

COURS DE CREUSEMENT

PROPRIETE DES ROCHES ET DES TERRAINS

Rappel:

L'accès à un gisement de minerais métallique et/ou non métallique et son exploitation nécessitent le creusement d'ouvrages qui créent un « vide » dans les terrains. Ce vide est à l'origine des mouvements de terrains et des manifestations de pression dont la bonne compréhension nécessite tout d'abord quelques connaissances **sur les propriétés des roches.**

Ces études consistent essentiellement à examiner comment un échantillon de roche se comporte devant les efforts qu'on lui fait supporter.

- **Essais à la traction**
- **Essais à la compression simple**
- **Essai de cisaillement**
- **Essais triaxiaux**
- **Nombre de Poisson**

Essais à la traction :

Cet essai se termine par la rupture de la carotte

D'une manière générale, on constate :

- la résistance à la traction d'une roche est toujours faible et de l'ordre de 5 à 30 kgf/cm²
- la résistance à la traction varie avec la direction dans laquelle s'exercent les efforts

En conséquence, une roche résiste très mal à la traction

Essais à la compression simple :

- **Lorsque la charge dirigée vers l'intérieur du solide croît, elle atteint une valeur pour laquelle la roche se désagrège. Il ne s'agit pas d'une rupture brutale mais d'un écrasement**

- La charge pour laquelle apparaissent les premières cassures, rapportée à la section droite de l'échantillon caractérise la résistance à la compression.
- Elle s'exprime en kgf/cm^2 .
-
- La résistance à la compression dépend de la nature des roches :
-
- * Charbon : 30 à 400 kgf/cm^2
- * Schistes : 300 à 800 kgf/cm^2
- * Grés : 600 à 1300 kgf/cm^2
- * Minéral de fer : 100 à 300 kgf/cm^2
- * Granit : 1300 à 2000 kgf/cm^2

Essai de cisaillement :

- Il y a cisaillement lorsque les forces appliquées sont parallèles à la surface de cassure.
- Les roches ne résistent, en général, pas très bien au cisaillement (en moyenne le 1/10 de la résistance à la compression).

Essais triaxiaux :

- Les essais de compression et de traction se font dans des conditions assez éloignées de celles dans lesquelles les roches travaillent réellement dans les terrains qu'elles constituent. C'est pour cela que l'on a mis au point des essais plus compliqués qui se rapprochent davantage de la réalité, ce sont les essais triaxiaux ou essais avec contrainte.
- Les forces sont appliquées sur les 6 faces d'un cube et on peut les faire varier ce qui permet de définir des courbes de déformation.

Nombre de Poisson :

- En appliquant progressivement une compression simple à un échantillon, il en résulte un raccourcissement longitudinal et une dilatation transversale qui sont tous deux proportionnels à la charge appliquée et donc constant et caractéristique d'une roche, on l'appelle Nombre de poisson

-
- $N = \text{raccourcissement longitudinal} / \text{dilatation transversale}$
- Par exemple:

- Ce nombre est toujours supérieur à 2

* charbon 2 à 3 * Schistes : 2,5 à 5

- * Grés 5 à 20

Application des propriétés des roches à l'étude des terrains

- **Terrains vierges :**

-
- Il est assez logique d'imaginer qu'à la profondeur de **H** mètres en dessous de la surface, la pression verticale régnante a pour origine le poids des terrains situés au-dessus. Cette pression est donc : **H. d tonnes forces par mètre carré ou**

-
- **$H \cdot d/10 \text{ kgf/cm}^2$**
- Ou *d* est la densité des roches (*d* est voisin de 2,5)

- **Terrains vierges :**

-
- Cette pression verticale est aussi transmise dans le sens horizontal, et sa valeur est, d'après ce qui précède

- **$d \cdot H/10(m-1) \text{ en kgf/cm}^2$**

-
- **$m = \text{nombre de Poisson}$**

-
- Cette pression horizontale est donc plus élevée pour les roches dont le nombre de Poisson est petit.

- **A 500 mètres de profondeur et pour une densité des terrains de 2,5, la pression verticale est de 125kgf/cm², et la pression horizontale sera par exemple de 62,5kgf/cm² dans le charbon et de seulement 12,5 kgf/cm² dans les grés.**

- Les terrains sont donc soumis a une compression avec étreinte et il peut supporter des pressions très élevées sans être détruit

- **Terrains non vierges**

- Dès que des travaux miniers sont entrepris, ils réalisent des vides qui vont modifier les résultats ci-dessus. L'étreinte pouvant être supprimée, on peut considérer **trois cas principaux :**

- la roche reste dans le domaine élastique et il n'y a pas de rupture. (tenue d'une galerie sans soutènement)

- la roche sort du domaine élastique et se brise en blocs plus ou moins gros qui peuvent glisser les uns par rapport aux autres. Il y a une possibilité d'équilibre des terrains (début d'éboulement qui se stabilise de lui même)
- la roche sort du domaine élastique et les frottements entre blocs sont insuffisants pour équilibrer les pressions. Il n'y a plus d'équilibre des roches et les mouvements sont alors importants . C'est ce que l'on appelle le fluage.

MESURES AU FOND

- Elles peuvent porter sur les pressions et les déplacements.

Mesures de la pression :

Mesures des déplacements :

- * Mesures absolues

Mesures relatives

- Mesures de la pression :
- Voici quelques procédés qui permettent de mesurer une pression
 - Procédé du vérin plat,
 - Capsules manométriques,
- - Jauges de contrainte
- - Injection d'eau,
 - Vitesse du son dans la roche,
- - Charge supportée par les étauçons

- **Mesures des déplacements :**

Tous les travaux miniers conduisent , à plus ou moins brèves échéances, à des mouvements de terrain.

- * **Mesures absolues**

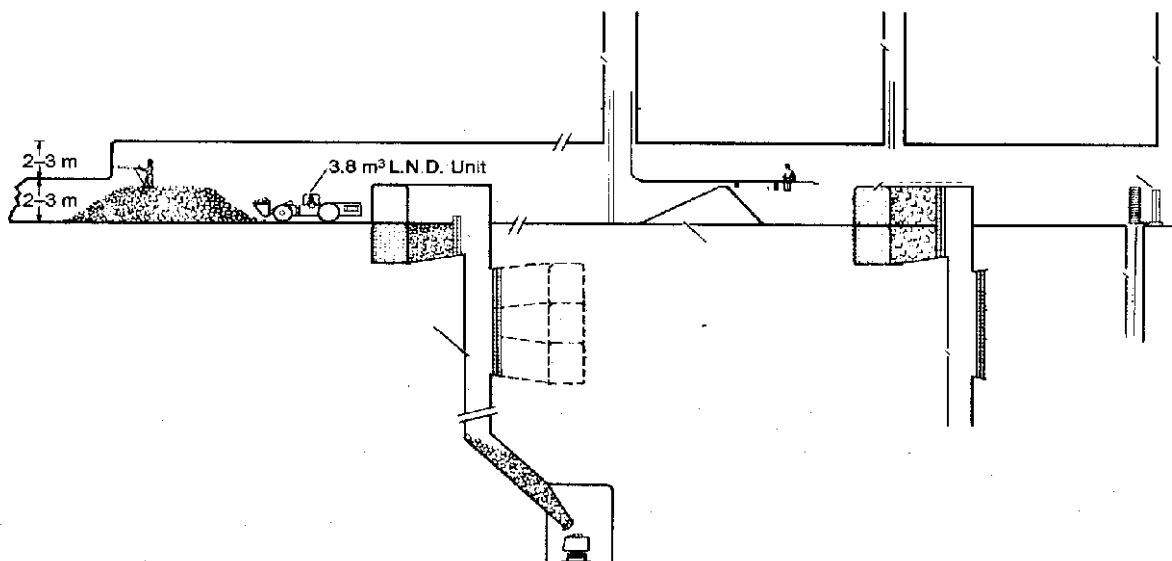
- Evaluation du déplacement d'un point par rapport à sa position primitive (difficile à réaliser)

- * **Mesures relatives**

- En général, des mesures de convergence qui évaluent la variation de distance entre deux points situés sur la même verticale
- La convergence suit une loi logarithmique.
- Les mesures de déplacements sont confiées à des géomètres, car longues et nécessitant beaucoup de soin.
- Toutes ces mesures peuvent être complétées par des études de laboratoire, des essais sur modèles réduits et des études de photo-élasticité.

LES ETUDES DE CES DEFORMATIONS NOUS SERONT UTILES POUR MIEUX ORGANISER LES OPERATIONS DE CREUSEMENT ET DEFINIR LES TYPES DE SOUTÈNEMENT A METTRE EN PLACE POUR SECURISER LE TRAVAIL EN MINES

RAPPELS



Principales opérations de l'exploitation souterraine

ABATTAGE : à l'explosif

foration des trous

chargement de l'explosif

tir

DÉBLAYAGE : mécanique

scoops

racleurs

retro-chargeuses

alimentateurs vibrants

TRANSPORT : camions

rails

convoyeur

SOUTÈNEMENT : boulonnage

cadres métalliques et cintres

boisage

Abattage

Abattage à l'explosif

foration des trous

PETITS TROUS :

diamètre < 52 mm

profondeur < 5 m

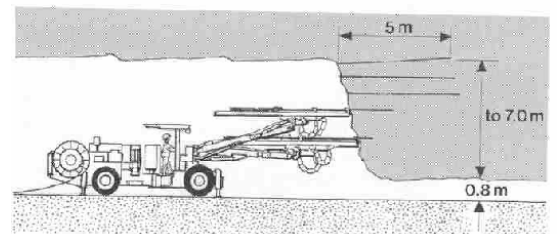
avantage : on peut suivre une

forme du gisement compliquée

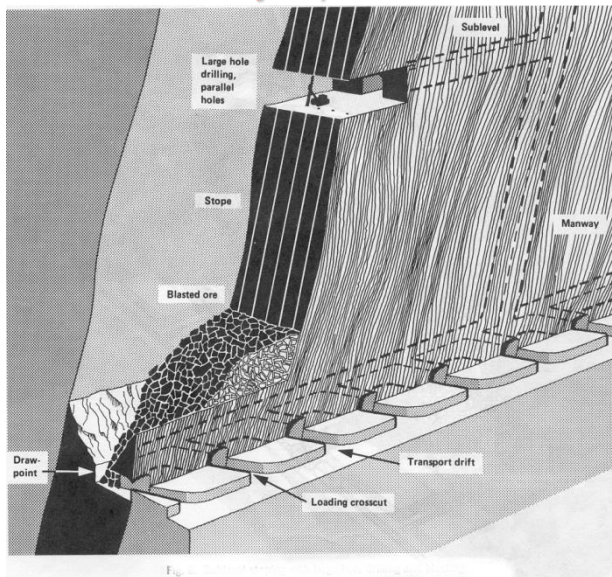
dans un massif de faible stabilité

inconvénient : faible productivité, coût élevé

LONG TROUS :



diamètre jusqu'à 162 mm



profondeur jusqu'à 70 m

avantage : productivité élevée, coût bas

inconvénient : application limitée aux gisements de forme régulière avec des épontes stables

Schémas de foration des petits trous - gisements en plateaux et amas

Consommation d'explosif

La consommation d'explosif dépend :

de la nature de la roche (résistance, fissuration)
de la fragmentation recherchée

du type d'explosif (puissance, densité, conditionnement)
du diamètre des trous
de la disposition des trous (parallèle , éventail)
du nombre de surfaces libres

Taille moyenne des blocs de roche abattue :

pour assurer le déplacement par gravité
de la roche fragmentée il faut que le rapport entre
la largeur de galerie et la taille moyenne du bloc soit :
2 : 1 dans les endroits faciles d'accès
5 : 1 dans les cheminés

Quelques exemples de tailles de blocs :

400 - 500 mm	extraction par skip
200 - 300 mm	exploitation des gisements filoniens par chambres-magasins
400 - 1000 mm	exploitation des gisements massifs avec scoops
1500-2000 mm	exploitation avec foudroyage de minerai à grande échelle

Influence de la fissuration naturelle
et de la fragmentation recherchée :

$$q = q_0 \left(\frac{l_{fiss}}{a_{bloc}} \right)^{n_1}$$

avec : q_0 - consommation théorique ;
 l_{fiss} - distance moyenne entre les fissures naturelles, m
 (varie entre < 0,1 m et > 1,5)
 a_{bloc} - taille moyenne des blocs de roche après le tir ;
 n_1 - coefficient expérimental $n_1 = 0,5$ à $0,6$;

Les différentes méthodes de creusements

Les principales méthodes de creusements utilisées actuellement sont communes à tous les types d'ouvrage et de tunnel. On distingue trois méthodes de creusements:

- Méthode de creusement à pleine section.
- Méthode de la demi-section.
- Méthode de la section divisée.

Méthode à pleine section

- Cette technique de creusement consiste à excaver la totalité de la section transversale de l'ouvrage en une seule phase, elle s'adresse essentiellement aux terrains de bonne tenue lorsque la section à excaver n'est pas très importante (généralement inférieure à $12m^2$), puisque dans le cas contraire la méthode nécessite un matériel plus performant et devient extrêmement coûteuse.
- La rapidité de cette méthode facilite l'organisation du chantier, car elle permet de séparer nettement les équipes de creusement et celles du revêtement.

- Les déblais sont exécutés par tranche horizontale en commençant par le haut, l'inconvénient est que leur évacuation nécessite plusieurs reprises. En cas de rencontre d'accident de terrain

Méthode de la demi-section:

- Cette méthode est particulièrement conseillée pour les terrains hétérogènes de qualité moyenne, elle permet de mieux maîtriser les problèmes de stabilité vue la dimension réduite du front de taille.
- Généralement on creuse d'abord la demi section supérieure de l'ouvrage qui peut atteindre 5 à 6 mètres de hauteur, une fois cette phase terminée on excave la demi section inférieure appelée STROSS.

Méthode de la section divisée

- Cette méthode est utilisée lorsque la section à excavée est importante, ou dans le cas d'un mauvais terrain qui ne permet pas d'assurer la stabilité du front de taille avec une ouverture en demi-section.
- terrain qui ne permet pas d'assurer la stabilité du front de taille avec une ouverture en demi-section.
- Son application présente un inconvénient d'ordre économique, à savoir son coût très élevé et sa durée d'application relativement longue. Elle ne se justifie que s'il n'est pas possible d'utiliser une autre méthode. Il existe plusieurs variante de cette méthode on peut citer:
- 1-Méthode de la galerie de faite (Méthode belge française)
- 2-La méthode des deux galeries
- 3- Méthode des trois galeries (méthode Allemande)
- 4-Méthode contre voûtée (méthode Italienne)
-
- 5-Méthode de creusement a pleine calotte

Méthode de la galerie de faite (Méthode belge-française)

_Le principe de cette méthode consiste à exécuter rapidement la voûte pour protéger le chantier par-dessous et de terminer le revêtement par pieds droits.

Dans le cas d'un bon terrain on procède d'abord à l'exécution d'une galerie d'avancement de faible section (2.5 à 3 mètres de largeur et une hauteur variant de 2 à 3mètres) à l'axe supérieur du tunnel étayé par des cadres métalliques, on procède alors à

l'abattage de la calotte et à son soutènement progressif par cintres métalliques et l'exécution du revêtement de la voûte. Par la suite la cunette du **STROSS** est creusée, pour permettre la mise en place et le revêtement des pieds droits.

Dans le cas des mauvais terrains, un tassement de la voûte est à craindre lors de l'abattage de la cunette de STROSS, et pour faire face à cette éventualité on exécute des fouilles blindées à la base des pieds droits avant la mise en place du revêtement de la voûte.

La méthode des deux galeries:

la différence qui existe par rapport à la méthode « **belge française** » est par l'exécution de deux galeries une à supérieure et l'autre à l'axe inférieur relié par un puits pour permettre l'évacuation des déblais.

Méthode des trois galeries (méthode Allemande)

Le principe de cette méthode consiste au creusement de deux galeries de base de part et d'autre de la cunette de STROSS, ainsi que d'une galerie supérieure. Cette méthode est utilisée pour des sections de très grande importance (>5 0m² environ).

Cette méthode est utilisée dans les terrains particulièrement mauvais ou l'on doit tenir compte de l'apparition d'importantes poussées latérales. On cherche par conséquent, à ne créer en même temps, que des vides de dimensions réduites, et à les soutenir au plus vite et d'exécuter leur revêtement définitif dans la limite du possible.

Méthode contre voûtée (méthode Italienne)

Après l'exécution de la galerie de base, on met en place la maçonnerie du radier, l'exécution de la voûte du radier précède

celle des murs latéraux. La phase suivante consiste en l'excavation du rocher de la calotte, et l'exécution de la voûte.

Les travaux débutent par le creusement d'une galerie de faite, on procède alors à l'abatage du terrain de part et d'autre de la galerie.

Méthode de creusement a pleine calotte:

Cette méthode consiste à excaver une galerie de faite étayée par des cadres métalliques, précédant les abattages latéraux parallèlement à l'axe du tunnel. Ces abattages permettent de terrasser toute la voûte par travées de 1.60 mètres à 2.00 mètres de longueur, le soutènement est assuré par des cintres métalliques.

Lorsque les cintres sont complets, les étais peuvent être supprimés, cela permet l'intervention des gros engins (pour le marinage), et le bétonnage de la voûte. Après la construction de la voûte, la cunette de STROSS est terrassée, les piédroits abattus et bétonnés. L'exécution est achevée par le terrassement et le bétonnage du radier.

Cette méthode est exclusivement employée dans des conditions très difficiles, à cause de son coût très élevé et de son relativement lent.

Chaque terrain a ses propres caractéristiques d'où un mode de creusement approprié. Cette situation a poussé l'ingénierie à développer différentes techniques de creusements, ces techniques peuvent être séparées en deux catégories:

Ø L'exécution du creusement dans les terrains meubles.

Ø L'exécution du creusement dans les terrains durs.

EXECUTION DU CREUSEMENT DANS LES TERRAINS MEUBLES

On distingue:

-La pelle hydraulique

C'est un engin mécanique constitué d'un bras mobile (pelle) pouvant se déplacer aisément sur le front de taille et les parois latérales. Dans le cas où l'on rencontrerait des passages de terrains durs on peut prévoir un changement de la pelle par un marteau piqueur.

-Le Bouclier:

Ce type de machine ne peut s'adapter que dans des terrains meubles et aquifères, il comporte un système de protection des parois de l'excavation entre le front de taille et le revêtement qui doit être mis en place immédiatement après le passage du bouclier. Ce revêtement est constitué généralement de voussoirs préfabriqués.

Le bouclier joue en plus un rôle de soutènement provisoire, sa progression est assurée par des vérins prenant appui sur le revêtement posé à l'arrière.

Il convient de différencier les boucliers ouverts (à front libre) et les boucliers pressurisés (avec un soutènement du front

Les boucliers ouverts

Ils ne sont utilisables que lorsque la stabilité du front de taille est assurée naturellement. Le creusement peut se faire avec abattage manuel, le bouclier ne constitue donc qu'un soutènement al et peut être équipé d'un système d'abattage, mécanisée (outil ponctuel, pelle, fraise montée sur un bras, voir un plateau rotatif à pleine section).

Utilisés dans les terrains meubles et aquifères où la stabilité du front de taille n'est pas assurée, il faut le soutenir par une pression qui peut être appliquée soit par:

- De l'air comprimé (bouclier à air comprimé).
- Le plateau de taille lui-même (bouclier à pression mécanique).

Un liquide dense telle que la boue bentonite mise sur pression dans la chambre d'excavation qui se fait, de façon mécanisée (bouclier à pression de boue)

Le marinage lui-même stocké dans la chambre d'excavation.

-Méthode par congélation

Dans les mêmes conditions que précédemment, on peut employer aussi la méthode dite par congélation, qui consiste à congeler le terrain dans lequel on veut creuser jusqu' il devient dur comme de la pierre par l'effet du gel.

Creusement mécanique

On distingue deux types de machines à forer:

-Machine à attaque globale à pleine section dite aussi tunnelier ou Tunnel Boring Machine (**T.B.M**).

- Machine à attaque ponctuelle dite aussi fraise ou Boom Type Machine (**B.T.M**).

Machine à attaque globale T.B.M

Ce type de machine permet d'attaquer le tunnel à pleine section. Elle est conçue uniquement pour des excavations circulaires.

Elle possède le plus souvent à l'avant un plateau circulaire rotatif égale à la section à excavée, le plateau appelé tête de forage, porte les outils de creusements.

Avantages:

Ne nécessite pas beaucoup de main d'œuvre, Rapidité d'exécution, Ne provoque pas d'ébranlement, ce qui entraîne une bonne tenue du terrain.

-Inconvénients:

L'inconvénient majeur de ce genre de machine est son coût élevé, Son utilisation exige une main d'œuvre hautement qualifiée, Ne pas être amortissable que pour une longueur de tunnel assez importante.

Machine à attaque ponctuelle B.T.M:

Il s'agit d'une technique très fréquemment utilisée pour l'excavation des ouvrages en roche de dureté moyenne. Elle permet de

creuser n'importe quel profil de dimension variable elle est équipée d'une tête fraiseuse de faible dimension située à l'extrémité d'un bras mobile, le tout porté sur un châssis automoteur à roues ou à chenilles.

-Avantages:

cette machine peut terrasser une section de forme quelconque, le découpage est bien soigné sans sur profil,

- o La technique d'abattage n'entraîne pas d'ébranlement,
- o Sa dimension réduite par rapport à la section permet une observation continue du front de taille.

-Inconvénients

Un coût élevé, cependant plus avantageux que les **T.B.M.**,

- o Les têtes d'attaque s'usent trop rapidement et leur changement est relativement coûteux.

Creusement à l'explosif

De manière générale, l'explosif en souterrain doit être utilisé comme un outil de découpage de la roche et non comme une « bombe ». L'explosif ne doit être utilisé en site urbain que dans le cas où il s'avère strictement nécessaire. Son emploi produit des effets psychologiques défavorables pour la population avoisinante (bruits, fumées, vibrations ...), et représente un risque de déstabilisation pour les édifices et services voisins, ce qui limite les horaires des volets engendrant ainsi une baisse de rendement du chantier.

-Avantages:

Rapidité et efficacité d'exécution,

Coût réduit.

-Inconvénients:

Provocation d'ébranlements dans le sol qui se propagent à la manière du séisme, susceptibles de provoquer des dégâts aux constructions avoisinantes.

Mise en oeuvre de l'explosif:

Avant la mise en oeuvre de l'explosif un plan de tir doit être définie afin de maîtriser le découpage du plan de tir et de limiter au maximum les effets de vibrations. Il comporte essentiellement les opérations suivantes:

- o Détermination de l'emplacement des trous et de leur nombre exact.
- o Calcul de la puissance d'explosion nécessaire.
- o Décalage des détonations par micros-retard.

Creusement à l'aide du ciment expansif:

Le ciment expansif est un éclateur non explosif pour les matériaux durs et compacts. Son rôle est de fissurer le matériau en petites quantités. Il se présente sous forme de ciment composé notamment de chaux vive.

Principe

Le principe d'action du ciment expansif consiste à développer une montée de pression à volume constant pouvant varier de 15 *MPa* à 60 *MPa* suivant les conditions d'utilisation. Quand cette pression devient supérieure à la résistance de traction les fissures s'amorcent puis se propagent dans le matériau jusqu'à rupture.

Avantages:

Découpage relativement précis.
pas de nuisance vis à vis du bruit de vibration.
Sans danger pour l'environnement.

inconvénients:

Le facteur temps est plus important que dans les autres
Main d'œuvre hautement qualifiée
Coût élevé.

méthode de creusement de l'ouvrage souterrain et/ou tunnel revient à l'ingénieur qui doit prendre en considération le type de terrain traversé, la forme et les dimensions profil transversal de l'ouvrage et/ou du tunnel sans oublier l'aspect économique qu'est très important

Creusement des tranchées

La découverte des champs de carrière et la préparation des niveaux d'exploitation s'effectuent le plus souvent à l'aide de tranchées et demi-tranchées d'accès et de découpage.

Les tranchées d'accès, en fonction des conditions concrètes, peuvent être horizontales ou inclinées. La longueur de l'accès incliné d'une tranchée pour la découverte d'un seul niveau (gradin) est égale à :

$$L_T = \frac{h}{i}, m$$

Leurs dimensions dépendent des engins minier adoptés, des propriétés physiques et mécaniques du massif de roche et doivent être de telle sorte à assurer une exploitation des gradins normale dans le futur avec un chargement frontal du minerai. La largeur des tranchées d'accès dans les roches dures en fonction de la disposition du tas de roche abattu à l'explosif dans le but de préserver la plate-forme de transport lors de

premier tir pour son élargissement. La largeur de la tranchée au niveau du fond b doit sa

$$b = B + a - W_0$$

, m

où B — largeur du tas de roche abattu après le tir, m ; a — largeur libre pour le transport, m ($a = 3$ à 4 m) ; W_0 — fardeau au niveau du pied du gradin, m.

La profondeur de la tranchée d'accès correspond à la hauteur du gradin du niveau préparé. Les angles des talus des bords des tranchées dépendent des propriétés des roches et les conditions de sécurité exigent l'assurance de la stabilité des talus.

Volume d'une tranchée d'accès horizontale

$$V_B = H \times L_b \left(\frac{1}{2} b + \frac{1}{3} h \times \operatorname{ctg} \alpha \right), m$$

Volume d'une tranchée d'accès inclinée

$$V_B = \frac{h^2}{i} \left(\frac{1}{2} b + \frac{1}{3} h \times \operatorname{ctg} \alpha \right), m$$

où h — profondeur finale de la partie inclinée de la tranchée, m ; b — largeur du fond de la tranchée, m ; **LB** - longueur de la tranchée d'accès, m ; i — inclinaison de la tranchée d'accès.

Creusement des puits et galeries inclinées

- Il s'agit des puits ou galeries inclinées nécessités par l'exploitation:
 - - Puits ou galerie de ventilation,
 - - Puits ou galerie d'extraction,
 - - Puits de reconnaissance,
 - - Puits ou galerie d'accès aux travaux.
- **Par galerie inclinée, on entend toute galerie de pente comprise entre 10 et 45° pour lesquelles des dispositions de sécurité particulières sont requises pour les matériels y évoluant.**
- **Au delà de 45° il s'agit de puits.**
- Les méthodes utilisées pour le creusement des puits
- sont très diverses. Elles varient en fonction de la nature
- des terrains, de la présence ou non de venues
- d'eau, de la profondeur des ouvrages, de leur géométrie (section, inclinaison), de l'équipement des
- entreprises...
- On peut néanmoins les regrouper en trois familles :
 - - les méthodes directes de creusement en puits,
 - - les méthodes de creusement en cheminée,
 - - les méthodes mixtes utilisant un avant-trou.