13]

### Conclusion

Le choix raisonné d'un mode de soutènement comprend schématiquement deux phases essentielles : une phase *d'analyse technique* du problème qui aboutit à l'élimination d'un certain nombre de types de soutènement en raison de leur incompatibilité avec certaines des données techniques du projet qui peuvent être d'ordre géotechnique, géométrique ou liées à l'environnement, et autre phase complémentaire *d'analyse économique* très important qui fait intervenir par quelques paramètres. c'est pour tenter de mieux maîtriser ce problème et plus particulièrement pour aider son analyse technique qui ont pour objet de fixer un cadre d'étude en s'assurant que tous les critères qui influent sur le choix ont bien été pris en compte.

# Chapitre V. Creusements des fouilles

## Introduction

Une technique de construction doit permettre l'abattage et la stabilisation du terrain tout en respectant certains critères d'économie et de rapidité. Les techniques d'excavation et creusement des tunnels sont similaires à celles utilisées dans le fonçage des galeries dans le domaine minier.

Les travaux de terrassements pour l'ensemble des travaux se décomposent en plusieurs phases :

- Préparation : démolition par exemple
- Excavation : la fouille est effectuée directement par des engins de productions
- Transport des déblais
- Soutènement éventuel.
- Mise en place des matériaux d'apport « remblai » avec éventuellement un compactage.

En fonction des caractéristiques de la roche (terrain difficile ou rocher), des techniques existent et leur emploi varie selon le type de projet (géométrie de l'ouvrage, profondeur), nous distinguons deux techniques principales d'excavation :

- L'abattage mécanique (pelle mécanique, brise roche, tunnelier) ;
- L'abattage à l'explosif.

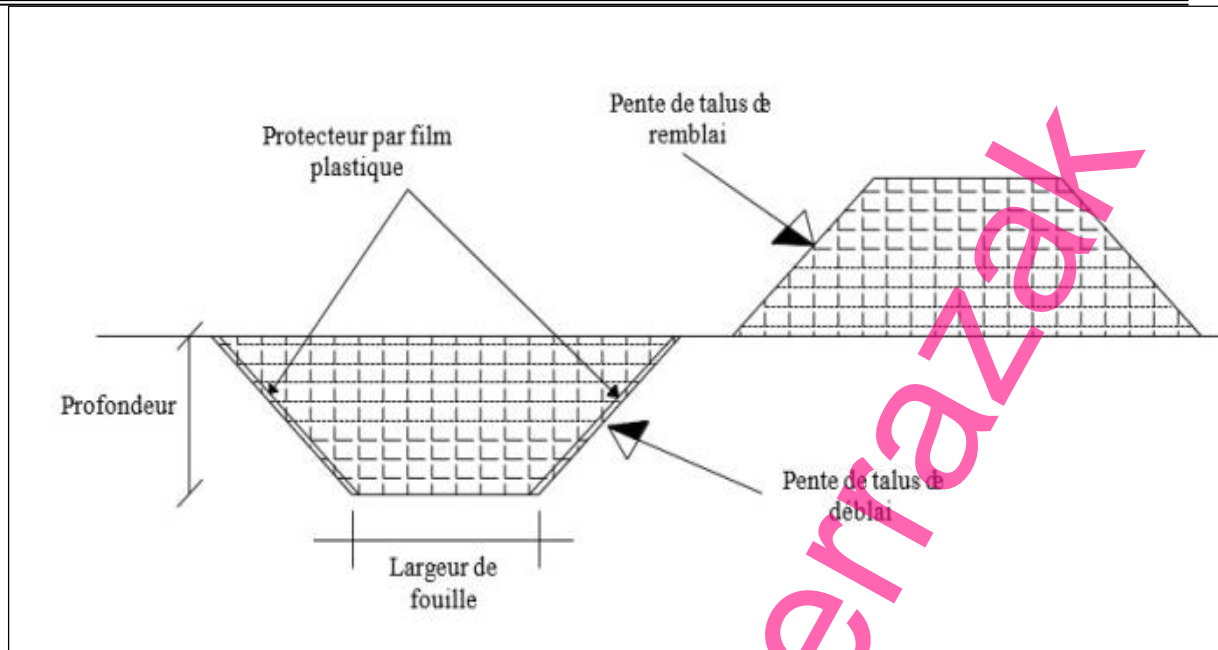
Il existe néanmoins d'autres méthodes d'excavation en souterrain que nous n'aborderons pas en détail dans le cadre de ce travail. Parmi ces méthodes, nous avons :

- le jet hydraulique (utilisation de fortes pressions d'eau aussi appelé (jet cutting)
- la percussion lourde (qui consiste à lancer un objet lourd sur le front de taille pour le fissurer et faire éclater la roche) ;

Dans le domaine minier, plusieurs critères peuvent entrer dans le choix des techniques d'excavation, et cela dépend également de la vision de l'entreprise qui exécute les travaux. Parmi les critères on peut avoir la nature du terrain, le délai d'exécution, les exigences environnementales. [35]

## 1-Paramètres des fouilles et mode de creusement

Une fouille est caractérisée par sa profondeur, sa largeur et la pente de ses talus (Fig. 1).



**Figure 1.** Schéma représente la Distinction entre déblais et remblais [35]

La nature du terrain à extraire détermine :

**A-** La méthode de travail :

-L'excavation par couche successive, en augmentant l'évaporation superficielle, favorise l'extraction des sols humide ; elle consiste à terrasser une fouille ou une emprise par l'enlèvement successive de petites couche de terrain sur toute l'emprise.

- L'extraction frontale limite le détrempage des sols en période de pluie ; il s'agit de terrasser une fouille ou une emprise sur toute la hauteur.

**B-** La pente de talus :

Les valeurs des pentes des talus en déblai sont présentées dans le tableau .1 ci-dessous. Ces valeurs sont en fonction de la nature du terrain et de son état hydrique.

**C-** Le choix de l'engin d'excavation et le rendement de production.



**Tableau 1** : Valeurs de pentes des talus en déblai [36]

Type de sols	Déblai (en terrain naturel)			
	Zone sèche H/V		Zone immergée H/V	
Roche Compacte	80°	1/5	80°	1/5
Roche friable	55°	2/3	55°	2/3
Débris rocheux	45°	1/1	40°	5/4
Terre et pierres	45°	1/1	30°	2/1
Terre argileuse	40°	5/4	20°	3/1
Gravier et sable	35°	3/2	30°	2/1
Sable fin	30°	2/1	20°	3/1

### 1.1-Creusement dans des terrains instables [13].

Avant toute intervention, il est nécessaire de procéder au piquetage de la zone concernée par travaux ; la manière selon laquelle sont exécutés les travaux diffère en fonction de plusieurs paramètres :

- La nature du sol et sa cohésion « argileux, graveleux ou rocheux »
- Les moyens mis en œuvre ;
- La présence éventuelle d'eau ou de nappe phréatique. Les parois des fouilles quelque soient en excavation ou en butté, sont aménagées de façon à éviter tout risque déboulement ou de glissement intempestif. Plusieurs techniques mises en œuvre :
  - Le blindage et étaielement ;
  - La protection des talus à l'aide d'un film en matière plastique ;
  - Le drainage des eaux d'infiltrations.

La profondeur importante de certaines fouilles (qui dépasse une certaine hauteur critique) impose la mise en place d'un blindage. Car, au-delà de cette hauteur la fouille

s'effondrera.

La profondeur critique est généralement déterminée par la formule suivante :

$$H_{critique} = \frac{(\pi+2).C}{\gamma}$$

Avec :

C : Cohésion du sol ;

$\gamma$ : Poids volumique des sols

## 2-Les tranchées couvertes

Les tranchées couvertes sont des tunnels par leur configuration finale et leur destination, mais elles se rattacherait plutôt aux travaux de surface par leur mode de construction.

Pour que l'on puisse réaliser un tunnel par la méthode de la tranchée couverte, il faut nécessairement à la fois qu'il s'agisse d'un ouvrage à faible profondeur et que l'on puisse disposer de la surface nécessaire au sol pendant une durée suffisante pour la réalisation des travaux.

Suivant la nature du terrain, la largeur des emprises et la durée pendant laquelle on peut en disposer, on peut distinguer plusieurs types de tranchées couvertes.

### 2.1- Fouille talutée ouverte

C'est la solution la moins onéreuse. Elle consiste en l'excavation d'une tranchée dont les parois sont des talus réglés suivant une pente dépendant des caractéristiques géotechniques du terrain et telle que la stabilité soit assurée naturellement pendant les travaux. Si le sol est de qualité médiocre et la fouille profonde, cette solution suppose que l'on dispose d'une largeur très supérieure à celle de l'ouvrage lui-même. Une telle solution peut être étendue au cas où le fond de la fouille est au-dessous du niveau de la nappe phréatique à condition qu'il existe sous le radier, et à une profondeur raisonnable sous ce niveau (quelques mètres), un horizon de terrain imperméable. Préalablement à l'excavation de la fouille, on réalise alors en tête de talus une paroi moulée souple étanche descendue jusqu'à l'horizon imperméable et formant écran à l'écoulement de l'eau vers la fouille. On complète généralement ce dispositif par des parois transversales

(par exemple tous les 50 à 100 m) assurant la constitution de véritables caissons à l'intérieur desquels il est possible de construire les ouvrages. On n'évite pas ainsi totalement la nécessité d'un dispositif de pompage dans la fouille, mais on en réduit considérablement l'importance et le débit. On diminue aussi très largement les conséquences néfastes du rabattement vis-à-vis de l'environnement de la tranchée et notamment les risques de tassements.

La paroi souple est une paroi exécutée suivant la technique de la paroi moulée, mais dans laquelle l'écran a seulement un rôle d'étanchéité et non de portance. La différence essentielle porte sur la nature du matériau que l'on substitue à la boue de forage. Au lieu de béton, il s'agit d'un mélange constitué généralement d'argile/ciment.

## 2.2 -Fouille blindée ouverte

Dans ce cas, les parois de la fouille sont taillées verticalement. La largeur des emprises du chantier correspond sensiblement à la largeur de l'ouvrage.

Plusieurs méthodes peuvent être employées pour assurer la stabilité des parois :

**Blindage traditionnel en bois ou mixte** : (bois/métal) exécuté au fur et à mesure de l'approfondissement de la fouille. Un tel blindage peut être constitué de planches verticales, de lisses horizontales et de butons.

**Parois berlinoises ou parisiennes** : il s'agit de profilés métalliques ou de poteaux préfabriqués en béton fichés verticalement à l'intérieur d'un forage de diamètre approprié.

**Palplanches** : Le principe en est peu différent de celui des parois berlinoises ou parisiennes. Elles peuvent être utilisées lorsque l'ouvrage est sous nappe, mais présentent l'inconvénient de provoquer beaucoup de bruit et de nuisances lorsqu'il s'agit de travaux en ville

**Parois moulées coulées en place ou préfabriquées** : À la différence des méthodes précédentes, on peut ici, dans certains cas, utiliser l'élément de blindage comme paroi de l'ouvrage définitif lui-même. Après exécution des parois, la tranchée est excavée par paliers successifs. Pour assurer la stabilité des parois en phase transitoire, on met en place des butons transversaux ou des tirants répartis en un ou plusieurs niveaux selon la

profondeur de la fouille. Lorsque le fond de fouille est atteint, on coule le radier définitif du tunnel puis la dalle de couverture. La liaison de ces deux éléments avec les parois est assurée au moyen d'aciers laissés en attente dans les parois et dépliés après dégagement du parement.

La méthode est également valable lorsque l'ouvrage est situé sous la nappe phréatique. Si le terrain encaissant est très perméable, il peut être nécessaire de limiter, en phase de travaux, le débit et la vitesse de percolation de l'eau au travers du fond de la fouille. Pour y parvenir, et s'il existe un horizon imperméable à faible profondeur, il suffit d'ancrer les parois dans cet horizon. Dans le cas contraire, on réalise, en pied de paroi, à une profondeur suffisante pour assurer sa stabilité, un « bouchon » injecté constituant le fond d'une boîte étanche à l'intérieur de laquelle on construit l'ouvrage. Le terrain naturel, laissé en place au-dessus du bouchon, sert à la fois de lest et de filtre (possibilité de mettre en place un dispositif de drainage) pour stabiliser l'ensemble.

L'une des applications les plus récentes et la plus importante de ce procédé est la construction de la première ligne du métro du Caire en Egypte qui s'est effectuée dans les alluvions très perméables du Nil. La coupe type du tunnel courant est donnée en Fig2.

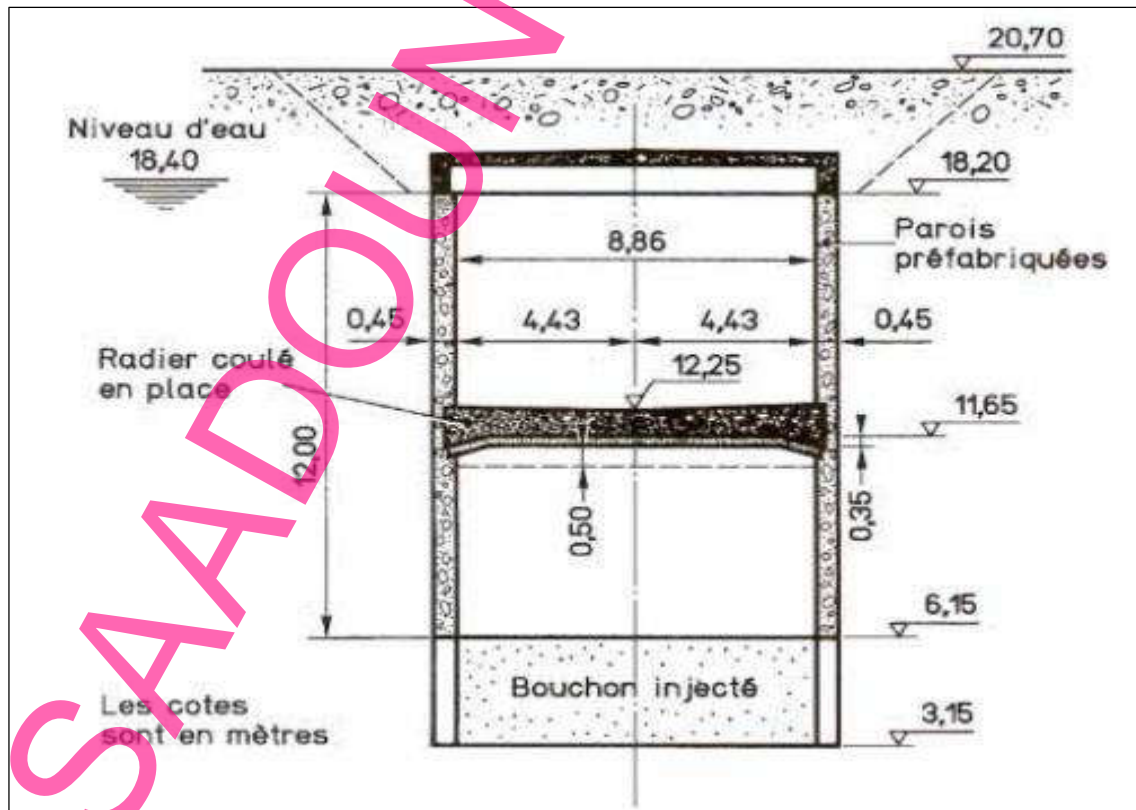


Figure .2. Section du métro du Caire [13].

Les parois préfabriquées qui ont été utilisées présentent l'avantage, par rapport aux parois coulées en place, d'une meilleure régularité du parement quant à la précision géométrique.

### 2.3 -Fouille blindée couverte [13].

On désigne aussi parfois cette méthode par le terme *cut and cover* qui signifie que l'on procède d'abord au découpage vertical du sol pour y réaliser les parois, puis que l'on construit la couverture du tunnel. L'excavation n'intervient qu'ensuite ; elle est réalisée sous dalle, de même que le bétonnage du radier. Les parois exécutées en première phase doivent être capables de porter la dalle supérieure et sa surcharge de terre sans que la réalisation des phases suivantes ne risque de provoquer des mouvements et des désordres. On utilise, dans la quasi-totalité des cas, les *parois moulées*.

La méthode présente l'avantage de permettre la restitution de la surface à son usage initial (rétablissement de la circulation) dans les délais les plus courts possible. Par ailleurs, la dalle supérieure assurant le butonnage des parois avant le creusement, il est généralement possible d'éviter la mise en place de butons métalliques provisoires. Par contre, la réalisation sous dalle de l'excavation et du radier peut entraîner des surcoûts importants par rapport au travail à l'air libre.

La méthode est donc, en général, réservée aux travaux à réaliser sous chaussée dans des quartiers urbains très fréquentés. Dans ce cas, la construction de la dalle supérieure se fait souvent par moitiés successives de façon à permettre le maintien permanent de la circulation sur un côté, puis sur l'autre. C'est cette solution qui a été adoptée dans la zone la plus centrale de la ligne N1 du métro du Caire.

## 3- Méthodes de creusement des ouvrages souterrains

### 3.1-Abattage à l'explosif

Cette technique est ancienne mais reste encore très utilisée dans l'excavation des tunnels. Elle présente l'avantage de progresser plus rapidement et elle est particulièrement plus économique que l'abattage mécanique. La poudre noire ou explosif noir (salpêtre + charbon + soufre) fut longtemps utilisée avant que

n'apparaissent des produits plus performants tels que la dynamite ou les émulsions, mais présente plus de dangers liés aux fortes ondes de choc libérées ou aux émanations de gaz après l'abattage

En souterrain, on utilise des explosifs brisants (vitesse de détonation  $\geq 4000$  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 pression, ouvre ces fissures disloque le matériau. Le "surplus" de cette énergie expulse les blocs disloqués.

Les explosifs AN/FO au nitrate fuel ne peuvent être employés en souterrain à cause de leur fluidité qui ne permet de les utiliser que dans des trous verticaux ou très inclinés et hors d'eau. Pour la réalisation d'une excavation souterraine à l'aide de l'abattage à l'explosif, il est primordial de choisir un bon plan de tir pour bien contrôler la fissuration du massif. La première étape d'un plan de tir consiste à créer une cavité initiale en direction de laquelle on pourra abattre la roche : c'est le rôle du tir du bouchon. De nombreux modèles de bouchons ont été utilisés. Les bouchons à trous parallèles tendent à se généraliser en raison de la simplification du travail de foration dû au parallélisme de tous les trous d'une volée et parce que les machines actuelles de foration (les jumbos) qui équipent la plupart des chantiers de tunnels. Pour atténuer la vibration, les nuisances sonores et pour assurer une bonne fragmentation de la roche, on utilise des détonateurs tels que les modèles électriques instantané ou à retard (très utilisés en tunnel), le modèle non électrique ou des détonateurs électroniques.

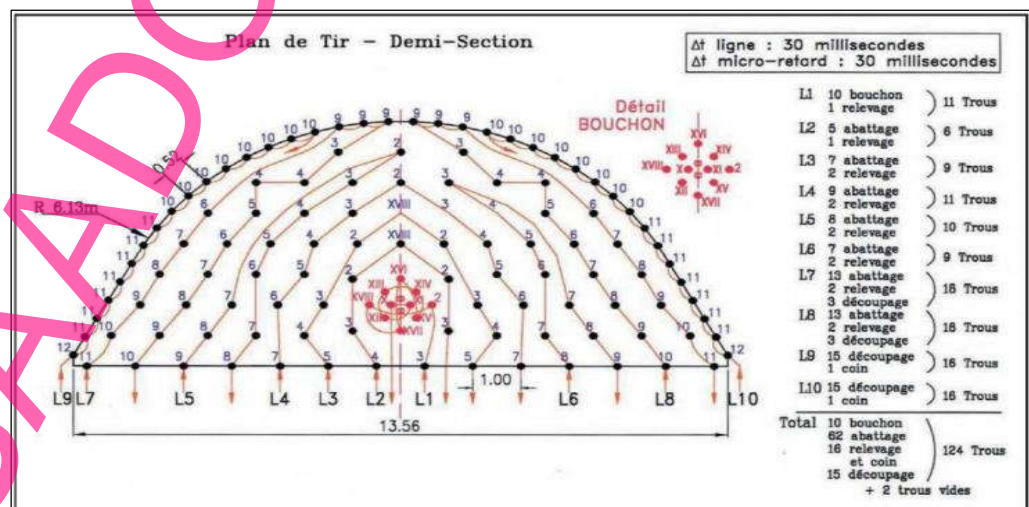


Figure .3. Plan de tir séquentiel pour le creusement d'un ouvrage souterrain [13].

Dans cette technique on utilise habituellement des retards ordinaires de 0.5 second (entre les numéros consécutifs) pour les tirs en galerie ; tandis que dans le cas des ouvrages possédant des grandes sections, on utilise généralement des microretards de 25 ms.

La section d'un ouvrage à abattre comporte généralement trois parties :

- **La zone de bouchon** : localisée au centre du front de taille, elle permet de dégager une surface libre, qui permettra d'obtenir une bonne fragmentation des roches. Les trous de forages dans cette zone sont inclinés vers l'intérieur de la surface ;
- **La zone d'abattage** : tout autour de la zone de bouchon, elle permet de dégager la majorité de la section à abattre. Cette zone peut être constituée d'une seule ligne de tir en spirale ou plusieurs concentriques si le tir est séquentiel. Les trous de mine dans cette zone sont soit horizontaux ou légèrement inclinés.
- **La zone de contour** : avec des trous inclinés, la disposition de trous permet de bien cadrer le profil du tunnel.

### Purge et marinage

L'opération de purge consiste à faire tomber de la voûte et du front les blocs et les écailles non stables. Le marinage des déblais consiste à charger et évacuer les déblais « purgés ». Il est toujours précédé de la purge de la voûte et du front. Parfois la mise en œuvre d'une première couche du béton projeté précède également le marinage.

Dans le creusement des ouvrages souterrains l'abattage à l'explosif se fait par deux types des trous : abatage par trous de mine et abatage par trous profonds

Les trous de mines horizontaux sont applicables pendant l'abattage du minerai par les tranches descendantes et montantes. Les trous de mines verticaux sont utilisés lors de l'abattage du minerai par gradin droits et renversés en tranches descendantes et ascendantes. Les trous de mines inclinés sont favorables en présence des fissures du minerai pour une meilleure utilisation de leur direction (des plans de fissures) sur l'onde d'explosion. La disposition des trous de mine en éventail est employée lors de la récupération des piliers de protection et de l'utilisation des méthodes d'exploitation appropriées.

La profondeur des trous profonds varie de 5 jusqu'à 60m, et même plus, et le diamètre de 30-40mm jusqu'à 150 – 200mm. Les trous profonds peuvent être sondés dans une tranche parallèlement, en éventail ou en faisceau. La disposition *parallèle* assure une utilisation plus complète de la longueur des trous profonds, répartition régulière des charges sur la longueur des trous. La disposition *en éventail* est plus répandue. Sa qualité principale repose sur la réduction du volume des travaux de découpage parce qu'on fore plusieurs trous de même endroit. De même, elle est plus économique lorsque la vitesse de forage est supérieure à 10m/poste, et le diamètre des trous varie de 100 à 150mm. Les trous *profonds en faisceaux* sont possibles lors de la récupération des piliers de protection entre les étages et les chambres. Cette opération consiste à forer plusieurs éventails au même lieu et dans quelques plans.

### 3.2-Abattage mécanique

Plus récente que la méthode d'abattage à l'explosif, l'abattage mécanique s'est développé principalement à partir des années 50. L'évolution de la technologie a permis depuis lors, de développer des machines à forer avec des outils d'abatage plus résistants et plus performants pour des roches encore plus dures.

Les caractéristiques des machines à forer existantes sont très variées, la plupart d'entre elles ont un domaine d'emploi physiquement limité par la nature de leurs outils et la puissance disponible, et même à l'intérieur de ce domaine, elles peuvent rencontrer des limitations économiques si leur rendement est trop faible ou si l'usure des outils est trop forte.

Il existe plusieurs types de machines à forer :

- Machines à attaque globale : attaquant en une seule passe la totalité de la section qui est de forme circulaire (Exemple : le tunnelier) ; Machines à attaque partielle ou ponctuelle : doivent se déplacer pour balayer tout le front de taille. L'expérience montre que l'emploi des machines à attaque ponctuelle (généralement équipées de pics) doit se limiter à l'excavation des roches de dureté moyenne (résistance à la compression simple maximum de 50 ou 80 MPa suivant la puissance de la machine et l'état de fracturation du massif rocheux) .Les machines à forer au rocher emploient deux types d'outils : les pics et les molettes.



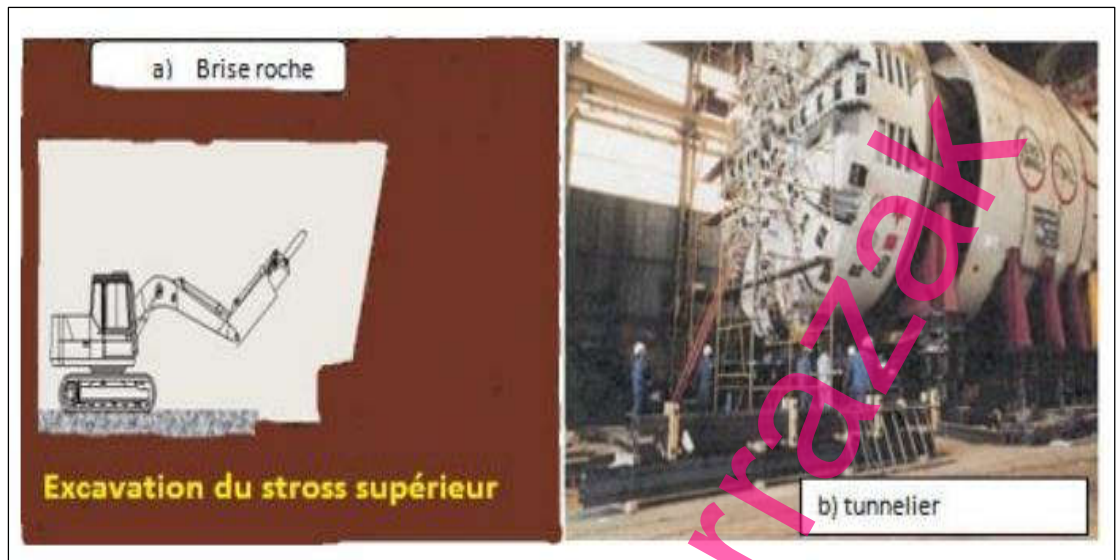


Figure .4. Machines d'abattage mécanique [22].

### 3.3- Méthodes d'excavation de la section d'un ouvrage souterrain

L'un des critères importants dans la conception des ouvrages en souterrains tels que les tunnels ou les galeries minières, après le choix de la technique d'excavation est de définir la manière dont la section sera traitée. Lors de l'excavation de la section du tunnel, celle-ci peut être prise entièrement dans son intégralité ou partiellement.

La technique de percement des galeries s'effectuait en sept étapes successives :

- 1 - Creusement d'une petite galerie pilote située près du futur plafond de la galerie définitive.
- 2- Elargissement de cette galerie, mise en sécurité et maçonnerie de la voûte définitive.

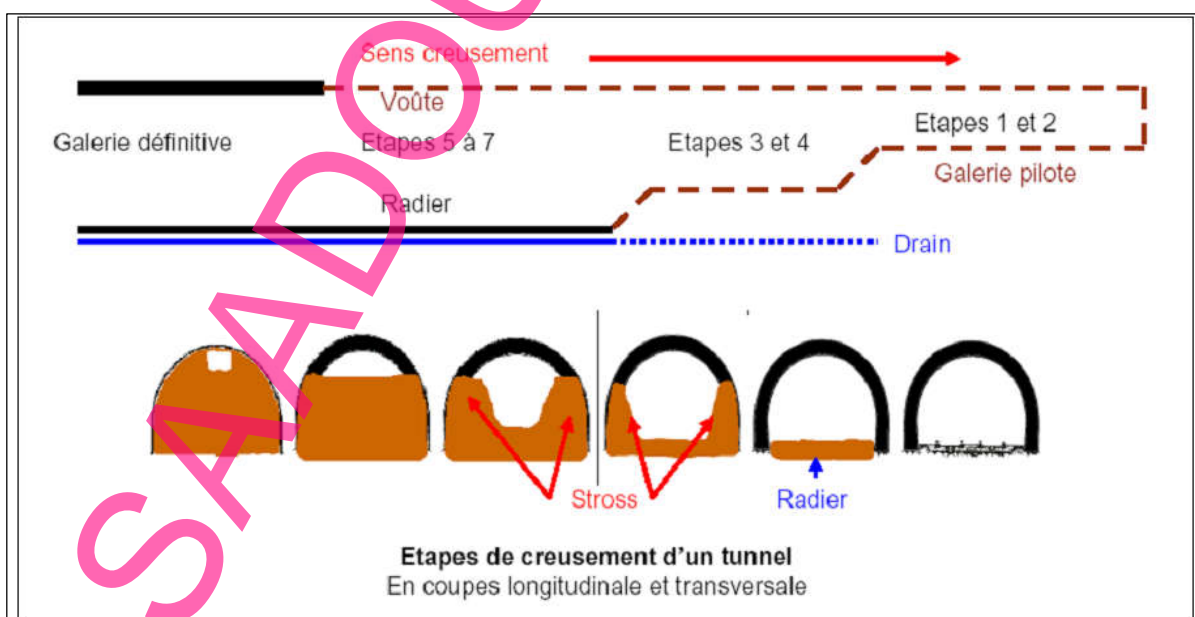
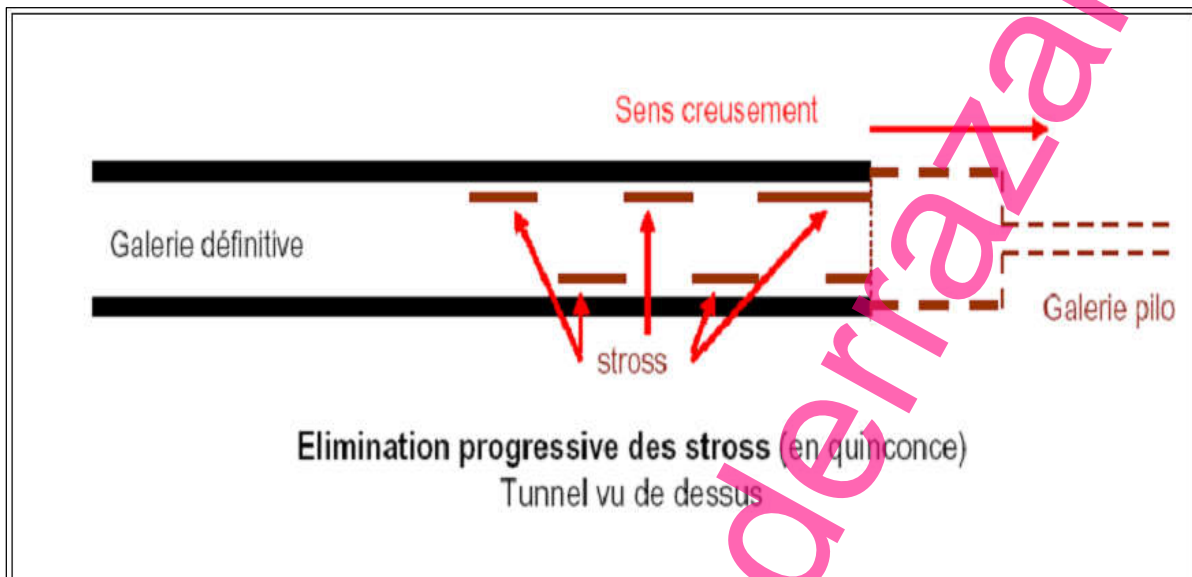


Figure .5. Différents étapes de creusement d'un tunnel [33].

- 3- Creusement de la partie centrale du sol (radier).
- 4- Elimination en quinconce des talus latéraux (stross) de soutien de la voûte.



**Figure .6.** Elimination progressive des stross de tunnel [37].

- 5- Et remplacement par les piédroits (parois latérales du tunnel).
- 6- Creusement d'un ou plusieurs drains d'évacuation des eaux d'infiltration et finition du radier.
- 7- Pose du ballast et de la voie.

### 3.4- Excavation à pleine section et demi-section

Par méthode de creusement à pleine section, il convient de comprendre les techniques d'avancement donnant lieu à un dégagement complet de la section principale de l'ouvrage en une seule fois.

L'emploi du creusement à pleine section nécessite l'emploi d'un matériel important (grande hauteur de l'excavation, importance des volumes de marirage à chaque volée) Cette technique est bien adaptée pour des longueurs importantes de tunnels (exemple : le tunnel sous la manche longue de 50 km) et dont les terrains sont homogènes avec l'usage d'une méthode uniforme de soutènement (pose de voussoir, usage de boulonnage et de béton projeté) sur toute la longueur du tunnel.



**Figure. 7.** Creusement des excavations par pleine et demi section. [38].

L'excavation par pleine section (lorsque ses conditions d'application sont réunies) permet d'obtenir un meilleur contrôle des déformations souvent observées lors du creusement des ouvrages. Le creusement par demi-section est beaucoup plus indiqué dans les terrains homogènes nécessitant l'emploi de soutènement important.

### 3.5- Excavation par section divisée

Cette technique d'excavation permet de limiter les risques d'instabilité des parois et surtout du front de taille du fait des grandes dimensions et l'absence auparavant de techniques fiables de stabilisation de ce dernier. Elle permet également dans le cas où les caractéristiques des terrains ne sont pas connues de faire des avancées de petites sections et d'en profiter pour évaluer la qualité du rocher et mettre en place un système de soutènement efficace.

La Fig. 8 montre des exemples de techniques d'excavation par section divisée avec les numéros indiquant les ordres d'excavation. Contrairement aux méthodes précédentes, cette technique d'excavation demande beaucoup plus de temps et de la minutie dans les opérations pour s'assurer de la conformité des dimensions et du bon assemblage des dispositifs de soutènement dans l'ouvrage.

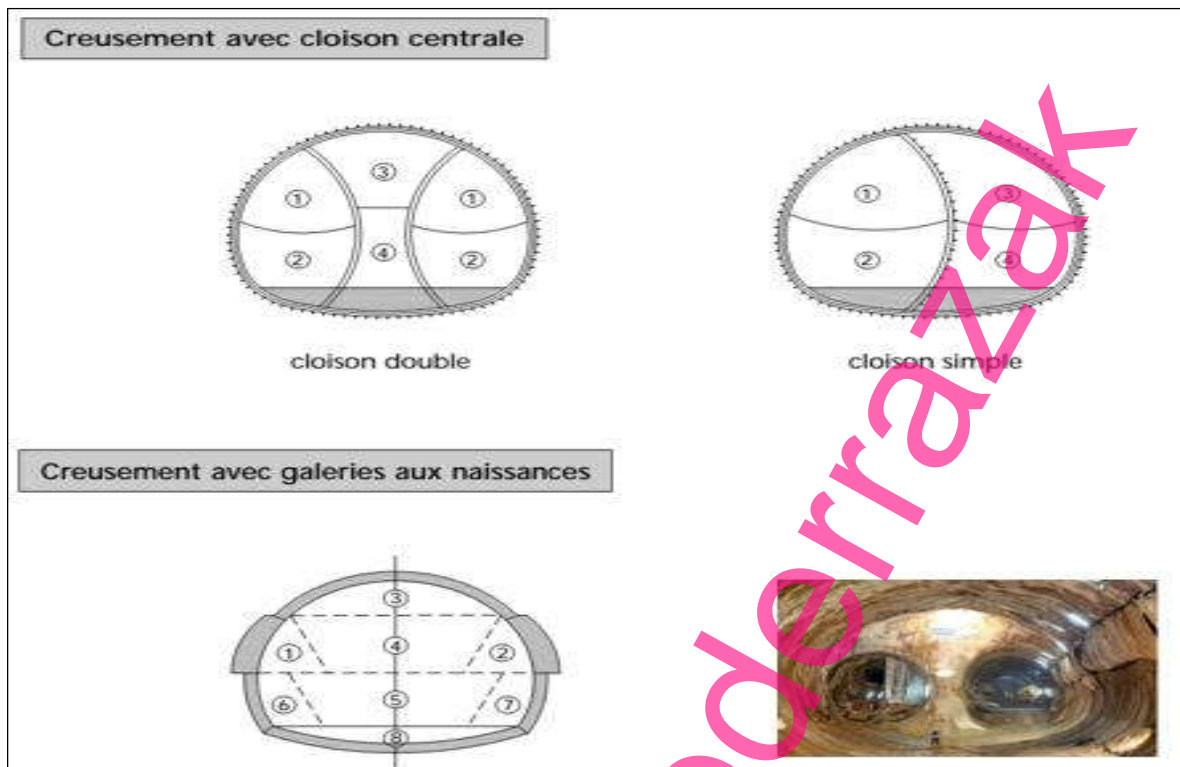


Figure .8. Excavations par section divisée [39].

La méthode de creusement en section divisée consiste en l'ouverture préalable d'une (ou plusieurs) galeries de petites sections dont une partie du soutènement participe au soutènement de l'excavation totale à réaliser. La section peut être divisée de différentes manières. Ces galeries peuvent être exécutées sur toute la longueur de la zone à réaliser en section divisée avant le début de l'excavation du reste de la section.



Figure .9. Creusement par section divisée avec cloison centrale double [40].

Une petite galerie peut être réalisée pour d'autres raisons (limitation des effets de l'explosif, ventilation du chantier, reconnaissance, drainage, traitement préalable de la section à excaver.

#### 4-Choix de la forme et dimensions des sections transversales des ouvrages miniers.

La forme des sections transversales des excavations minières est choisie, principalement, sur la base des propriétés physiques et mécaniques des roches dans lesquelles doit être construite l'excavation, l'importance de la pression des terrains, destination et durée de service de l'excavation matériaux et le type du soutènement.

Bien que les formes curvilignes doivent nous assurer une stabilité des excavations du point de vue exploitation de la surface de la section transversale, la forme rectangulaire de la section est la plus économique.

Le choix final, de la forme de la section transversale et le type du soutènement, doit respecter les règles de sécurité et les normes de constructions suivant la projection de creusement et de constructions établis par des organismes de projection des mines.

Dans la pratique minière les formes, des sections transversales des excavations, les plus appliquées sont celles en arc, en voûte, et trapézoïdale.

Dans la pratique minière, les formes en arcs et en voûtes sont appliquées lors de l'emploi d'un soutènement en bétons injecté, par boulonnage et cadres métalliques. Dans le cas de roches dures, avec coefficient de dureté  $\geq 10$  suivant la classification de M. Protodiakonov, les excavations minières avec une forme en arc de la section transversales peuvent être réalisées sans soutènement.

Les excavations minières avec une forme voûtée de la section transversale et un soutènement par béton armé sont généralement réalisées lors de la construction des recettes. Dans le cas de terrains instable, surtout du côté de la sole de l'excavation, la forme de l'excavation doit être en double voûte.

Les excavations minières avec une forme trapézoïdale de la section transversale et un soutènement en bois, sont généralement réalisées lors d'une courte durée de service des excavations. L'avantage de cette forme d'excavation réside dans l'exploitation de la totalité de la surface de sa section.

Les excavations minières avec une forme rectangulaire de la section transversale sont réalisées lors de construction des salles de recettes ou bien dans le cas d'excavation minières avec soutènement par boulonnage.

Les dimensions de la section transversale d'une excavation minière (largeur, hauteur, diamètre et la surface) dépendent de sa destination, gabarits des principaux engins miniers, espace pour le mouvement des mineurs et ceux arrêtés par les normes et règles de sécurité. Lors de la projection des excavations minières, il est nécessaire de tenir compte dans les calculs de la possibilité d'affaissement des roches.

### 5- Forme trapézoïdale

La méthode de calcul d'une section de forme trapézoïdale avec soutènement en bois fig.1 est la suivante :

- Hauteur de l'engin de transport «  $h$  », établie en fonction des caractéristiques des engins de transport.
- Hauteur à partir du ballaste jusqu'au niveau de la tête des rails «  $h_a$  »
- Hauteur de la puissance du ballaste «  $h_\sigma$  »
- Hauteur à partir de sol jusqu'au niveau de la tête des rails

«  $h_B = h_a + h_\sigma$  »

- Hauteur de l'excavation à partir de la tête des rails jusqu'au chapeau du cadre de soutènement «  $h_1$  », établi sur la base des normes de sécurité.
- Hauteur de l'excavation à partir de la tête des rails jusqu'au chapeau du cadre de soutènement, avant l'affaissement «  $h' = h_1 + 100$  »
- Hauteur de l'excavation à partir de sol jusqu'au chapeau du cadre de soutènement «  $h_2 = h_1 + h_a$  »
- Hauteur de l'excavation à partir de sol jusqu'au chapeau du cadre de Soutènement, avant l'affaissement «  $h_2' = h_2 + 100$  »
- Hauteur de l'excavation à partir de sol jusqu'au chapeau du cadre du soutènement «  $h_3 = h_1 + h_B$  »

- Hauteur de l'excavation à partir de sol jusqu'au chapeau du cadre du Soutènement, avant affaissement «  $h_3' = h_3 + 100$  »
- Hauteur projetée de l'excavation (hauteur à terre nue),  
«  $h_4 = h_3 + d + 50$  », Dans le cas d'un soutènement jointif (continu), «  $h_4' = h_3 + d$  » où  $d$ : la hauteur entre chapeau du cadre de soutènement et la partie supérieure de l'excavation
- Hauteur, à partir de la tête des rails jusqu'au de la suspension des câbles électriques, «  $h_{\text{КП}} = 1800 ; 2000 ; 2200 \text{ mm}$  »
- Largeur de l'engin roulant «  $A$  ». elle est établie en fonction des caractéristiques techniques de l'engin minier.
- Angle d'inclinaison des montants du cadre,  $\alpha = 80^\circ$ .
- Largeur de l'espace au niveau 1800 mm à partir du ballaste, destiné pour le mouvement des mineurs, «  $n \geq 700 \text{ mm}$  »
- Largeur de l'espace du mouvement des mineurs au niveau des engins roulants, «  $n' = n + [1800 - (h + h_a)] \text{ ctg } \alpha$  »
- Largeur de l'espace entre l'engin roulant et le soutènement, au niveau de la hauteur de l'engin minier, «  $m$  » Cette valeur est établie suivant les normes de sécurité.
- Largeur nette d'une excavation à une seule voie, à la hauteur de l'engin roulant, «  $B = m + A + n'$  »
- Dans le cas d'une double voie, cette largeur sera, «  $B = m + 2A + p + n'$  »,  $p \geq 200 \text{ mm}$  où  $p$ : distance de sécurité (mm)
- Largeur nette au niveau du toit de l'excavation, «  $l_1 = B - 2(h_1 - h) \text{ ctg } \alpha$  »
- Largeur nette au niveau du ballaste de l'excavation, «  $l_2 = B + 2(h + h_a) \text{ ctg } \alpha$  »
- Largeur à terre nue au niveau du toit de l'excavation,  
«  $l_3 = l_1 + 2d + 100$  »
- Dans le cas d'un soutènement jointif (continus), «  $l_3 = l_1 + 2d$  »
- Largeur à terre nue au niveau de sol de l'excavation,

$$\ll l_4 = B + [(2 (\cos\alpha \cdot (h+h_B) + d + 50)) / \sin\alpha] \gg$$

- Dans le cas d'un soutènement jointif,

$$\ll l_4 = B + [(2 (\cos\alpha (h+h_B) + d)) / \sin\alpha] \gg$$

- Surface de la section nette de l'excavation, après l'affaissement,

$$\ll S_n = 0,5 (l_1 + l_2) h_2 \gg$$

- Surface de la section à terre nue de l'excavation, avant l'affaissement,

$$\ll S_{tn} = 0,5 (l_3 + l_4) h_4' \gg$$

- Périmètre de l'excavation après affaissement, «  $P' = l_1 + l_2 + (2 h_2 / \sin\alpha)$  »

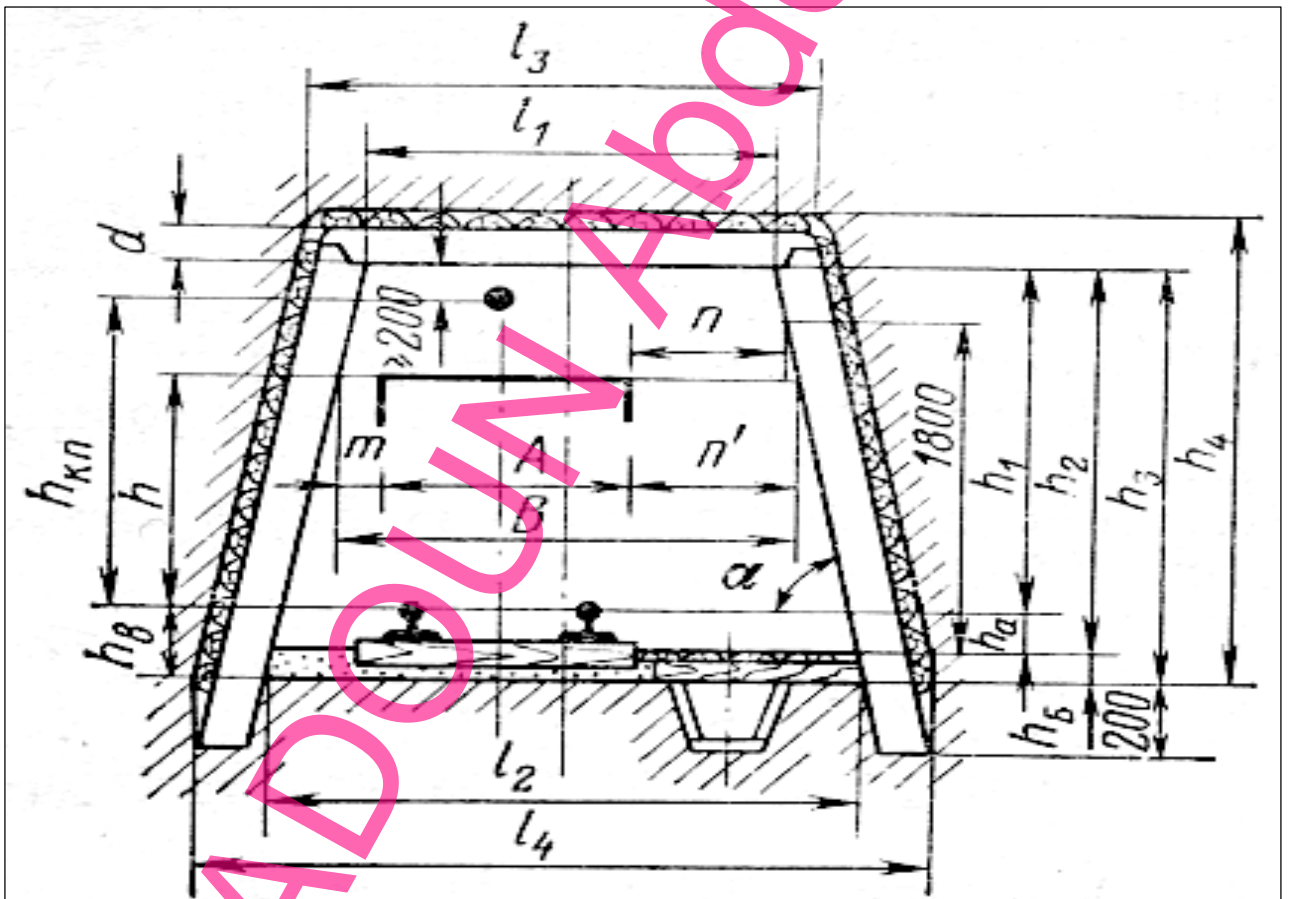


Figure.10. schéma de la section transversale d'une excavation de forme trapézoïdal [23].



## Conclusion

Les méthodes de creusement des ouvrages souterrains consistent à construire en travail séquentiel différentes étapes essentielles :

- excavation (abattage) sur une longueur limitée (volée) pour assurer la stabilité immédiate ;
- évacuation des déblais (marinage) ;
- mise en œuvre du soutènement (provisoire) ;
- les phases de revêtement (définitif) et d'équipements sont alors faites ultérieurement, et de façon indépendante de ces opérations.

## Exercices d'application

### EXERCICE 1

Soit un gisement horizontal situé à une profondeur 75 m. l'exploitation par la méthode des chambres et piliers impose un dimensionnement par la théorie de l'aire tributaire. Sachant que la largeur de la bande à extraire est de 5 m. alors que le pilier carré à une dimension de 7 m et une hauteur de 2,2 m.

-Calculer le facteur de sécurité  $F_s$  sachant que :

La résistance ultime est  $S = 6,5 \cdot H^{-0,55} \cdot W_p^{0,46}$  MPa. La masse volumique du minerai est  $2,55 \text{ t/m}^3$  On prendra  $g=9,81 \text{ m/s}^2$

-Calculer taux de défrètement, taux d'extraction et taux des pertes

-Si le facteur de sécurité est faible, quel est votre exigence ou proposition de sécurité pendant le creusement et l'exploitation de ce gisement ?

### EXERCICE 2

Un tunnel de 80 m de profondeur avec une largeur de 8 m est creusé dans une roche sèche complètement broyé ayant une masse volumique égale  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

L'angle de frottement interne de roche  $\phi$  égale  $30^\circ$  ( $\text{tg } 30^\circ=0,57$ ) avec facteur de

chargement de 14,3, la dureté des roches est 12, Sachant que durée de service de cet tunnel est 4 ans.

- Calculer largeur de la voûte ? -Calculer Largeur limite de l'excavation ?
- Donner les remarques de soutènement pendant le creusement de ce tunnel ?

### EXERCICE 3

Pour accéder au gisement minéralisé il est toujours obligé de creuser des différentes d'ouvrage et d'excavation, dans notre cas on a une excavation minière de type galerie au jour de forme trapézoïdale avec soutènement discontinu en bois

À la base des données suivantes :

$h=1100$  mm ,  $h_1=1500$  mm  $n=700$  mm ,  $h_a=300$  mm ,  $h_o=200$  mm ,  $d=400$  mm ,  $\alpha = 80^\circ$  .  $A=1000$  mm ,  $m=250$  mm , nombre de voie :1

Déterminer des dimensions suivantes :

$h'$  ,  $h_B$  ,  $h_2$  ,  $h_3$  ,  $h_4$  ,  $n'$  ,  $B$  ,  $l_1$  ,  $l_2$  ,  $l_3$  ,  $l_4$  , et  $S_n$  après l'affaissement.

### Correction Exercice N 1

Calcul contraintes verticales

$$P_{zz} = \sigma_v = \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot h_i, \text{ (pas)}$$

Calcul le poids volumique des roches :  $\gamma_i = Mv \cdot g = 2550 \cdot 9,81 = 25015,5$  N/m<sup>3</sup>

$$\sigma_v = 25015,5 \cdot 7,5 = 187616,25 \text{ pas} = 1,876 \text{ Mpa}$$

Calcul contraintes des piliers carré

$$\sigma_p = \sigma_v \cdot \left[ \frac{(W_0 + W_p)}{W_p} \right]^2 = 1,876 \cdot (5 + 7/7)^2$$

$$\sigma_p = 5,51 \text{ Mpa} \dots$$

Facteur de sécurité dans la méthode air tributaire  $f_s = \frac{s}{\sigma_p}$

La résistance ultime est  $S = 6,5 \cdot H^{-0,55} \cdot W_p^{0,46}$  MPa

$$S = 10,31 \text{ Mpa}$$

$$\text{Donc } f_s = 10,31 / 5,51 = 1,87$$

Calcul taux de défrètement  $r = \frac{W_0}{W_0+W_p}$  donc  $r = \frac{5}{5+7}$  Alors  $r = 0,41 = 41 \%$

Calcul taux d'extraction  $Tex = 1 - \left(\frac{W_p}{W_0+W_p}\right)^2$

$Tex = 1 - \left(\frac{7}{7+5}\right)^2$  donc  $Tex=0,65=65 \%$

Calcul taux des pertes  $Tper = 100 \% - Tex$

$Tper = 100 - 65$  Alors  $Tper = 35 \%$

Un facteur de sécurité faible exige un redimensionnement soit:

-Réduire la largeur de l'excavation,

-Augmente la largeur du pilier,

-Réduire la hauteur du pilier (augmente S)

### Solution Exercice N2

une roche complètement broyé donc  $H_p=1,1 (B+H_t)$

$14,3=1,1 (8+H_t)=\text{Donc } H_t=5 \text{ m}$

1-Largeur de surcharge des terrains égale = largeur de la voûte

$$B_t = X_b = b + 2.H.tg\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)$$

Donc  $B_t=8+2.5 \text{ tg}(45-15)$  on a  $\text{tg}(30)=0,57$

Après le calcul  $B_t=13,7 \text{ m}$

$$B_L = \frac{K_e \cdot \delta_c \cdot m}{\gamma \cdot h}$$

$F=12$  donc  $\delta_c = 1200 \text{ kgf/cm}^2$

$K_e$  : Coefficient de correction tenant compte du type de l'excavation, pour tunnel  $K_e$

1,4.....0,5pt  $m=1$

$$B_L = \frac{1,4 \cdot 1200 \cdot 1}{2,5 \cdot 80} \quad \text{Donc } B_L=8,4 \text{ m}$$

Roche Complètement broyé donc Pression latéral considérable

## *Références bibliographiques*

- [1].BOUVARD-LECOANET A, COLOMBET G et ESTEULLE F, (1992). Ouvrages Souterrains (Conception- Réalisation- Entretien, 2 ème édition, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2 ème Edition, pp.113-235
- [2]. ATKINSON, T., (1983). Surface Mining and Quarrying: Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Surface Mining and Quarrying Symposium, Institution of Mining and Metallurgy, London, Oct., 449 pp.
- [3]. SODERBERG, A., and, D.O., (1968). Pit Planning and Layout, Surface Mining, Sec. 4.1, E.P. Pfleider, ed., AIME Rausch, New York, pp.141–165
- [4]. PFLEIDER, E.P., ed., (1968). Surface Mining, AIME, New York, 1061 pp.
- [5]. ANON., (1980). The Mine Development Process,” Annual Report, Placer Development Ltd., Vancouver, BC, Canada, 49 pp.
- [6]. ANON., (1983a) .Anatomy of a Mine from Prospect to Production, General Technical Report INT-35 (Rev.), US Dept. of Agriculture, Forest Service, Ogden, UT, 69 pp.
- [7]. ANON., (1983b). Mining Taxation: A Global Survey, Coopers & Lybrand, Inc., New York, 66 pp.
- [8]. MARTIN. F., (2012). Mécanique des roches et travaux souterrains : cours et exercices corrigés. Ed. BG Ingénieurs Conseils, ENS Cachan, France.
- [9].CHIBKA, N. (1980) .Exploitation des gisements métallifères. Edition n°623. 1/80, Université de Annaba, office des publications universitaires, Hydra, Alger.
- [10]. C.E.T (Centre d'Etude des Tunnels), (1998) .Dossier pilote des tunnels-Génie Civil (Procédés de creusement et de soutènement), section 4, pp.3-4.
- [11]. HARTMAN, H.L., (1987). Introductory Mining Engineering, Wiley, New York, 633 pp.
- [12]. HUSTRULID, W.A., ed., (1982). Underground Mining Methods Handbook, AIME, New York, 1753 pp.
- [13].GESTA P, (1995). Travaux souterrains”, Technique de l'Ingénieur, traité Construction pp.2-6,22-24.<http://www.techniques-ingenieur.fr/>,
- [14].AFTES, (2003). Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains, Tunnels et ouvrages souterrains (177) : 138-186.pages.
- [15].AFTES, (2003). Recommandations relatives à la caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains, TOS 177,
- [16].AFTES,(2005).Méthodes d'auscultation des ouvrages souterrains. Référence GT19R2F1, pp.13

- [17]. ANDERSON J. (1998). Minimising underground construction risks requires maximum engineering efforts, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No 4, pp. 365-
- [18]. ANON, (1995). The description and classification of weathered rocks for engineering purposes. Geological Society Engineering Group Working Part Report. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 28, pp. 207-242.
- [19]. GATELIER N., (2001). Etude expérimentale et théorique de l'endommagement des roches anisotropes. Thèse de doctorat, Grenoble.
- [20]. WANGT. T., HUANG T.H., (2002). An experience of tunnelling in mudstone area in southwestern Taiwan, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol 17, Issue 4, pp. 425-436.
- [21]. Tymfristos tunnel, (2003). <http://www.civil.ntua.gr>.
- [22]. IDRIS J (2007). Accidents géotechniques des tunnels et des ouvrages souterrains Méthodes analytiques pour le retour d'expérience et la modélisation numérique pp21, Thèse de doctorat, Nancy université - institut national polytechnique de lorraine
- [23]. SME, (2011). *Mining Engineering Handbook*, 3<sup>rd</sup> edition,. Society for Mining Metallurgy and Exploration, USA
- [24]. BOUVARD-LECOANET A, COLOMBET G et. ESTEULLE F, (1992). *Ouvrages souterrains - Conception, réalisation, entretien*, Presses de l'ENPC, Paris
- [25] CETU, (1998). Dossier pilote des tunnels : Génie Civil / Conception et dimensionnement, vol. 3, Ministère de l'Equipement, Bron
- [26]. PROTODYAKONOV.M, (1962). Mechanical properties and drillability of rocks. In 5th U.S. Symp. Rock Mechanics Fairhurst C. ed. (Minnesota).
- [27]. BRADY P.H.G. et BROWN E.T., (1998). *Rock Mechanics For Underground Mining*, i 98Sj
- [28]. BARTON, N. LIEN R. et LUNDE J. (1974). Engineering Classifications of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, in *Rock Mech.* vol. 6.6, pp. 189-236.
- [29]. AFTES, (1993). Texte des recommandations pour une description des massifs rocheux utile à l'étude de la stabilité des ouvrages souterrains. *Tunnels et ouvrages souterrains*, supplément au n° 117, p. 12-31,
- [30]. AFTES, (2003). *Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains*, *Tunnels et ouvrages souterrains* (177) : 138-186.pages.
- [31]. AFTES, (1993). *Recommandations relatives au choix du soutènement en galerie*, TOS hors-série.
- [32]. AFTES (1974). *Choix de type de soutènement en galerie* AFTES GT7R1F2 N°1

- [33]. AFTES (2014). Tunnels et espace souterrain - n°241 - Janvier/Février - Technologie du Boulonnage
- [34]. MACIEJ A, (2012). Modification des classifications géomécanique pour les massifs rocheux schisteux”, Thèse de maîtrise des sciences appliquées de l’Université de Montréal, spécialité de génie minéral, pp.5-112.
- [35]. BLES J.L. FEUGA. B. (1981). La fracturation des roches. BRGM,
- [36]. OULBACHA Z., (2014). Analyse numérique de la stabilité des piliers-dalles en remblai cimenté : une vérification des modèles de Mitchell, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées en génie minéral, École polytechnique de Montréal.
- [37]. AFTES,(2003). Recommandations relatives à la caractérisation des massifs rocheux utile à l’étude et la réalisation des ouvrages souterrains, TOS.
- [38]. AFTES,(1999). Glossaire relatif aux tunneliers, groupe de travail 4, TOS.
- [39]. AFTES, (2000).Recommandations relatives aux choix des techniques d’excavation mécanisées, TOS, (2000).
- [40]. AFTES, (2001).Recommandations relatives à l’utilisation des règles et normes générales de conception et de dimensionnement pour les revêtements de tunnel en béton armé et non armé, TOS 165.

SAADOUN Abdelhak