

Chapitre1 : Généralités sur l'abattage

1. NOTIONS ET DEFINITIONS

Afin que le minerai se trouvant au sein de la terre puisse être utilisé par l'homme, il est indispensable de le séparer de la masse rocheuse. Aussi pour réaliser différentes constructions (ex: tunnels, routes barrage...), il est nécessaire de démolir les roches. L'opération par laquelle, des blocs de roches sont détachées du massif à l'aide des procédés différents (outils à main, explosifs, engins mécaniques...) est appelée abattage.

2. METHODES D'ABATTAGE

2.1 HISTORIQUE

Les différents procédés d'abattage varient avec l'usage auquel ils servent et avec la « qualité » de la roche qu'ils doivent entamer.

- antiquité, moyen âge : abattage manuel, thermique
- 17^{ième} siècle : premières opérations d'abattage à l'explosif
- 18^{ième} (mais surtout à partir du 19^{ième} siècle) : apparition de l'abattage mécanisé
- 1860 : utilisation de la nitroglycérine
- 1867 : stabilisation (et expansion) de la nitroglycérine sous forme de dynamite par Alfred Nobel
- 1955 : les nitrates-fuels sont brevetés
- Fin de la 2^{ième} guerre mondiale : la mécanisation s'accroît
- Actuellement : projet de robotique
- 1993 : dans une usine de potasse en Catalogne l'abattage par robot a été correctement réalisé.

2.2 Classification des roches

Il y'a plusieurs classifications mais la plupart reposent sur la résistance que les roches opposent à l'action des outils

Classification de BURAT

- les roches éboulées : elles comprennent les terres décomposées ou terres végétales, les terres sablonneuses ou limoneuses, les sables et les cailloux roulés (abattage manuel, mécanique, hydraulique...).
- Les roches tendres : ce sont les roches non scintillantes, c à d, ne faisant pas feu sous les coups d'outils en acier. Ex : houille, sel gemme, ardoise, sulfate de calcium ou pierre à plâtre à pierre calcaire employée dans la construction, les argiles. (abattage manuel, hydraulique ou mécanique).
- Les roches traitables : elles comprennent les roches non scintillantes mais ayant de la compacité et de la résistance (ex: marbres, certains minerais de fer), les roches scintillantes, mais à texture assez lâche (ex: certains grès), le grès houiller : abattage à l'explosifs, les pics à rochers.
- Les roches tenaces : elles sont scintillantes et comprennent les minerais de fer (hématite compacte), les roches quartzieuses... (explosifs seulement)
- Les roches récalcitrantes : ex : minerai de zinc et d'étain explosifs et pointerolles (petits pics)

2.3 Méthodes d'abattage

On distingue différentes méthodes de destruction des roches :

- **abattage manuel** : la technique de base est, depuis des temps reculés, l'outillage à main. Les mineurs utilisent des burins, des coins de fer, des marteaux (... outils de petite taille) lorsqu'ils procèdent à un abattage sélectif et travaillent dans des ouvrages étroits. Ils utilisent des pics (et sont donc appelés des piqueurs), des pelles, pioches.... lorsqu'ils ont des places, que le front de taille est plus large. L'application concerne les roches tendres, molles et cassantes. Remarque : ce procédé est rarement utilisé de nos jours.

- **abattage thermique** : abattage par le feu. Mis à part l'abattage manuel, elle est la plus vieille technique d'abattage des roches. Elle a été utilisée depuis les Romains jusqu'au moyen âge. Ce procédé était le seul utilisé jusqu'au moyen âge pour l'abattage des roches très dures. La technique consiste à chauffer la roche avec un brasero rempli de charbon de bois puis de l'eau froide est projetée sur le front de taille pour créer un choc thermique qui fait éclater la roche (en esquilles). L'eau peut être projetée à la main ou bien par l'intermédiaire d'une gouttière.

NB : cette méthode a l'inconvénient de provoquer un risque d'asphyxie. On l'applique pour les roches pouvant subir une altération par le feu.

Remarque : ce procédé est de nos jours remplacé par l'abattage à l'explosif et n'est utilisé que pour l'exécution des fossés et des puits de prospection dans les régions de gel éternel.

- **Abattage hydraulique** : on utilise les propriétés chimiques, physiques ou la force dynamique de l'eau pour abattre les roches.

- Propriétés chimiques : dissolution des corps minéraux.
- Propriétés physiques : autre fois pour l'exploitation des monolithes, on se servait de la dilatation de l'eau au gel.
- Force dynamique : de toutes les méthodes hydraulique, elle demeure la plus répandue.

- **Abattage électrique** : la destruction des roches à l'aide des moyens électriques est une méthode nouvelle. Lors de son utilisation la roche est démolie sous l'action électrique qui lui est transmise directement. On distingue l'électro-aimant, l'ultrason, l'électrothermique, l'effet hydro-électrique...

- **Abattage mécanique** : la destruction mécanique s'effectue à l'aide des machines minières telles les haveuses, les rippers, les marteaux piqueurs, les perforatrices, les excavatrices, les combinés miniers, les tunneliers ... Les haveuses sont utilisées pour la réalisation des havées (fentes) dans les couches de charbon ou pour l'exploitation des minéraux comme le sel gemme, les sels de potasse, les tufs, les calcaires...

- les perforatrices et les marteaux piqueurs sont utilisés pour forer des trous; les tunneliers pour creuser une galerie...

- **Abattage à l'Explosif (voir chapitres suivants).**

3. CHOIX D'UNE METHODE D'ABATTAGE

Le choix d'une méthode est fonction en grande partie des propriétés physiques (dureté, ténacité, élasticité) des roches et des données économiques.

Chapitre2 : Généralités sur l'abattage à l'explosif

1. Introduction

C'est la méthode la plus utilisée de toutes les méthodes d'abattage. C'est une méthode simple, commode et universelle. Lors de l'abattage à l'explosif, la destruction des roches est assurée par l'énergie d'un explosif. Dans la pratique, l'explosif est placé dans une cavité faite spécialement (un trou de mine, une sonde, une chambre...) ou superficiellement sur la surface du corps destiné à l'explosion. La destruction des roches est assurée par deux actions différentes et complémentaires :

- Une onde de choc générée par la vitesse de décomposition du produit explosif ;
- Un dégagement d'un grand volume de gaz du à la décomposition de l'explosif.

2. Conditions d'utilisation des explosifs

L'abattage à l'explosif est utilisé dans les roches dures (vitesse sismique > 1500 m/s). Parfois lorsqu'il est impossible d'utiliser les procédés mécaniques, hydromécaniques ou autre, on applique les travaux de forage et tir dans les roches de faible dureté.

3. Inconvénients liés à l'abattage à l'explosif

- Prix de revient de l'abattage élevé,
- Réglage de la fragmentation des roches jusqu'aux dimensions requises difficiles,
- Temps morts des engins miniers au cours des travaux de tir
- Insécurité liée aux travaux de tir,
- Dilution considérable,
- Effets sismiques négatifs sur les constructions,
- Dégrade certains produits comme le charbon

A cause de ses multiples inconvénients, on applique amplement dans les carrières contemporaines lorsque la dureté du massif le permet, l'abattage mécanique.

4. Principales méthodes des travaux de tir

On distingue les travaux de tir à l'aide :

- de trous de mine
- des trous profonds
- trous chambrés
- fourneaux de mine
- tir poché
- charge superficielle

Chapitre 3 : Caractéristiques des explosifs

1. Définition

L'explosif est un corps chimique, solide ou liquide qui sous l'action d'une impulsion extérieure (choc, étincelle, réchauffement..) est susceptible de se transformer presque instantanément en gaz avec dégagement de chaleur. Si l'explosif a été préalablement enfermé dans une enceinte, les gaz développeront une pression suffisante pour détruire cette enceinte. Un litre d'explosif solide ou liquide se transforme après explosion en 800-1000 litres de gaz. La température peut atteindre 4500°C.

Un explosif industriel est un mélange chimique constitué par un comburant (ou oxydant), un combustible (ou réducteur) et divers autres produits, et qui peut se décomposer selon différents modes : la combustion, la déflagration ou la détonation.

2. Classification des explosifs

Suivant le mode de décomposition

En fonction du mode de décomposition de l'explosif on distingue trois catégories :

- Combustion : vitesse de propagation de quelques millimètres à quelques mètres par seconde : exemple : poudre pour arme de tous calibres,
- les explosifs déflagrants : vitesse relativement lente : quelques centaines de mètres /seconde (500 m/s max). ex : poudre noire fine, les compositions d'allumage... Ces explosifs provoquent une flamme longue et prolongée. Ils ne libèrent qu'une énergie de gaz. Leur utilisation dans les bâtiments et les travaux publics est interdite.
- les explosifs détonants : très grande vitesse : quelques Km/s (de 1200 à 7200 m/s et même plus). Ces explosifs provoquent une flamme courte et très chaude : ex : dynamite. Ces explosifs libèrent une énergie de choc et une énergie de gaz. Ils sont très puissants.

NB : tous les explosifs utilisés dans les TP, mines et carrières sont du type détonant à l'exception de la poudre noire comprimée, utilisée dans les carrières de granite.

Suivant leur domaine d'utilisation

On distingue trois catégories :

- explosifs agréés pour les travaux miniers souterrains sauf dans les mines grisouteuses et poussiéreuses ;
- explosifs agréés dans les travaux miniers à ciel ouvert uniquement ;
- Explosifs de sécurité: Ces explosifs provoquent une flamme courte et une température relativement basse (1500°C). Exemple d'explosif de sécurité : ammonite.

Suivant la facilité de prise de régime de détonation :

On distingue deux catégories :

- les explosifs primaires qui prennent spontanément leur régime de détonation par simple échauffement, ou sollicitation mécanique de faible énergie (choc, friction, claquage diélectrique). Ce sont habituellement les explosifs plus sensibles que la pentrite. Exemple : azoture de plomb.
- Les explosifs secondaires : ils ne peuvent être amorcés que par une onde de choc généralement fournie par un explosif primaire (exemple : pentrite et autres explosifs civils).

Remarque : tous les explosifs industriels sont des explosifs secondaires

3. Nature des explosifs

En fonction de leur composition les explosifs industriels se classent en :

- explosifs à nitroglycérine (dynamites : 1860- 1870)
- explosifs nitratés (1920-1930)
- explosifs aux dérivés nitrés de série aromatique
- oxygène liquide
- explosifs chloratés et perchloratés
- poudre noire ...

NB : les explosifs les plus utilisés dans les travaux miniers sont les dynamites et les nitratés.

3.1 les dynamites

On appelle une dynamite un explosif qui comporte au moins 10% de nitroglycérine ($\text{CH}_2\text{NO}_3\text{-CHNO}_3\text{-CH}_2\text{NO}_3$). A l'état pur c'est un liquide huileux très sensible aux chocs, au soleil, au gel et aux acides. Elle possède en outre l'inconvénient majeur de cristalliser à des températures faibles (8°).

NB : cette extrême sensibilité la rend inutilisable à l'état pur mais elle est facilement stabilisée suivant trois procédés :

- absorbée par du coton → dynamites gommes : explosifs puissants résistants bien à l'eau mais cher.
- Nitroglycérine imprégnée avec du nitrate de sodium ou de la farine du naphthaline → dynamites gélatinées, moins coûteuses
- Dynamites + chlorure de sodium → grisous dynamites. Elles sont beaucoup moins puissantes que les dynamites mais offre plus de sécurité dans les mines grisouteuses ou poussiéreuses.

Les dynamites modernes renferment du dinitroglycol (28% minimum) qui fait office d'antigel.

Attention : le nitroglycéroglycol présente une certaine toxicité provoquant des maux de tête par inhalation des vapeurs ou par contact cutané lors de la manipulation.

Présentation : cartouches de papiers enduites de paraffine ou de silicone.

Sécurité : les bouteux sont tenus de porter des gants pour manipuler les cartouches des dynamites.

Domaine d'utilisation : les dynamites ont une énergie de choc prédominante, elles sont employées pour fragmenter les roches dures.

Remarque : la consommation des dynamites tend à diminuer au profit des émulsions.

3.2 les nitratés (1920- 1930)

Le composant essentiel est le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) d'où leur désignation par la lettre N. En ajoutant au NH_4NO_3 des produits tels que le NaCl, farine, huile, naphthaline, on obtient toute une gamme d'explosifs très sûrs et de sensibilité suffisante. En raison de l'absence de nitroglycérine, on appelait autre fois ces explosifs, explosifs de sûreté.

Pour rendre ces mélanges sensibles à l'amorçage, on y ajoute du trinitrotoluène (TNT).

Présentation : vrac ou cartouche sous forme de matière pulvérulente hétérogène de couleur beige foncé à marron.

Propriété : le nitrate d'ammonium a une grande solubilité dans l'eau.

NB : la fabrication a fortement diminué depuis les années 1990.

Sécurité : le nitrate d'ammonium est agressif. Lorsqu'il est livré en vrac, il est obligatoire de porter des gants et des lunettes pour la manipulation.

3.2.1 Les nitrates fuels ou ANFO (1956- 1960)

Ils ne renferment pas des produits explosifs purs et peuvent être chargés en vrac. On distingue deux types : les nitrates fuels ordinaires et les NF dopés. Les NF ordinaires sont composés de nitrate d'ammonium (94%) et du fioul domestique (6%). Leurs performances sont étroitement liées à la qualité de nitrate d'ammonium utilisé.

Présentation : granulés de quelques dixièmes de mm à quelques mm de diamètre ; de couleur rose.

Lorsqu'on introduit environ 10% d'aluminium en grenailles, on augmente leur énergie de détonation et on obtient des NF dopés de couleur grise.

Remarque : il existe des NF à régime de détonation faible, obtenu en ajoutant des billes de polystyrène expansé. Ils sont utilisés parfois pour le post ou prédécoupage.

Remarque : Pour le chargement manuel le NF est livré en sac de 25 Kg.

3.2.2 Les émulsions explosives (1980)

Ce sont des solutions aqueuses de nitrate d'ammonium (de calcium ou de sodium) et d'huile minérale émulsifiée.

Le mélange provoqué par une agitation violente (car les liquides ont des densités différentes) est assuré par des mélangeurs.

La matrice formée (comburant) n'est pas explosive. Elle est sensibilisée en lui ajoutant des minuscules bulles de gaz qui permettent la détonation du mélange.

Présentation : cartouches

Propriétés :

- insensibles à l'eau et peu sensibles au choc.
- Désensibilisation dynamique ou statique qui nécessite une bonne qualité d'amorçage (qui doit être renforcée voire même doublée)

Remarque : Vu la large gamme qu'offre la catégorie des émulsions et les progrès réalisés en matière d'énergie et de brisance, elles devraient supplanter pour des raisons évidentes de sécurité, les dynamites qui restent plus sensibles aux chocs.

3.3 Les Nitrates fiouls lourds ou émulsions composites (1990)

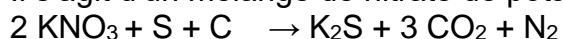
C'est un enrobage des grains de nitrates fioul par une émulsion.

3.4 Oxygène liquide

Oxygène liquide + sciure, liège, poudres métalliques, naphtaline... donne des explosifs de bonne qualité lorsque le mélange est enfermé dans des cartouches. Ces explosifs sont interdits dans les mines de charbon à cause du danger qu'ils présentent vis à vis de l'inflammation du grisou et des poussières de charbon.

3.5 Poudre noire :

Il s'agit d'un mélange de nitrate de potassium, de soufre et de carbone.



3.6 Produits spéciaux

- les produits de découpage (pré-découpage ou post-découpage) : boudins de gel ou d'émulsions reliés en chapelet par du cordeau détonant, cannes en polypropylène.
- bousteurs : renforçateur d'amorçage pour initier suffisamment les explosifs en vrac

4. Caractéristiques des explosifs

Quand on veut choisir un explosif pour un travail déterminé, on doit connaître ses caractéristiques techniques qui sont principalement sa capacité de travail ou pression de détonation, sa brisance ou vitesse de détonation, sa sensibilité à l'onde explosive et son aptitude à transmettre la détonation, sa résistance à l'humidité, à l'eau, son état physique, les fumées auxquels il donne naissance lors de la décomposition...

4.1 Vitesse de décomposition

On distingue les explosifs détonants et déflagrants. On mesure (chronomètres électroniques) le temps que met l'onde de détonation pour parcourir une distance connue dans une charge de la substance étudiée. Elle est fonction du diamètre d'utilisation, de la densité, de la température, du confinement, de l'amorçage utilisée, de la composition chimique des explosifs, de la grandeur de leurs particules, de la condition de leur mise en œuvre (qualité du bourrage, contact entre cartouche, ..), pour certains de leur humidité et du vieillissement du produit. Les vitesses varient de 3000m/s pour les nitrates fiouls en petit diamètre à 6500m/s et même plus (8000m/s) pour les dynamites.

4.2 Densité

On peut distinguer la densité d'encartouchage et la densité de chargement pour les explosifs chargés en vrac dans les trous de mine. Elle varie de 0.8 pour les nitrates fiouls en vrac jusqu'à 1.65 pour les dynamites les plus denses.

4.3 Pression de détonation

Elle détermine la qualité explosive d'un explosif. Elle caractérise l'aptitude au travail mécanique d'un explosif. La pression de détonation dépend du volume des gaz libérés, de la vitesse de détonation et de la quantité de chaleur dégagée lors de l'explosion. La pression de détonation peut être évaluée à l'aide de plusieurs essais mais l'essai le plus couramment utilisé est celui du bloc à plomb ou essai de TRAUTZL

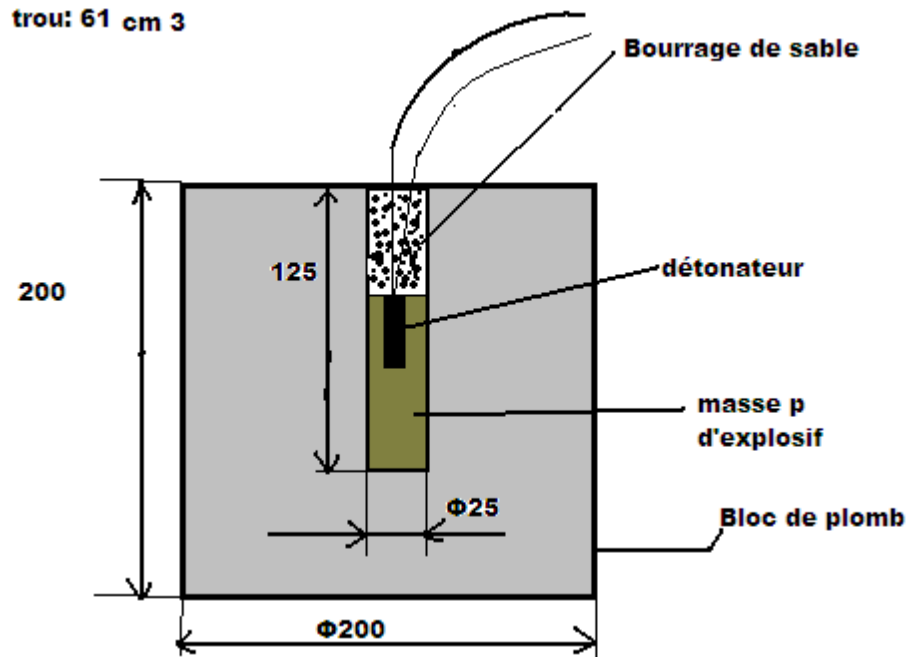
Essai de TRAUTZL:

Principe ; voir exposé. Le rapport du poids d'acide picrique au poids de l'explosif essayé s'appelle coefficient de puissance ou coefficient d'utilisation pratique (C.U.P)

$CUP = \text{Poids de l'acide picrique} / \text{Poids de l'explosif essayé}$

Le CUP varie à peu près de la façon suivante :

- explosifs très puissants : de 1.3 à 1.8
- explosifs nitrates brisants : de 1.10 à 1.38
- explosifs de faible puissance : de 0.6 à 0.85



La différence du volume du canal avant et après l'expérience caractérise la capacité de travail relative de l'explosif essayé.

Application : lors d'un essai de pression de détonation d'un explosif on a trouvé après essai que le volume du cylindre était 6735 cm³.

- calculer son aptitude au travail ;
- calculer son CUP ;
- comparer cet explosif à l'acide picrique pur.

4.4 Brisance

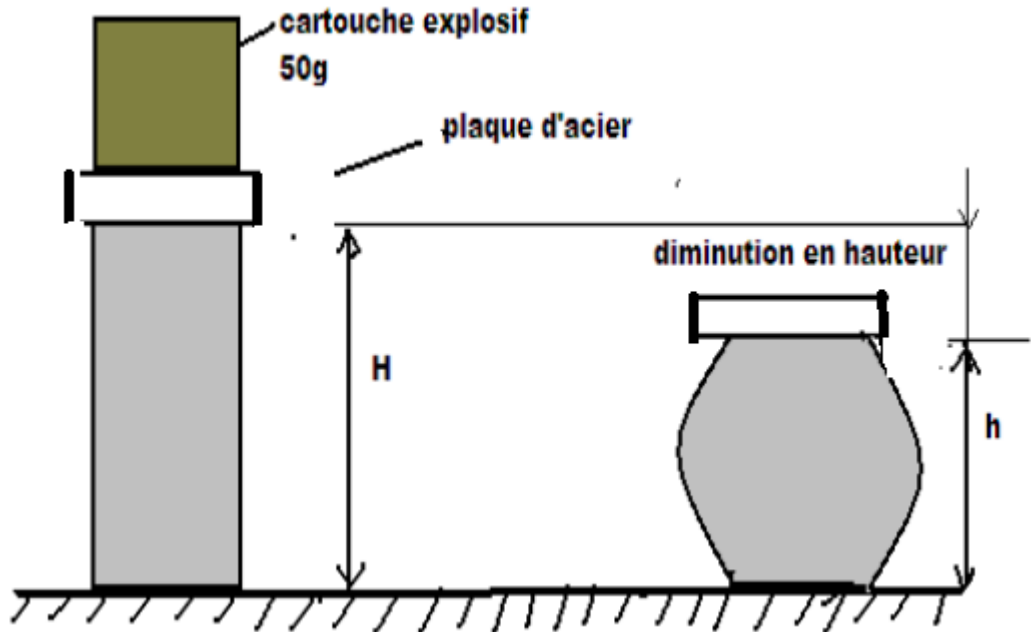
La brisance ou pouvoir brisant d'un explosif est son aptitude à fragmenter un matériau placé à son voisinage. L'action brisante d'un explosif est mesurée à l'aide de l'essai de brisance.

Principe : voir exposé

Dans l'industrie minière $\Delta h = 5 - 27$ mm.

Les dimensions standard du matériel d'essai sont :

- diamètre de la plaque : 41 mm
- hauteur de la plaque : 10 mm
- hauteur initiale du cylindre : $H_i 60 =$ mm
- diamètre du cylindre : 40 mm
- diamètre de la charge : 40 mm



Application : après essai on a mesuré en 4 points la hauteur restante du cylindre. Les valeurs sont les suivantes : $H_{exp1} = 51 \text{ mm}$; $H_{exp2} = 52 \text{ mm}$; $H_{exp3} = 45 \text{ mm}$; $H_{exp4} = 48 \text{ mm}$.

Si on distingue quatre catégories des produits explosifs selon la brisance, évaluer la brisance de cet explosif et commenter le résultat.

4.5 Sensibilité

C'est la facilité avec laquelle la détonation d'un explosif peut être déclenchée et les conditions dans lesquelles cette explosion pourra se propager.

Il est important de connaître le degré de sensibilité d'un explosif. Pourquoi ?

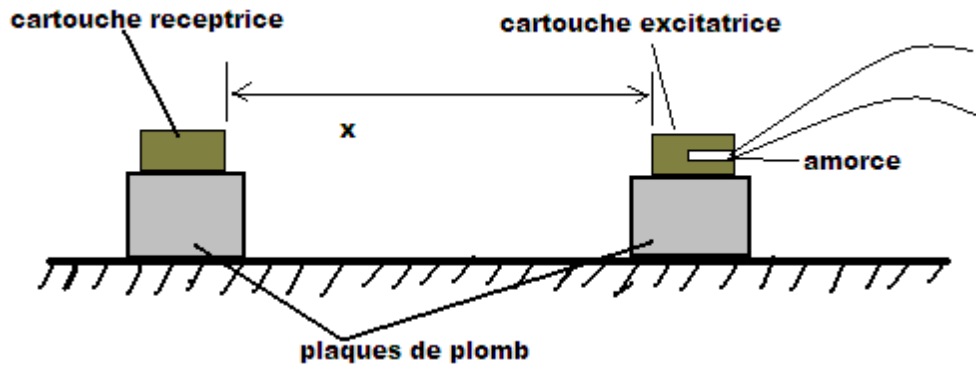
La sensibilité d'un explosif est évaluée à plusieurs points de vue.

La sensibilité à l'amorce : c'est la plus petite charge de fulminate de mercure pur (ou une charge équivalente) qui provoque la détonation complète de l'explosif examiné en 3 essais. L'essai consiste à rechercher dans une gamme d'amorce de différentes forces, quelle est l'amorce la plus faible qui assure la détonation de la substance considérée.

NB : Tous les explosifs actuels sont sensibles à 2g de $\text{Hg}(\text{CNO})_2$ ou d'azoture de plomb (Pb N_6) ou d'amorçage équivalente.

- ❖ Sensibilité à l'onde explosive : l'épreuve consiste à estimer par un grand nombre d'essais la distance qui correspond à une probabilité de détonation de 50% entre une cartouche amorcée et une cartouche non amorcée placée dans le prolongement de la première. La sensibilité à l'onde explosive s'exprime en cm et varie actuellement de 0 cm pour les nitrates fiouls à 50 cm pour les explosifs les plus sensibles.

c.s.e = 0 – 50 cm (500 mm): coefficient de self excitation (c.s.e)



- ❖ **Sensibilité au choc** : Elle mesure la faculté avec laquelle l'explosif peut réagir à une sollicitation quelconque car tous les explosifs peuvent détoner sous l'action d'un choc quelconque suffisant. On mesure la sensibilité au choc par l'énergie d'un choc qui provoque la détonation une fois sur deux. Cette mesure est indispensable pour la manipulation et le stockage.

La mesure consiste à faire tomber un mouton de choc de masse variable (0.5 à 10 Kg) sur 20 mm³ de substance à tester d'une hauteur de 10 mm.

La sensibilité au choc diffère d'un explosif à un autre. Les moins sensibles au choc explosent avec une charge de 2 – 20 kg et les plus sensibles au choc avec une charge de 0.5 à 2 kg. La sensibilité au choc des dynamites est supérieure ou égale à 5 joules et celle des émulsions est supérieure ou égale à 50 joules.

Quelques exemples :

Explosifs	Hauteur de chute d'une masse de 2 kg en cm
Fulminate de mercure	2
Azoture de plomb	3
Nitroglycérine	4
Teneresse	4
Trotyl	70
Dynamite 62%	17
Amonite N6GV	60
Amonite N7GV	70

❖ Sensibilité aux frottements

C'est la capacité que possède un explosif à être amorcé par un frottement. La mesure consiste à faire faire une translation horizontale d'une plaquette mobile en porcelaine sur laquelle est disposée la substance au contact d'une tige fixe, la charge appliquée sur la tige variant de 5 à 360 Newtons. On détermine ainsi la force pour laquelle intervient dans 50% des cas, une réaction visible, une inflammation, un crépitement ou une explosion.

Attention à l'absence de risques d'amorçage par frottement dans l'épreuve.

4.6. Résistance à l'humidité, à l'eau

La résistance à l'humidité est la capacité d'un explosif à conserver ses propriétés physiques en présence d'eau. Elle est exprimée en heure.

Certains explosifs sont solubles dans l'eau.

- *Le nitrate d'ammonium ou anfonil est soluble dans l'eau. A 30°C. Cent (100) moles d'eau dissolvent 54.5 moles de nitrate. On peut par des enrobages convenables éviter sur lui une action trop rapide de l'eau qui existe dans un trou de mine, mais il est également très hygroscopique et déliquescent, d'où la nécessité de protéger avec soin les cartouches qui en renferment. Comment ?*
- Les chlorates de potassium ou de sodium sont solubles dans l'eau mais résistent très bien à l'humidité et ne sont pas déliquescents. Ils permettent de faire des explosifs durables dans les pays tropicaux chauds et humides.
- Nitroglycérine, nitrocellulose : ils sont pratiquement insolubles dans l'eau. La dynamite gomme est un explosif de choix pour les travaux sous marins puisqu'elle conserve ses qualités après des séjours de plusieurs mois et même de plusieurs années sous l'eau.

4.7. Résistance à la chaleur et au froid

La sensibilité à la température caractérise l'aptitude d'un explosif à s'enflammer en présence d'une source de chaleur.

La chaleur ne doit pas faire exsuder l'un des constituants de l'explosif, ni en modifier la forme cristalline et celle-ci doit rester stable à des températures de 40 à 50 °C.

Le froid a été autrefois le grand ennemi des dynamites. La nitroglycérine gelait aux environs de 12°C. la dynamite congelée devenait très sensible au choc et l'on devait la faire dégeler dans des marmites à double paroi avec chemise d'eau chaude.

Depuis l'emploi du mélange nitroglycéroglycol en 1925, cette préoccupation a pratiquement disparu. Le mélange à 40% de glycol permet aux dynamites de résister à des températures de 25° au dessous de zéro.

Un abaissement de température peut provoquer une diminution de la vitesse de détonation, diminution des sensibilités à l'amorçage et à l'onde de choc de certains explosifs contenant une certaine quantité d'eau comme les gels ou les émulsions.

Les températures élevées accélèrent le vieillissement des explosifs. Dans le cas de mélanges explosifs contenant des matières grasses ou liquide (paraffine, dinitrotoluène, nitroglycérine, huile, ...) la chaleur peut provoquer une exsudation ou une évaporation de ces corps (cartouches dites grasses). Ce phénomène est particulièrement dangereux dans le cas d'explosifs à base de nitroglycérine, la cartouche devenant très sensible aux chocs et frictions.

NB : il est recommandé de laisser les cartouches de gels et émulsions reposer dans la mine 1 à 2 heures avant de procéder au tir.

4.8. Etat physique et mode de présentation

La plupart des explosifs industriels se présentent sous forme de poudre plus ou moins fine, plus ou moins grasse qui sont encartouchées à une densité variant pratiquement de 0.8 à 1.6. Quelques uns au lieu d'être pulvérulents sont plastiques, gélifiés : Leur densité est généralement supérieure à 1 et permettent d'obtenir une densité de chargement plus forte par unité de volume de trou de mine.

Certains explosifs pulvérulents de faible densité, mais présentés sous forme de granulés coulent facilement permettant d'obtenir une bonne densité de chargement en employant lorsque le règlement l'autorise, la méthode de chargement en vrac, car alors l'explosif remplit intégralement la cavité, alors qu'avec des explosifs sous forme de cartouche, il reste toujours un espace non négligeable entre la cartouche et les parois du trou.

4.9. Fumées ou gaz dégagés par la détonation

Ils sont assez différents selon que la détonation a été franche et a produit du travail ou qu'elle a été incomplète par suite d'une mauvaise transmission de l'onde explosive (matière humide, densité d'encartouchage très élevée...). La détonation franche donne surtout du gaz carbonique et la détonation incomplète donne en outre de l'oxyde de carbone et des oxydes d'azote.

Les mauvaises détonations ont peu d'importance dans les tirs en ciel ouvert, elles en prennent une dans les tirs souterrains surtout si l'aérage est insuffisant.

On doit connaître quels gaz toxiques peuvent exceptionnellement prendre naissance dans les tirs.

4.10. L'énergie

Il existe deux types de mesure celle dite au TMB (Tir au Mortier Balistique) et celle de tir en piscine. Il apparaît que cette dernière soit de plus en plus utilisée par le fabricant : grâce à cette mesure il est possible de déterminer :

- l'énergie de choc : l'énergie libérée par le pic de pression générée par la détonation d'une charge explosive placée en immersion
- l'énergie de gaz
- énergie totale = énergie de choc + énergie de gaz. Elle varie de 2.5 à 5 Mj/Kg.

4.11. Résistance à la compression

Les principales caractéristiques d'un explosif peuvent varier en fonction de la pression à laquelle il est soumis à l'instant où il est initié. Cette pression peut être statique ou dynamique provoquée par l'onde de choc d'une charge voisine. Au-delà d'une pression limite, certains explosifs peuvent ne plus détoner, celle-ci étant spécifique à chaque explosif.

Attention aux nouvelles générations de produit type gel ou émulsions. L'insensibilité peut être transitoire. Comment seront les séquences de mise à feu ?

4.12. Diamètre critique de détonation

Le diamètre critique de détonation est le plus petit diamètre à partir duquel la détonation d'un explosif peut se propager à l'air libre, dans une file de cartouche. Il dépend de la nature et de la densité de la substance considérée. Ce paramètre détermine le diamètre minimal du trou de mine, et dans le cas de l'emploi sous forme de cartouches, le diamètre de celles-ci. En général le diamètre des explosifs encartouchés est supérieur au diamètre critique, sauf dans le cas de certains explosifs de découpage.

4.13. Autres caractéristiques

L'inaptitude à enflammer le grisou ou les poussières de charbon...

Chapitre 4 : Les paramètres d'explosion d'un explosif

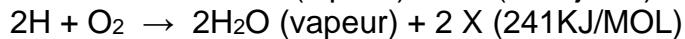
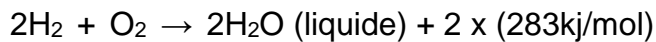
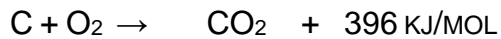
Caractéristiques calculées

1. Bilan d'oxygène ou Balance d'oxygène

Le bilan est une valeur calculée à partir de la composition de l'explosif en supposant des réactions complètes produisant du gaz carbonique, de la vapeur d'eau et de l'azote.

Rappel sur les corps organiques :

Formules chimiques : $C_aH_bN_cO_d$



Le bilan d'oxygène d'un explosif de formule $C_aH_bN_cO_d$ est donnée par la formule :

$$K_b = [d - (2a + b/2)] \cdot 16 \cdot 100 \% / M_{\text{exp}}$$

Où: M_{exp} : masse molaire de l'explosif

Si $d = 2a + b/2 \rightarrow K_b = 0 \rightarrow$ L'EXPLOSION EST COMPLETE : L'EXPLOSIF EST DIT EQUILIBRE

si $d < 2a + b/2 \rightarrow K_b < 0$: L'EXPLOSIF EST DIT SOUS OXYGENE

Si $d > 2a + b/2 \rightarrow K_b > 0 \rightarrow$: L'EXPLOSIF EST DIT SUROXYGENE

Remarque :

- un explosif équilibré en oxygène produit le moins de gaz toxiques
- Les explosifs sous oxygénés dégagent d'avantage d'oxyde de carbone
- Les explosifs suroxygénés donnent des vapeurs nitreuses

Application : calculer les bilans d'oxygènes des explosifs suivants :

Trotyl : $C_7H_5(NO_2)_3$; nitrophalène : $C_{10}H_6(NO_2)_2$; hexogène : $C_3H_6O_6N_6$; salpêtre ammoniacal : NH_4NO_3 ; gramonite (30/70) qui se compose de 30% du salpêtre ammoniacal et 70% de du trotyl.

Ammonite des roches n°1 dont la composition est:

- 66% du salpêtre ammoniacal,
- 5% du trotyl,
- 24% d'exogène,
- 5% d'aluminium; avec : $2Al + 1.5O_2 \rightarrow Al_2O_3 + 1671 \text{ kJ/mol}$.

2. Volume des gaz d'explosion

Certains explosifs génèrent après explosion des gaz toxiques. Les explosifs agréés dans les mines souterraines ne doivent pas dégager plus de 50L de gaz toxiques (CO) pour un(1) Kg d'explosif. L'importance du volume des gaz d'explosion

détermine l'efficacité des explosifs au travail. Le volume des gaz après explosion peut être déterminé à l'aide des formules basées sur la loi d'Avogadro
Le volume dégagé par 1Kg d'explosif est :

$$V = \frac{22,42(N_1 + N_2 + N_3 \dots + N_n)}{M_1m_1 + M_2m_2 \dots + M_n m_n}$$

Ni= nombre de molécule grammes des produits i gazeux de l'explosion

Mi= masse moléculaire relative des composants i de l'explosif

mi= nombre de molécule grammes du composant i de l'explosif

Remarque : en moyenne ce volume est de l'ordre de 700 à 950 l/kg.

Exemple de calcul: voir exposé

Exercice : Déterminer le volume des produits gazeux pour l'explosion d'un Kg de mélange de trotyl ($C_3H_5(ONO_2)_3$) et salpêtre d'ammonium NH_4NO_3

3. Pression d'explosion

La pression des gaz formés lors de l'explosion se détermine d'après la loi de BOYLE MARIOTTE et GAY LUSSAC. Cette pression est déterminée par la formule :

$$P_{exp} = \frac{P_o.T_k.V_o}{273. V} \quad (Pa)$$

P_{exp} = Pression d'explosion

P_o = pression atmosphérique à 0°

P_o = 1,05.10⁵ Pa

V_o = Volume des gaz dégagés par 1 kg d'explosif en m³

T_k = température en degré Kelvin

T_k = T°exp+ 273 = Température d'explosion en degré Kelvin. (T° d'explosion en °c)

V = volume d'un Kg des charges

Correction de VAN DER VAALSE

-Coefficient de VAN DER WAALSE

-α = 0,001V_o pour les explosifs ayant 0,5 < ρ < 1g/ cm³

- α = 0,0006V_o pour les explosifs ayant ρ >1g/ cm³

$$= \frac{Po.Tk.Vo. \rho}{273. (1 - \rho \alpha)}$$

ρ : masse volumique de l'explosif en kg/m³

Pour les explosifs en vrac : $\rho = \rho_t$

Pour les explosifs en cartouche : $\rho = \rho_t. d_c^2/d_t^2$

d_c et d_t sont respectivement les diamètres de cartouche et de trou.

Remarque : en moyenne cette valeur varie de 6 à 20 Gpa.

Exercice

Déterminez la pression des gaz d'explosion de la nitroglycérine $C_3H_5(ONO_2)_3$ si un Kg de ce dernier dégage 0,716m³. La température d'explosion est 4500°C. La densité de la nitroglycérine est 0,8g/cm³.

Chapitre 5 : Mise en œuvre des explosifs

1. Notions

La mise en œuvre des explosifs nécessite l'utilisation en plus de l'explosif lui-même, d'une amorce et d'un dispositif de mise à feu de l'amorce. L'amorce est l'agent extérieur (à l'explosif) qui provoque la détonation de la cartouche amorce.

2. Les amorces

L'amorce ou artifice de mise à feu est un accessoire qui permet l'initiation des explosifs en toute sécurité et qui est détruit au moment du tir. C'est un générateur capable de produire un choc ou une flamme destinée à initier un explosif secondaire.

On distingue plusieurs types d'amorces :

- les détonateurs pyrotechniques ;
- les détonateurs électriques ;
- les détonateurs non électriques : à tube conducteur d'onde de choc TCOC (ou tube non-électrique : Ex NONEL, PRIMADET, Davey- QUICK, SNAPDET...) ;
- Les détonateurs électroniques : électriques gérés par une puce électronique.
- « les cordaux détonants » ;

2.1 Le détonateur pyrotechnique

Cette amorce comprend un petit tube cylindrique métallique (en Cu ou Al) ou en papier ouvert d'un bout pour permettre d'introduire le cordeau bickford. Le tube est rempli à 2/3 par d'explosif. Dans sa partie inférieure est placée la charge détonante constituée par du tétryl ou tolite. Dans sa partie supérieure est placée la charge amorçante constituée par de l'acide de plomb ou fulminate de mercure.

Remarque : les détonateurs pyrotechniques (détonateurs simples) ou capsules détonatrices sont des détonateurs instantanés uniquement ou servent de relai de surface pour cordeau détonant. Ils sont très sensibles au choc, à l'étincelle, à l'égratignure et à bien d'autres types d'impulsions. Leur manipulation exige beaucoup de prudence.

a

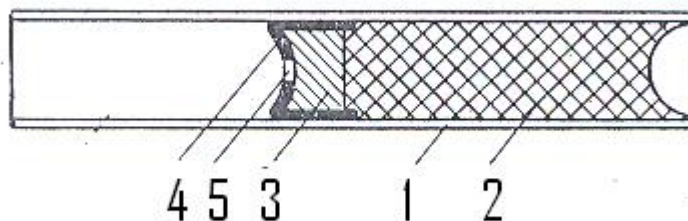


Figure n°3 : détonateur pyrotechnique

Remarque : l'utilisation est en déclin.

2.2 Les détonateurs électriques

Les détonateurs électriques sont des tubes cylindriques de 6 à 7 mm de diamètre, dans lesquels on distingue au moins : une charge amorçante, une charge détonante, et un filament électrique.

Remarque : Utilisation courante, 21 numéros disponibles en microretard (25 ms entre temps de 0 à 500 ms)

Principe : Voir exposé.

On distingue trois types de détonateurs électriques :

- les détonateurs instantanés : ils sont constitués comme décrits plus haut. Ils explosent presque immédiatement (0 à 3 ms) après le début du passage du courant.
- Les détonateurs à court retard ou micro-retard : (20 numéros par pas de 25 ms) 25, 50, 75, 100, 125, 150 500 ms.
- Les détonateurs à retard ordinaire (12 numéros par pas de 500 ms) : afin de retarder la détonation, un relais à combustion lente, est placé entre la charge amorçante et l'allumeur. En fonction de la longueur du relais, les retards sont de 0.5, 1, 1.5,, 6 secondes et sous commande spéciale, ils peuvent atteindre 10 -15 secondes.

Remarque : chaque détonateur comporte un numéro qui permet de déterminer son temps de départ.

Pour les courts retards ou micro retards :

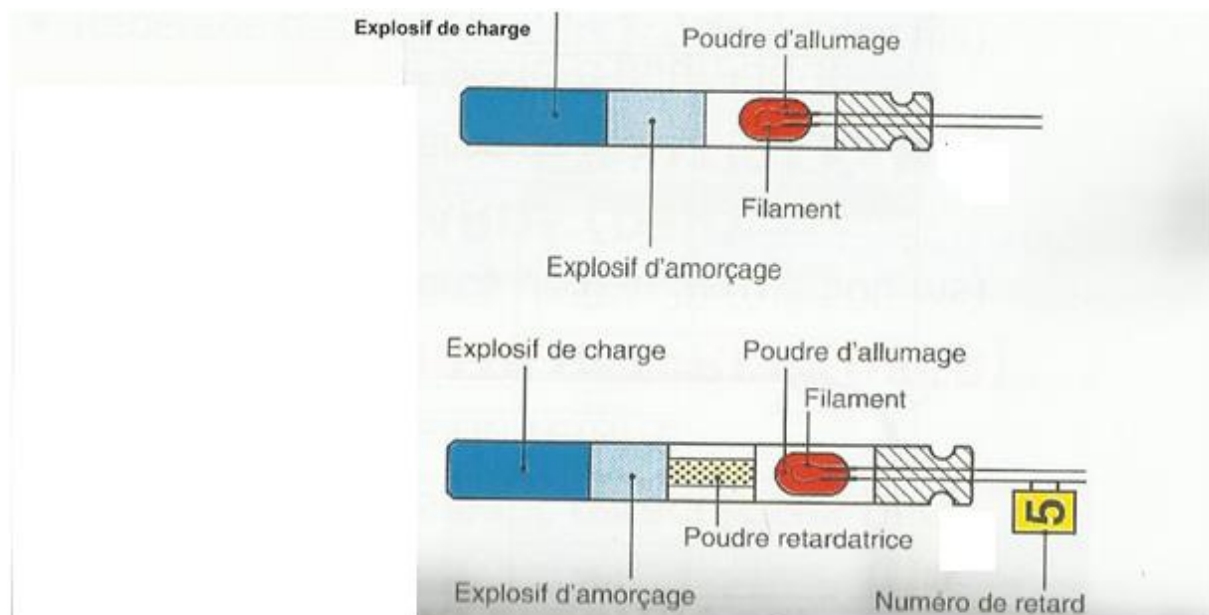
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Délais en ms	25	50	75	100																500

Pour les retards ordinaires :

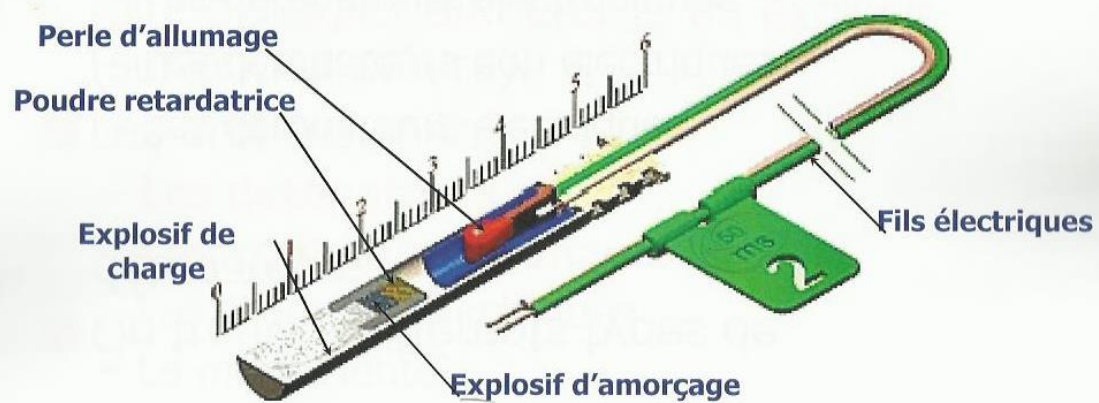
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Délais en s	0.5	1	1.5	2	2.5	3						6

Pour les instantanés :

N°	0
Délais en s	0



LES DETONATEURS ELECTRIQUES



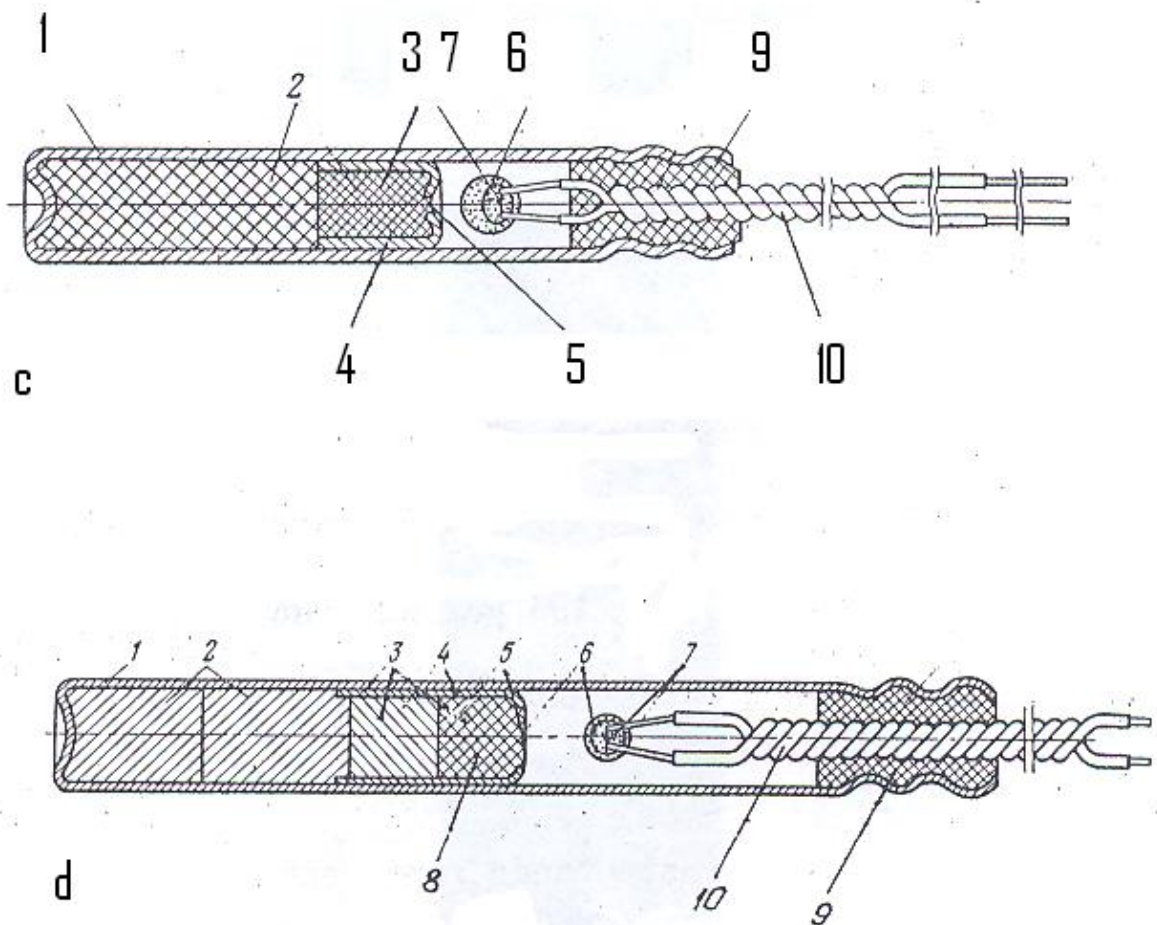


Figure n° 5 : détonateurs électriques

C : instantané ; d : à retard

1 : tube en laiton ; 2 : explosif secondaire ; 3 : explosif primaire ; 4 : cuvette métallique ; 5 : lumière ; 6 : allumeur ; 7 : fil de pont ; 8 : charge retardatrice ; 9 : bouchon plastique ; 10 : fils

En fonction de l'intensité du courant nécessaire à leur mise en œuvre, on classe les détonateurs électriques en :

- classe 0 : super haute intensité
- Classe I : haute intensité : grand besoin d'un courant (ex : de l'ordre de 13A pour 20 détonateurs Davey Bickford montés en série) pour fonctionner. On les utilise chaque fois qu'un risque électrostatique ou électromagnétique est présent sur le chantier.
- Classe II : moyenne intensité (MI) : besoin d'un minimum de 1.7 A pour 20 détonateurs Davey Bickford montés en série pour fonctionner. Ils sont les plus utilisés.
- Classe III : basse intensité (BI) : besoin de peu de courant pour fonctionner (de l'ordre de 0.65 A pour 20 détonateurs Davey Bickford montés en série. Hormis dans les exploitations à risque grisouteux, ils ne sont pratiquement plus utilisés.

Remarque :

Ces intensités sont variables selon les fabricants ;

Quand les HI, MI et BI sont-ils utilisés ?

Les détonateurs à microretard, sont utilisés dans la diminution des vibrations mais aussi pour avoir des bons rendements.

Repérage des détonateurs (couleurs des fils).

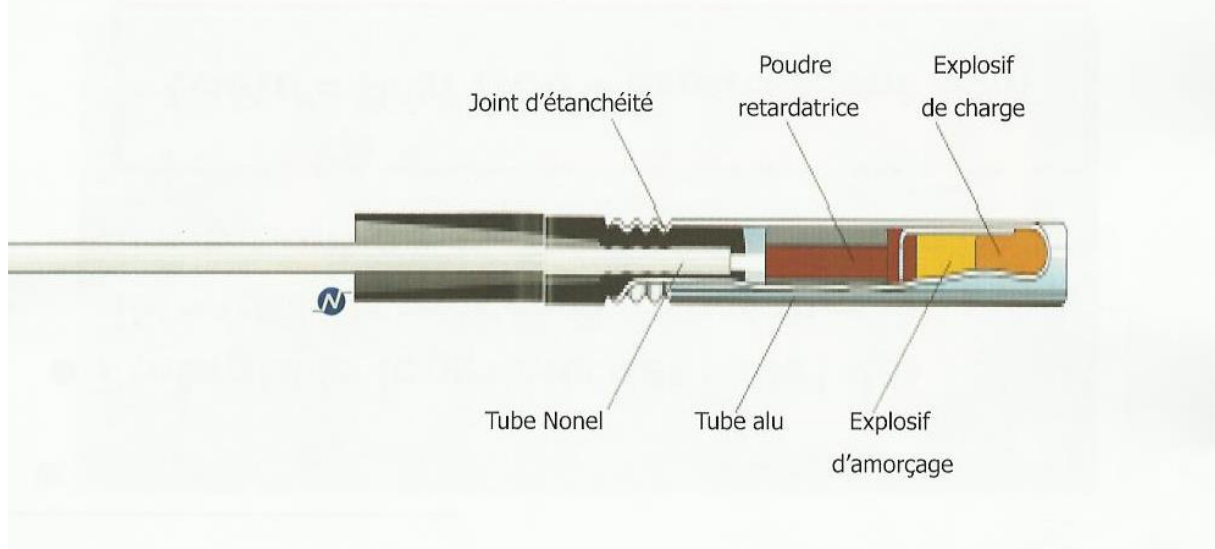
TYPES ¹	Résistance = 1 ohm MI Intensité = 1 A	Résistance = 0,5ohm HI Intensité = 7 à 10 A
SEQUENCES		
Détonateurs instantanés	Rouge	Rouge
1 retard = 0 seconde	Vert	Blanc
Détonateurs à court retard	Rose	Rose
20 retards = 25 millisecondes	Vert	Blanc
Détonateurs à retard ordinaire	Jaune	Jaune
12 retards = 0,5 seconde	Vert	Blanc
Allumeurs ou inflammateurs	Gris	
1 retard = 0 seconde	Vert	

2.3 Les détonateurs non électriques (Nonel)

Comme son nom l'indique, il n'est pas sensible au courant électrique. Le système est composé d'un initiateur, d'un tube conducteur d'onde de choc, de raccords de surface non-électriques et de détonateurs non-électriques. Il est utilisé pour le tir en tranche minière.

LES DETONATEURS NON ELECTRIQUES

- Le détonateur de fond de trou:



Initiateur

Capable de provoquer un choc pour l'amorçage du tube non-électrique. Il peut s'agir d'un pistolet de starter à cartouche Flaubert de 6 mm ou de l'explosion d'un autre dispositif d'amorçage (détonateur électrique le plus souvent ou cordeau détonant).

Tube conducteur d'onde de choc (TCOC)

Tube plastique souple dont la paroi interne est revêtue d'une composition pyrotechnique finement dosée à 20 mg / mètre (aluminium), permettant la transmission d'une onde de choc en sous régime de détonation avec une vitesse de l'ordre de 2000 m/s.

Raccord de surface

Il s'agit d'un mini détonateur chargé à 0.2g de pentrite. Le tube est serti dans l'embouti du détonateur avec un manchon en élastomère pour éviter la blessure du tube.

Le retard (17 ms) est assuré par la combustion d'une composition retardatrice. Il existe aussi un raccord de surface instantané. Cette combustion se produit sous l'effet de l'onde de choc du TCOC et permet d'initier l'explosif primaire. Le relais de surface peut initier jusqu'à 6 tubes non électriques, grâce à son boîtier de connexion. Remarque : le fonctionnement d'un détonateur non électrique est basé sur le même principe que le mini détonateur du relais de surface, ce détonateur est chargé à 0.8g de pentrite. La figure qui suit, nous illustre l'image du détonateur non électrique :



Détonateur non électrique

Utilisation courante : 1 numéro de détonateur (400 ms) et trois raccords (17, 25 et 42 ms), possibilité de générer un grand nombre de temps ;

2.4 Les détonateurs électroniques

Ils se présentent sous la même forme qu'un détonateur électrique. Ils ont le même diamètre et une longueur légèrement supérieure. La principale différence est le remplacement de la composition pyrotechnique retard par un circuit électronique assurant cette fonction retard.

Ces détonateurs de type nouveau offrent une grande souplesse à l'utilisateur et sont programmables individuellement.

Remarque : l'utilisation est en augmentation constante principalement pour des problèmes d'environnement (vibrations).

Temps disponible : de 0 à 14 000 ms par pas de 1 ms (soit 14 001 temps disponibles).

Avantages

- contrôle de vibration dans les environnements sensibles ;
- aucune limitation de séquence
- optimisation du tir ;
- Grande sécurité par rapport aux autres types ;
- Facilité au stockage des détonateurs ;
-

2.5 Le cordeau détonant

Le cordeau détonant est constitué par une âme d'explosif brisante (ex : tétranitrate de pentaérythritol, pentrite, ...) enveloppé par des gaines en coton et en mastics étanches. On produit le cordeau en bobine de 50, 100, ... mètres. De nos jours, on utilise dans différents pays différentes sortes d'explosifs sous gaine textile. Exemple : PETN aux USA (10 g/m) ; TEN en ex URSS (12-13 g/m) ; PETRITE en France (10 g/m).

La masse d'explosif par mètre dépend de l'application pour laquelle il a été conçu.

- elle est de 5 à 6 g/ m pour les cordons de transmission

- 10 à 25 g/m pour les cordons détonants d'amorçage
- 25 à 100 g/m pour les cordons spéciaux (prédécoupage).

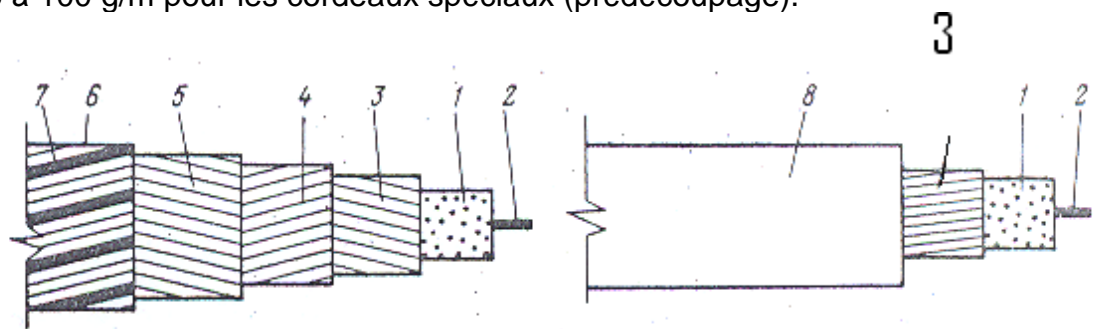


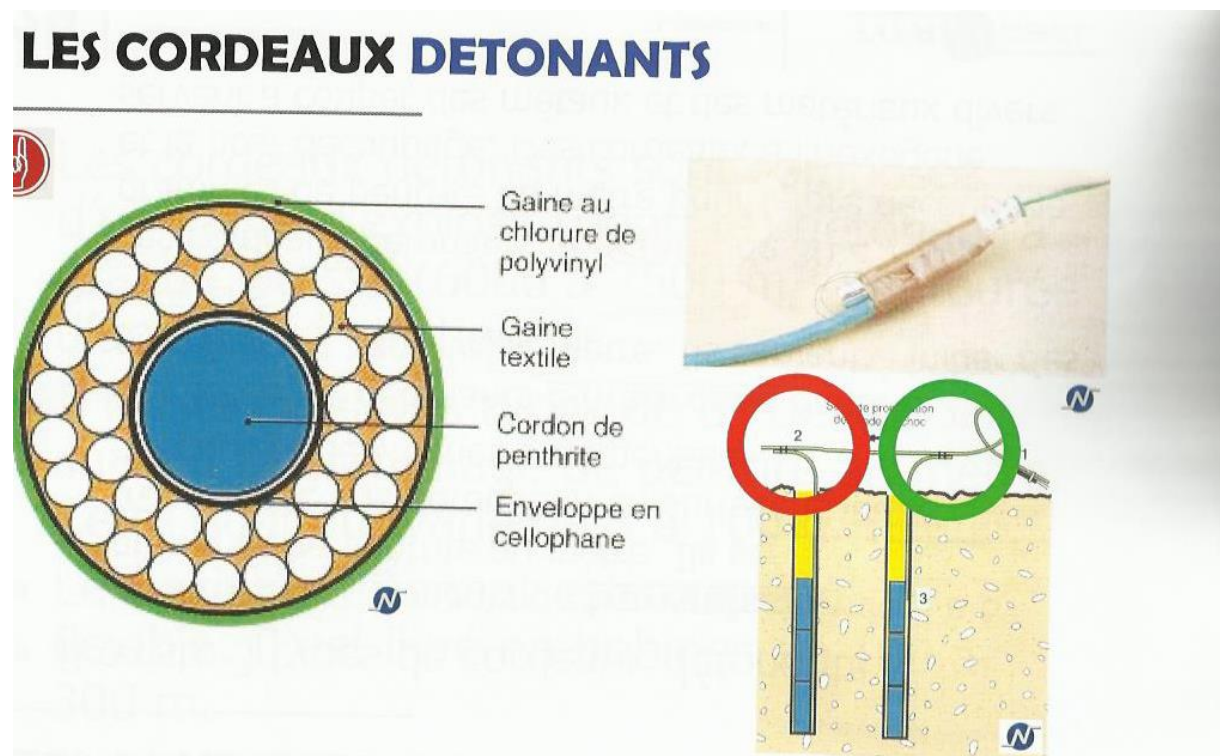
Figure N° 6 : cordeau détonant

1 : âme explosive ; 2 : fil en coton ; 3, 4, 5, 6 : gaines (enveloppes) en coton ; 7,8 : gaines des mastics étanches

NB : Le cordeau a un diamètre de 5 à 6 mm et quelques fois plus.

Branchement des cordons détonants

Les branchements des cordons détonants peuvent être simples ou multiples. Le branchement simple des cordons se réalise soit directement avec du cordeau souple en branchant les cordons dérivés sur le cordeau maître au moyen d'un nœud (tête d'alouette) ou autres moyens.



Précautions

Il faut toujours prendre soin de diriger le cordeau dérivé dans le sens de propagation de l'onde de détonation.

Le branchement doit faire un angle supérieur ou égal à 90° avec le cordeau maître dans le sens de propagation de la détonation.

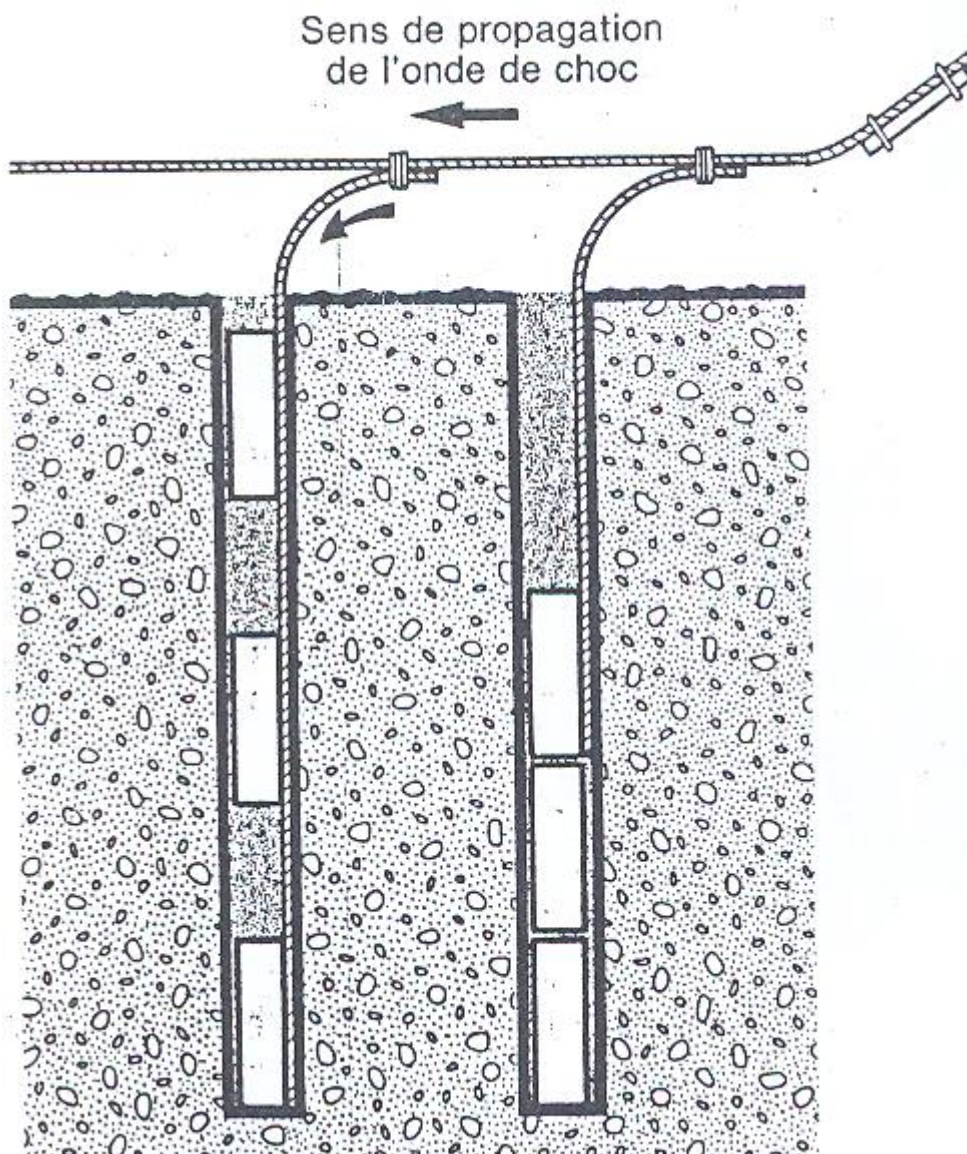


Figure N° : branchement du cordeau détonant
Liaison cordeau maître- cordeau dérivé

Domaine d'application

On utilise l'amorce au cordeau détonant dans tous les tirs d'explosifs, dans les mines souterraines et dans les MCO, sauf dans les mines grisouteuses et poussiéreuses.

3. Amorçage

3.1 la cartouche amorce

C'est la cartouche amorce qui provoque l'explosion de toute la mine.

Sa préparation consiste :

- à introduire dans un trou percé dans une des extrémités d'une cartouche le détonateur électrique lorsqu'il s'agit des tirs électriques,
- ligature de l'extrémité du cordeau détonant à la cartouche amorce lors de l'application de l'amorçage au cordeau détonant.

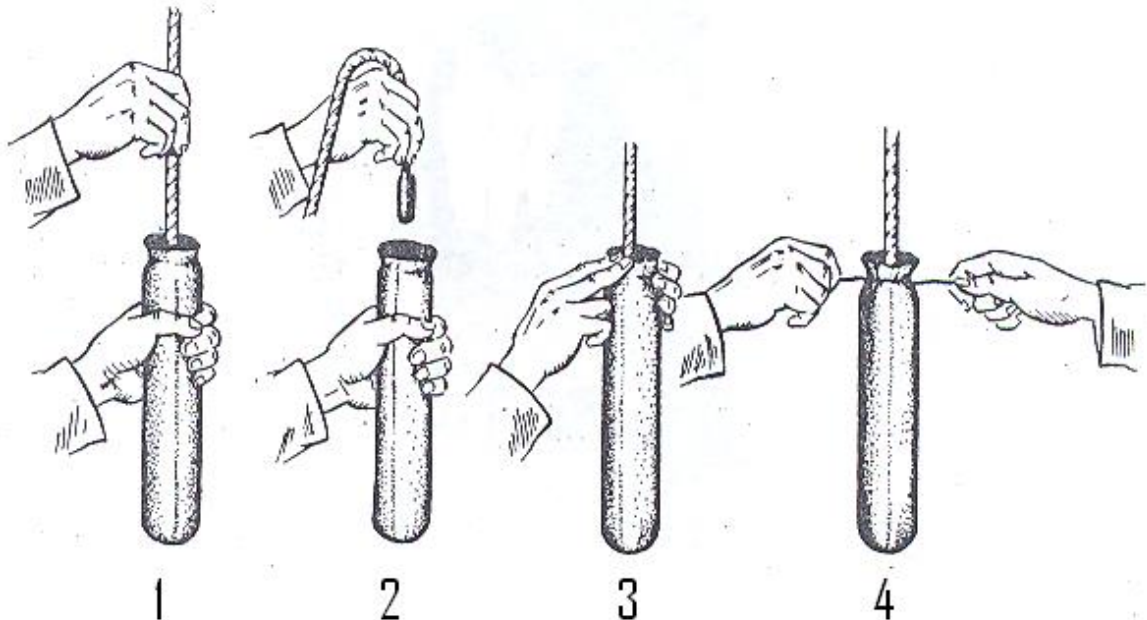


Figure N° : Fabrication des cartouches amorces

1, 2, 3, 4 : succession des opérations

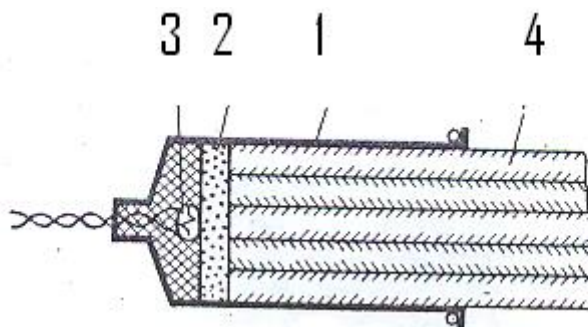
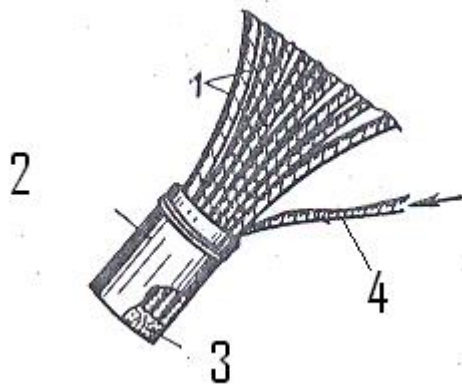


Figure N° : cartouche d'allumage électrique

1 : cartouche en papier ; 2 : composition d'allumage (poudre) ; 3 : enflammeur électrique ; 4 : mèches lentes



Cartouche d'allumage

1 : mèches lentes ; 2 : cartouche en papier ; 3 : composition d'allumage (poudre)

3.2 Amorçage

L'amorçage se définit comme une opération qui consiste à relier le détonateur à un explosif.

Si la charge explosive, le détonateur et le dispositif de mise à feu se conjuguent cela nous donne la chaîne pyrotechnique.

Il existe plusieurs possibilités de l'amorçage. On peut citer entre autre :

- L'amorçage au détonateur électrique;
- L'amorçage au détonateur électrique + cordeau détonant;
- L'amorçage au détonateur non électrique;
- L'amorçage au détonateur non électrique + cordeau détonant;
- L'amorçage au cordeau détonant ;
- Etc.

Remarque :

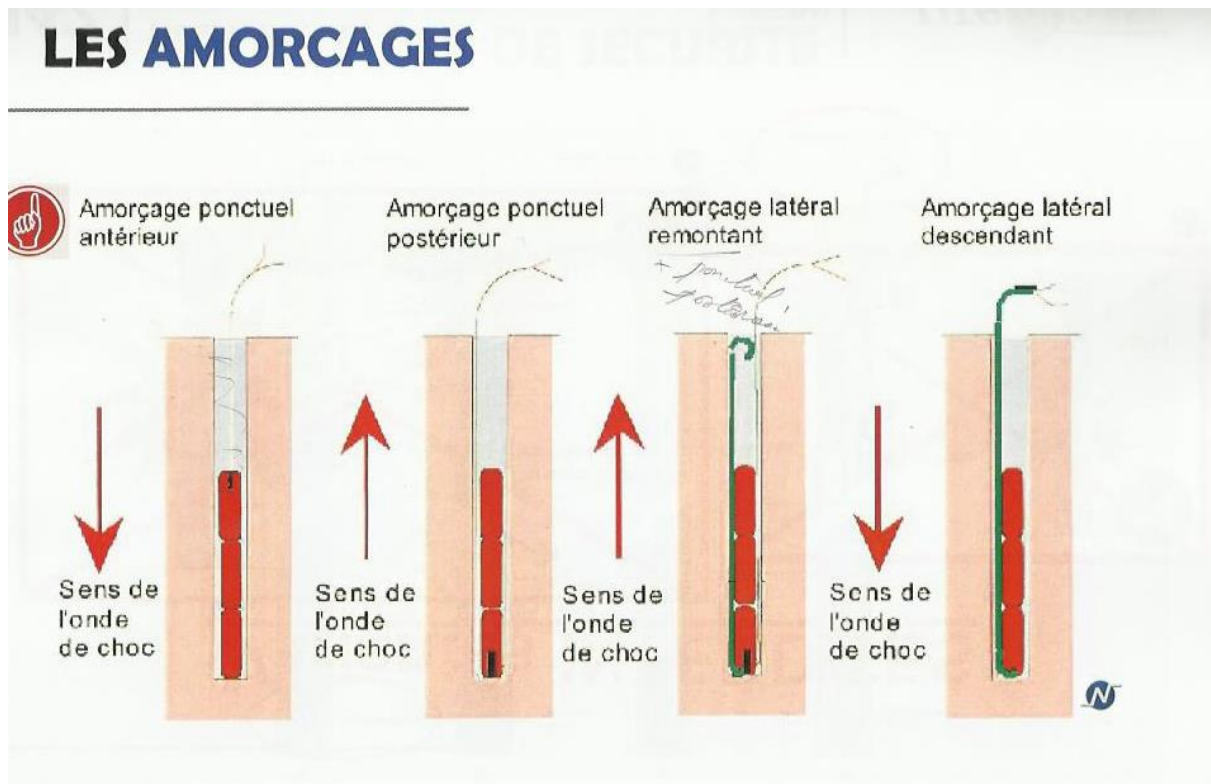
L'amorçage au détonateur électrique est utilisé dans la plupart des tirs et celui au détonateur électrique + cordeau détonant ainsi que l'amorçage au cordeau détonant est utilisé lorsque la configuration du chantier ne permet pas aux engins de foration de forer toute la surface à tirer ou lorsqu'on veut réaliser simplement un cisaillement de la roche.

On distingue quatre modes d'amorçage:

- Amorçage postérieur : le détonateur est placé dans la première cartouche de la charge, celle qui se trouve au fond du trou. Tous les types de détonateurs sont autorisés pour cette opération (sauf pyrotechnique). C'est actuellement le mode d'amorçage le plus fréquent.
- Amorçage antérieur: détonateur est placé dans la dernière cartouche de la charge, celle qui se trouve la plus proche de l'ouverture du forage. Ce type d'amorçage est peu conseillé.
- Amorçage latéral remontant : L'amorçage de l'explosif est réalisé à l'aide d'un cordeau détonant sur toute la longueur de la mine. L'amorçage se fait latéralement dans la mine. Si le diamètre du trou est faible, l'explosif n'a

pas le temps d'atteindre sa vitesse optimale de détonation. Le rendement sera donc moins bon.

- Amorçage latéral descendant : Détonateur hors de trou.



3.3 Exigences à un bon amorçage

Pour assurer un bon amorçage, il faut :

- attacher soigneusement l'amorce à l'explosif afin d'éviter qu'elle ne soit arrachée de sa position pendant le chargement des charges.
- Eviter que les fils et les cordons ne soient sujets à des torsions ni à des tensions trop fortes.
- Eviter à l'amorce le contact de l'eau si possible

4. Moyens de mise à feu

L'explosion des charges peut être réalisée avec le feu, avec le courant électrique ou avec les cordons détonants.

Dans l'explosion par le feu, on utilise une mèche et une capsule détonatrice ; dans l'explosion électrique des allumeurs électriques (exploseurs) et des détonateurs électriques.

4.1 La mèche

Elle est aussi appelée mèche de sûreté ou cordon Bickford. Elle est constituée par une âme de poudre entourée d'une ou plusieurs gaines en coton et d'un revêtement extérieur étanche (en asphalte, PVC ou guttapercha).

La mèche transmet le feu à l'amorce ou à l'explosif.

On distingue :

- le cordon Bickford ordinaire avec une vitesse de combustion de 1 cm/seconde.
- Le cordon Bickford lent ayant une vitesse de combustion de 0.5 cm/seconde.

Pour allumer le cordeau Bickford, on utilise la mèche, les bougies ou les cartouches d'allumage.

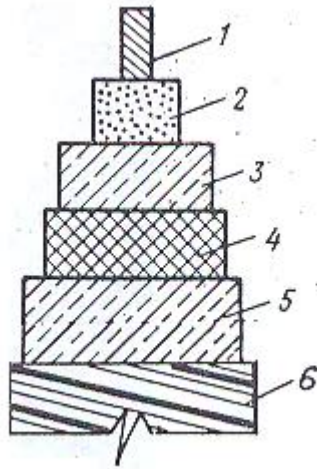


Figure N° : mèche lente (cordeau Bickford)

1 : fil en coton ; 2 : âme de poudre ; 3, 5 : gaines en cotons ; 4,6 : gaines asphaltées

4.2 Les explodeurs électriques

Ce sont des générateurs de courant continu. On distingue :

- Les explodeurs à dynamo : à commande directe à main : 10 à 50 amorces ; à commande à ressort : 50 à 400 amorces
- Des explodeurs à condensateur : à batterie ou à manivelle.

5. Procédés de mise à feu

5.1 Tir à la mèche lente

Il comprend cinq opérations :

- préparation des allumeurs
- préparation des cartouches amorces
- chargement des trous
- bourrage
- tir : on allume l'extrémité du cordeau Bickford qui sort du trou. A la fin de sa combustion les étincelles qui en résultent font exploser la substance brisante de l'amorce provoquant ainsi l'explosion de toute la charge.

NB : le tir à la mèche lente est interdit dans les mines grisouteuses et poussiéreuses lors de creusement des excavations verticales et inclinées dont l'angle de pente excède 30°.

5.2 Application du cordeau détonant

Il comprend les opérations suivantes :

- Ligature de l'extrémité du cordeau détonant à la cartouche amorce puis son introduction au fond de trou
- Chargement des cartouches suivantes
- Bourrage
- Tir

Remarques :

- Le cordeau détonant se trouve donc coincé entre les cartouches et les parois du trou.
- Pour assurer une détonation parfaite des charges, la partie du cordeau ligaturée à la cartouche est pliée en deux ou trois fils
- le tir au cordeau détonant est utilisé le plus souvent dans les travaux miniers à ciel ouvert.
- l'amorçage de plusieurs trous chargés en une seule volée est possible par simple connexion des cordeaux dérivés à un cordeau principal à l'extrémité duquel sera mis le détonateur.

Avantages de l'application de l'amorçage par cordeau détonant

- Il présente un excellent rendement lors des tirs des charges allongées ;
- Il offre la possibilité d'amorcer simultanément un très grand nombre de charge ;
- Il présente une grande sécurité vue l'inexistence des détonateurs à l'intérieur des trous de mine ;
- Il offre une grande sécurité dans les endroits présentant des risques d'explosion par suite d'électricité statique ou courant vagabond ;
- Il supprime le danger (risque) de l'inexplosibilité des cartouches ;
- L'existence des cordeaux détonants à micro-retard permet d'améliorer la fragmentation des roches.

5.3 Tir électrique

Il comprend les opérations suivantes

- préparation du circuit de tir
- calcul de l'intensité du courant dans le circuit de tir et dans les détonateurs
- vérification des détonateurs électriques
- préparation des cartouches amorces
- chargement des trous
- bourrage
- tir

Avantages

Par rapport à la mèche lente, il offre les avantages suivants :

- Possibilité d'effectuer le tir à intervalle ainsi que le tir simultané des charges.
- Possibilité de contrôler avant le tir les validités des détonateurs électriques et le bon état du circuit de tir en utilisant des appareils de mesure.

NB : les tirs électriques et à la mèche lente sont les plus utilisés dans le creusement des excavations minières dans les roches ne présentant pas des gaz et poussières inflammables.

Inconvénients

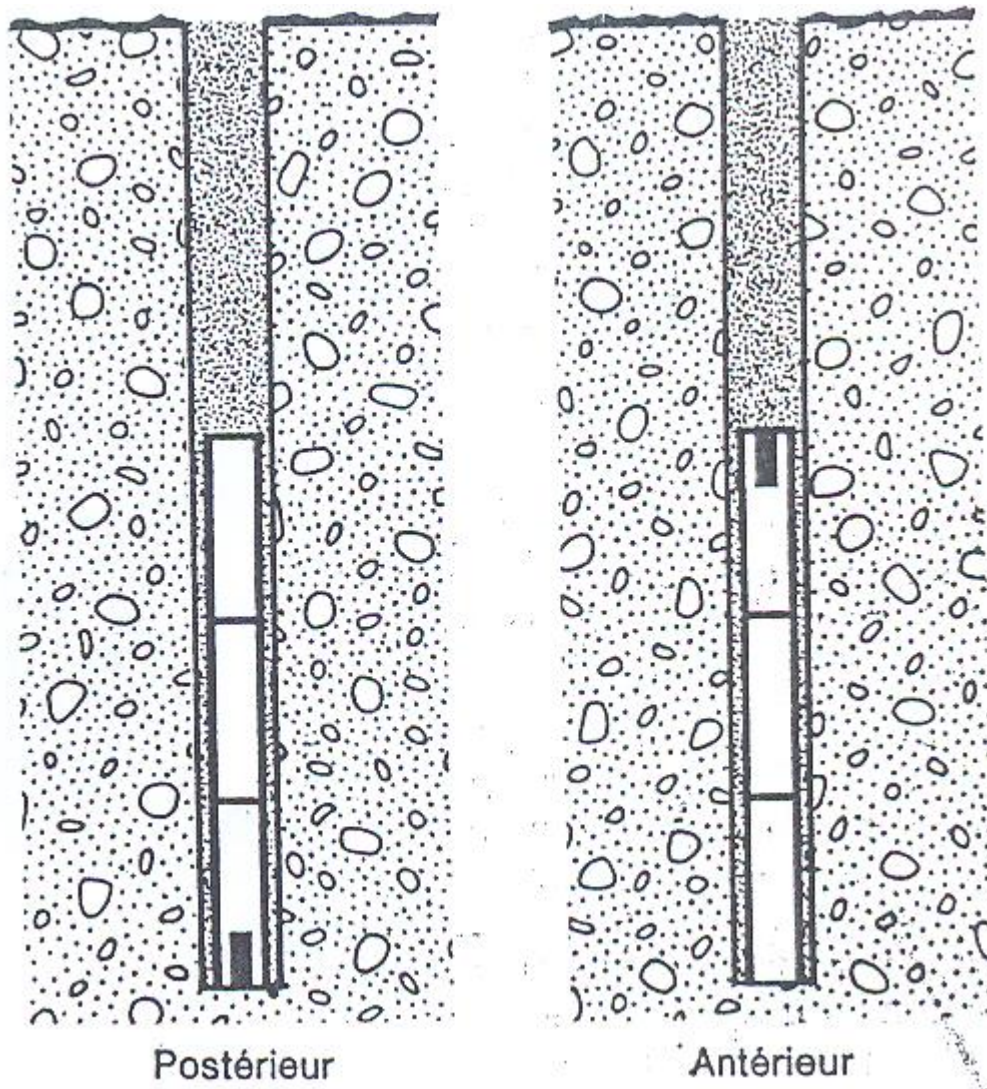
La sensibilité des détonateurs électriques aux courants parasites rend leur utilisation dangereuse sur certains chantiers.

Chapitre 6 : Les explosifs et la sécurité

1. Principes généraux du minage

La charge d'une mine comprend en général une ou plusieurs cartouches. La cartouche sur laquelle est fixée le détonateur ou le cordeau détonant est appelée cartouche amorce.

La cartouche amorce peut être disposée au fond du trou (amorçage postérieur) ou à l'autre extrémité de la charge (amorçage antérieur).



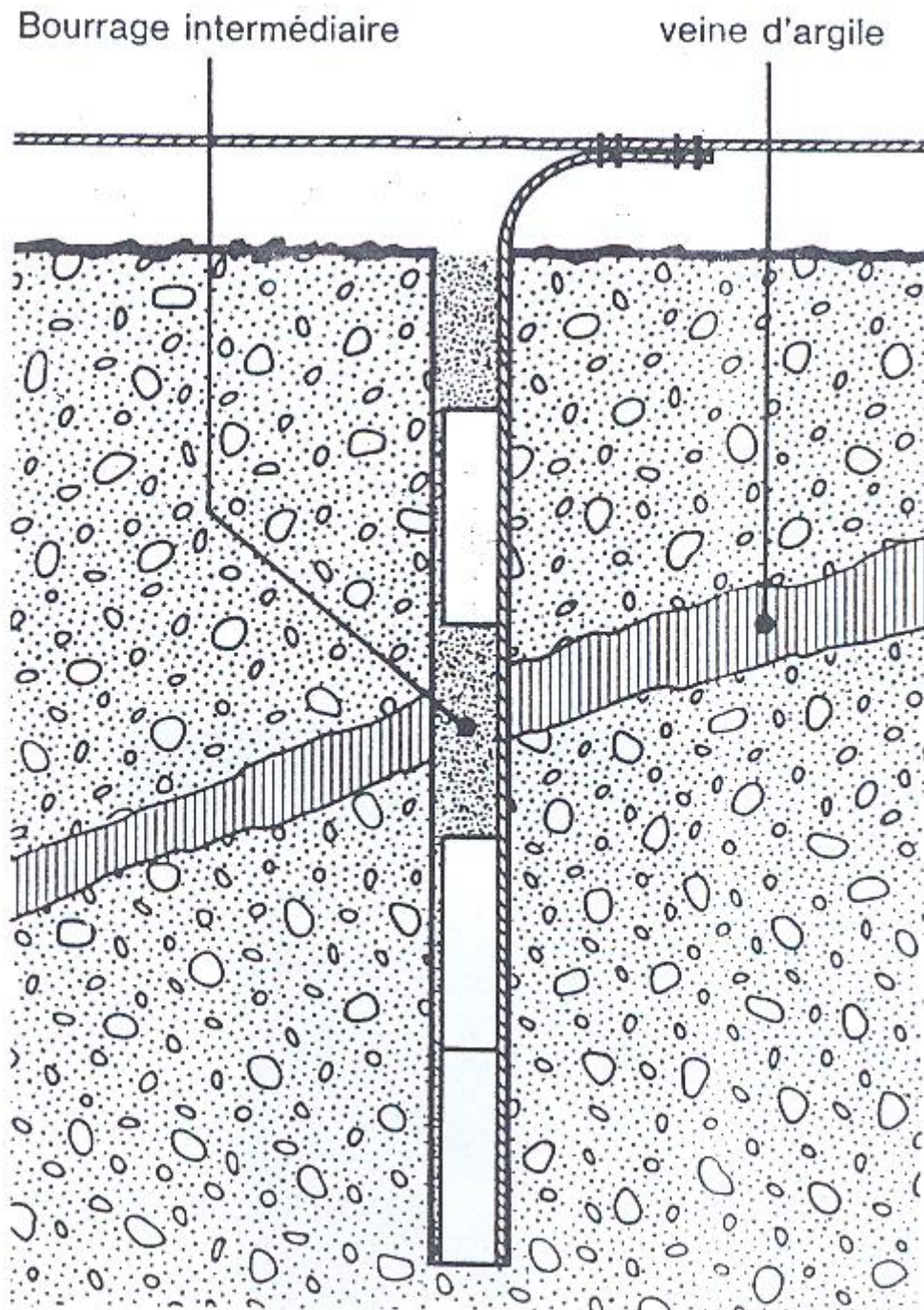
Modes d'amorçage

Les travaux de chargement d'une mine nécessitent les précautions suivantes :

- on doit s'assurer qu'avant de commencer le chargement que les cartouches ne risquent pas d'être coincées (vérification des trous) ;
- il faut s'assurer que la mine a la profondeur indiquée sur le plan de tir ;
- mesurer la profondeur des mines à l'aide d'un bourroir rigide, d'un bourroir à corde ou à l'aide d'un décamètre; si le trou est très profond, il faut le régler à la côte voulue ;
- si le trou manque de profondeur, il faut modifier les charges en accord avec le concepteur du plan de tir ou l'approfondir.

Avant de commencer le chargement, le boutefeu définit les zones interdites en MCO:

- zone comprise entre la première rangée de trou et le bord du front de taille ;
- zone face au front de taille sur le carreau inférieur de longueur égale à la hauteur du front
- la cartouche amorce doit être soigneusement introduite dans le trou : pendant l'introduction des cartouches dans le trou, on prend soin d'éviter qu'elles ne soient séparées par de la poussière qui risquerait de gêner la transmission de l'onde explosive.
- Il est interdit de forer dans les zones où un fleuret risque d'heurter un trou déjà chargé ou en cours de chargement (au moins 6 m au moins de la longueur du trou le plus profond, ne peut être inférieur à la moitié de la longueur du trou de mine le plus profond).
- Le matériel inutile et les travailleurs autres que ceux chargés de ces travaux doivent être évacués.
- 10 mètres d'espacement minimum sont obligatoire entre deux équipes en cours de chargement.
- Le poids des cartouches mis en œuvre en chute libre au dessus de la cartouche amorce ne peut avoir un poids supérieur à 5 Kg pour les dynamites et 10 Kg pour les nitrates.
- On peut améliorer le rendement du tir en disposant (en plus du bourrage ordinaire) un bourrage intermédiaire au droit d'un vide ou d'une veine d'argile



Chargement d'une mine en présence d'un vide ou une veine d'argile

- Interdiction de fumer
- Interdiction de charger des trous à moins de 10 m de tout engin
- Interdiction de couper les cartouches, de les introduire de force ou de les écraser
- Interdiction de circuler avec des engins à moins de 10 m d'une mine chargée
- Il faut laisser dépasser à l'extérieur du trou une longueur de cordeau telle que celui-ci pourra être branché facilement sur le cordeau maître (30 cm environ)
- Interdiction de débourrer un trou de mine, qu'il ai été allumé ou non.
- Interdiction de recharger un trou ayant fait canon
- Interdiction de laisser sans surveillance une volée chargée.

- Avant toute opération de chargement, le boutefeu s'assure que l'exploseur est hors service en conservant sur lui la clef de manœuvre de celui-ci.
- Il importe avant toute mesure sur le chantier, de vérifier le bon fonctionnement de l'ohmètre de contrôle. Pour cela le boutefeu raccorde les deux bornes de l'appareil au moyen d'un petit morceau de ligne électrique.
- Lors de l'utilisation des détonateurs à retard, l'amorçage postérieur est obligatoire.
- Un contrôle du détonateur est obligatoire après la mise en place de la cartouche - amorce au fond du trou. Il est permis de laisser l'ohmètre branché en permanence aux fils du détonateur pendant toute la durée des opérations de chargement avec comme avantage, d'indiquer immédiatement au boutefeu toute rupture d'un fil conducteur (l'écran de l'appareil ne comporte brusquement plus aucune indication).
- En cas de rupture, le boute feu doit réamorcer la mine, de préférence avec un détonateur de même numéro.
- Tous les trous de la volée étant chargés, les détonateurs seront reliés entre eux de façon à constituer un circuit électrique. Le raccordement se fait par des épissures prenant les fils deux à deux. Lorsque l'on opère dans les milieux très humides ou boueux, ou lorsque les épissures sont susceptibles de se trouver dans l'eau, on peut utiliser des dispositifs de connexion étanches à sertir, du type de ceux employés en téléphonie.
- Les circuits électriques peuvent être série, parallèle, série-parallèle ou parallèle-série. La réglementation française n'autorise explicitement que les circuits séries.
- Quelque soit le mode de raccordement utilisé, il est impératif que tous les détonateurs de la volée proviennent d'un seul fabricant et soient de même sensibilité. Il est aussi recommandé qu'ils proviennent d'un même lot de fabrication afin de limiter les risques de chevauchement dus à un vieillissement différentiel des détonateurs.
- Une fois le circuit établi, le boute feu s'assure de sa continuité par une mesure précise de sa résistance au moyen de l'ohmètre. Il contrôle ensuite, avec le même instrument, la ligne de tir ouverte, puis fermée, ce qui lui permet de connaître la valeur de la résistance de la ligne de tir.
- Raccordement de la ligne au circuit de détonateurs puis déroulement de la ligne jusqu'au poste de tir ou il pratique une dernière mesure, à comparer avec la résistance théorique du circuit.
- En fonction des résultats des mesures, procéder à la mise à feu à l'aide d'un explodeur adapté ou aux corrections éventuelles.
- L'utilisation d'un explodeur non adapté au circuit à mettre à feu, ou dont les caractéristiques techniques seraient altérées, conduit à coup sûr à un raté total ou partiel. Dans un raté partiel ayant ces causes pour origine, le départ de quelques détonateurs se produit de façon aléatoire au sein de la volée ; il est dans ce cas quasiment impossible de remédier aux coupures de fils qui ne manquent pas de se produire.

2. Effets des explosifs sur la santé

Les explosifs sont des produits chimiques. Leur combustion peut provoquer des dommages plus ou moins graves à la santé des travailleurs par :

- contact cutané,
- l'inhalation des vapeurs ambiantes
- l'inhalation des fumées après la combustion

Les fiches de données sécurités donnent toutes les informations nécessaires pour se prémunir de ces risques. Néanmoins, l'employeur devra en tenir compte. La plus part des fabricants mettent à disposition des mineurs des fiches techniques pour chaque produit explosif. Ces fiches comportent toutes les caractéristiques et les données techniques du produit. En outre une fiche de données sécurités (FDS) est disponible pour le mineur. Sur ce document figurent les données d'hygiène et de sécurité dont notamment :

- les composants
- identification des dangers
- les premiers secours
- mesures de lutte contre les incendies
- mesures à prendre en cas de dispersion accidentelle
- précautions de stockage et de manutention
- protection individuelle
- contrôle de l'exposition
- état physico chimique
- stabilité et réactivité du produit
- informations écologiques
- informations toxicologiques
- considérations relatives à l'élimination
- informations relatives au transport
- informations réglementaires
-

3. Précautions à prendre avant une mise à feu

Notions

La manipulation et l'utilisation des explosifs présentent un danger dans toutes les mines et en particulier dans celles de charbon.

Le grisou donne lieu à des mélanges explosifs pour des teneurs comprises entre 6% 16%. En effet il explose :

- en quelques secondes à 650°C
- en quelques minutes à 600°C
- en quelques heures à 500°C

Les poussières de charbon peuvent selon la teneur en matières volatiles être inflammables. L'inflammation peut se déclencher par un arc électrique d'au moins 2.5KW ou par l'explosion de 40 g seulement de dynamites.

Avant une mise à feu, un certain nombre de précautions limitent les dangers dus à l'utilisation des explosifs. En effet il est important de respecter le choix du type d'explosif en fonction de la nature du minerai /roche.

Dans les mines de charbon, il est indispensable avant toute mise à feu de :

- mesurer la teneur en grisou
- procéder à un arrosage dans les mines à poussières inflammables

De façon générale un boute feu doit :

- s'assurer qu'aucun matériel ou produit explosif n'est laissé à proximité du front de tir.
- Faire évacuer le chantier et la zone dangereuse environnante et assigner aux personnes des points de refuge où elles ne risquent pas d'être atteintes par des gaz nocifs ou des projections ou chutes de blocs dues aux vibrations.

- Assurer un gardiennage afin d'empêcher l'accès au périmètre dangereux. Si le périmètre dangereux est de grande étendue, établir dans la mesure du possible une liaison radio entre le poste de tir et les gardes.
- Annoncer à l'aide d'un signal sonore le tir suivant un code qui doit être connu de l'ensemble du personnel travaillant sur le chantier
- Adopter le plan de tir à l'environnement (réduire si nécessaire l'importance des charges à faire exploser à la fois).
- Limiter au maximum les projections
- Sensibiliser les habitants voisins du déroulement des travaux de tir
- Si le tir doit avoir lieu à proximité d'un appareillage électrique sous tension, ou à côté des lignes haute tension ou d'émetteurs radio et radars puissants, il est plus sécuritaire d'utiliser des détonateurs non électriques (Nonel) ou à défaut des détonateurs électriques haute intensité. Si pour une raison ou une autre, l'utilisation des détonateurs électriques reste une nécessité, respecter les distances minimales de sécurité admises par les règlements en la matière.
- La présence d'une eau chargée et conductrice peut entraîner des ratés liés à des dénudages des fils.
- En cas de surprise d'orage, il faut évacuer le chantier sans délai (évacuation des explosifs non chargés, évacuation du personnel, shuntage des fils) et mise en place d'une aire de sécurité autour du tir. Le cas de l'orage doit faire l'objet d'une consigne dans le cahier de prescription.

4. Démolition des ouvrages à l'explosif

La démolition d'un ouvrage à l'explosif nécessite les précautions suivantes :

- adapter le plan de tir à l'environnement ;
- limiter au maximum les projections afin d'assurer la sécurité du public ;
- être sûr de pouvoir atteindre du premier coup l'objectif visé.

5. Opérations post tir

Après le tir, le boute feu doit :

- Observer au pote de tir le délai d'attente prévu (au moins 5 minutes dans les MCO et durée variable dans les mines souterraines)
- Le boute-feu (assisté au besoin d'une autre personne) procède ensuite à la reconnaissance du chantier (détection des ratés et anomalies éventuelles...)
- Ordonner la levée de la garde si tout s'est bien passé.
- En cas de présence des produits explosifs dans les déblais, le déblaiement doit se faire avec précautions et les produits explosifs retrouvés doivent être détruits.
- Il est interdit d'abandonner sans surveillance, ou sans en interdire l'accès, un chantier dans lequel, soit la reconnaissance après le tir n'a pas eu lieu, soit un raté, un culot ou un autre fond de trou dont il n'est pas certain qu'il ne contienne pas encore de produits explosifs n'a pas été traité.
- Une charge amorce retrouvée doit être, conformément aux instructions de l'exploitant, soit immédiatement désamorcée, soit détruite.
- Procéder à une deuxième reconnaissance après le déblaiement total. Dès que le front est dégagé et qu'il est possible d'y accéder sans danger, une personne du chantier habilitée par l'exploitant doit rechercher les ratés et les fonds de trous qui ne seraient pas apparus auparavant. Des dispositions doivent être prises pour informer, les personnes ayant à intervenir sur les lieux concernés, d'anomalies éventuelles constatées après le tri.

6. Stockage et transport des produits explosifs

Stockage

Il existe trois catégories de dépôts suivant les quantités de substances explosives qu'ils peuvent recevoir :

- Les dépôts de première et deuxième catégorie sont importants et ne sont installés sur les chantiers qu'exceptionnellement.
 - Première catégorie : plus de 250Kg d'explosifs ou plus de 50.000 détonateurs
 - Deuxième catégorie : 50 Kg d'explosifs < deuxième C< 250Kg d'explosifs ou 12500 détonateurs < deuxième C < 50.000 détonateurs
- La troisième ou petite catégorie est celle que l'on retrouve le plus souvent dans les chantiers. La quantité d'explosifs d'un dépôt de troisième catégorie est donnée par la relation suivante :

$$Q = 50.E$$

Ou : E est le coefficient d'équivalence affecté à chaque produit explosif.

E = 1 pour les dynamites (soit 50 kg au maximum)

E = 2 pour les nitrates (soit 100 kg au maximum)

E = ¼ pour les détonateurs (soit 12.5 kg de détonateur). Pour une moyenne d'1 g d'explosif par détonateur, cela correspond à 12500 détonateurs.

Ces dépôts peuvent en outre être de types différents :

- les dépôts superficiels
- les dépôts enterrés
- les dépôts souterrains
- les dépôts mobiles.

Remarque : les détonateurs et les explosifs sont stockés dans des dépôts différents.

Stockage hors chantier

Aucun explosif ou substance explosive ne peut être stocké ailleurs que dans les dépôts réglementairement construits et établis à cet effet.

Tout mouvement d'explosif doit être indiqué sur un registre précisant :

- date de réception
- quantité réceptionnée
- quantité sortie
- date de sortie
- destinataire

Stockage sur chantier

Sur un chantier on ne peut momentanément stocker que la quantité d'explosifs nécessaires au chargement d'une volée sur ce chantier. En outre cet explosif doit être sous surveillance en permanence.

Les dépôts

- En dehors des heures de travail des boufeux, les clés sont déposées au poste de garde. Tout dépôt doit être fermé par des portes de construction solide, munies de serrures ou cadenas de sécurité et qui ne doivent être ouvertes que pour le service de dépôt. Les chambres de dépôt et les passages leur donnant accès doivent avoir des dimensions et une disposition telles qu'il soit toujours facile d'y circuler et d'y transporter des caisses d'explosifs.
- L'intérieur du dépôt doit être tenu dans un état constant d'ordre et de propreté. Il est interdit d'y stocker d'autres objets ou substances que l'explosif ou les

détonateurs et notamment les matières inflammables ou susceptibles de produire des étincelles, spécialement des allumettes ou briquets.

- Il est interdit de faire du feu et de fumer à l'intérieur et aux abords du dépôt.
- Il est interdit de gerber des caisses sur une hauteur de plus de 2 m (les différentes sortes d'explosifs doivent être stockés en tas distincts)
- Les stocks doivent être disposés de façon à utiliser les explosifs et les détonateurs les anciens en premier.
- Un dépôt de détonateur ne peut contenir des mèches de sûreté, cordeaux ou autres artifices de mise à feu qui peuvent par contre être placés dans un dépôt d'explosifs sous réserve qu'ils soient mis dans un compartiment spécial.
- Les caisses d'explosifs doivent être manipulées avec précaution afin d'éviter tout choc.
- Il est interdit d'ouvrir les caisses à l'intérieur du dépôt.
- A la réception d'une livraison, il convient de contrôler la quantité et la qualité des produits livrés.

Transport

Le transport des produits explosifs sur un chantier impose une série de mesures propres à limiter (ou éviter) les effets de toute explosion accidentelle.

En effet il est interdit :

- de transporter des détonateurs ou relais de détonation avec des explosifs dans le même véhicule
- à toute personne qui n'est pas désignée pour ces travaux de prendre place à bord du véhicule ou du convoi
- d'utiliser des véhicules à pièces basculantes : pendant le transport, les produits explosifs ne doivent pas se déplacer de leur support ni être soumis à des chocs ou à des frottements. Un verrouillage mécanique doit interdire tout basculement de support appelé à transporter des produits explosifs.
- il est interdit de fumer pendant la manipulation et le transport des explosifs et engins d'amorçage.
- On ne doit sortir du dépôt que la quantité prévue pour la consommation de la journée ;
- Les explosifs et artifices doivent être tenus éloignés de toute flamme nue, à l'abri des chocs et de toute cause de détérioration.
- Les explosifs doivent être transportés dans leur emballage d'origine (ou un emballage approprié), à l'exception des explosifs réintégrés la veille et qui seront toujours utilisés en priorité.
- les véhicules transportant des produits explosifs doivent être munis si nécessaire (circulation importante) d'une signalisation spéciale.
- La quantité maximale par emballage est de 25 Kg ;
- La quantité maximale pouvant être transportée par camion est de 16 tonnes.

Chapitre 7 : Tir sans explosif

Les risques d'inflammation du grisou et des poussières par l'emploi des explosifs ont incité les chercheurs à mettre au point des procédés dont la mise en œuvre ne présente aucun danger mais dont le principe reste le même. De tous les nouveaux procédés, seul le tir à l'air comprimé ou tir sans explosif a pris un développement important.

Tir à l'air comprimé

Principe : voir exposé

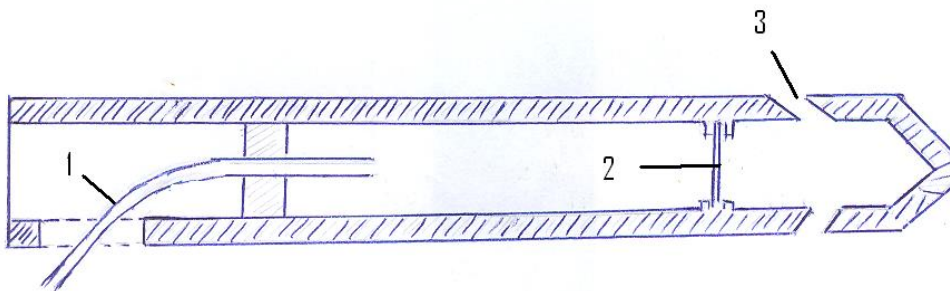


Figure N° : Obus pour tir à l'air comprimé

1 : tube de remplissage ; 2 : plaquette de rupture ; 3 : échappement

Principe : Voir exposé

Pression de l'obus : jusqu'à 800 atm

Résistance du clapet de rupture : 600 à 700 atm

Utilisation : en France courante dans les exploitations de houille de Lorraine, de Blanzky et de Loire.

Caractéristiques de l'obus

- longueur : 1.8 m
- diamètre : 61 mm
- volume : 3.5 litres
- tuyau : en acier mais au fond en cuivre pour des besoins de souplesse
- compresseur au jour

Chapitre 8 : Paramètres des travaux de forage et tir dans les MCO

1. Paramètres du trou

Les trous de mine et les trous profonds peuvent être horizontaux, verticaux ou inclinés. Les principaux paramètres d'un trou sont son diamètre, sa longueur et son inclinaison.

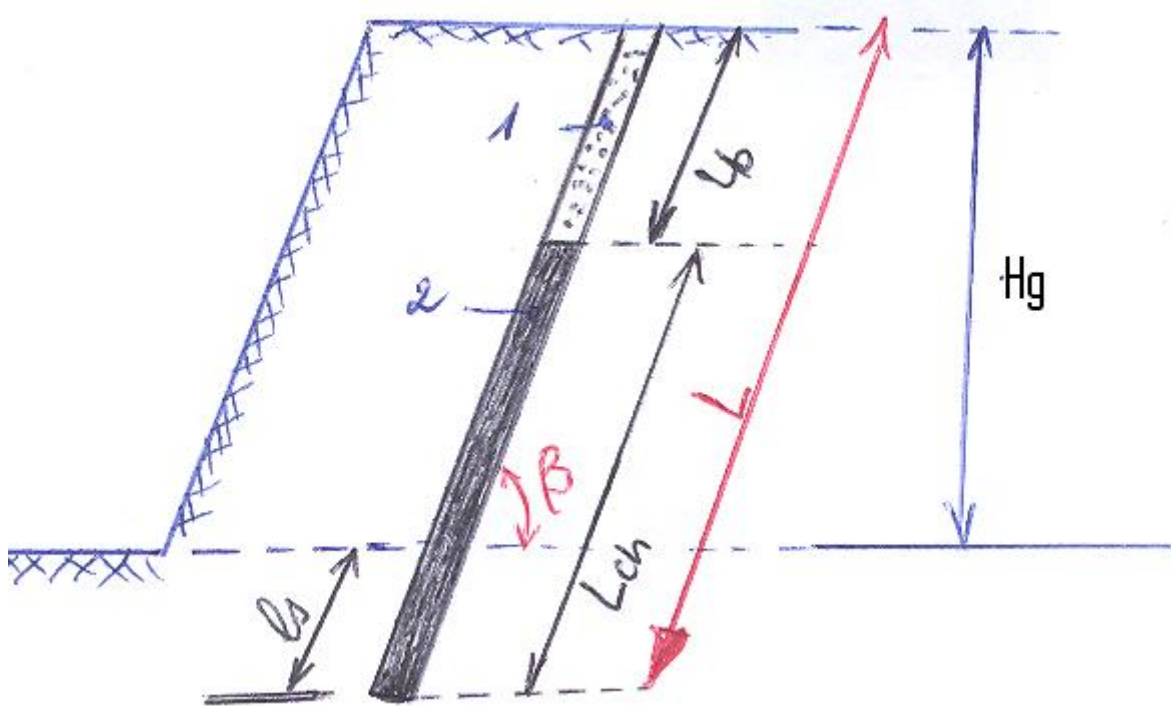


Figure N° : Paramètres d'un trou de mine

1.1 Longueur d'un trou

La longueur d'un trou est donnée par la formule :

$$L = \frac{Hg}{\sin \beta} + Ls$$

Ou: Hg est la hauteur du gradin (m)

β: angle d'inclinaison du trou en °

Is : longueur de sous forage : elle est donnée par la formule : $Ls = n.D$ (m)

Nature de la roche	Roche tendre	Roche mi-dure	Roche dure
n	0.15	0.225	0.3

Ou : n : coefficient qui tient compte des propriétés des roches et de l'inclinaison des trous

D : diamètre du trou en m

Remarque

- en général la longueur de sous forage varie entre 0.5 et 3 m. Elle dépend de la dureté des roches, de la hauteur du gradin, du diamètre du trou, des explosifs utilisés ...
- le sous forage améliore les résultats du tir au niveau de la partie inférieure du gradin facilitant ainsi les travaux de chargement.
- Il est toujours important de respecter les normes recommandées d'un sous forage. Lorsqu'on creuse un sous-forage de longueur égale à $0.3 W$ (avec W la résistance au pied du gradin), on obtient une plate forme horizontale sans formation des rebords. Avec un sous-forage supérieur à $0.3 W$, on assiste à une augmentation de la consommation d'explosifs sans qu'on obtienne des avantages pratiques.

1.2 Inclinaison du trou

Les trous inclinés présentent par rapport aux trous verticaux les avantages ci-après :

- meilleure fragmentation des roches
- élimination des rebords
- amélioration de la sécurité du travail
- meilleure tenue de la surface des gradins

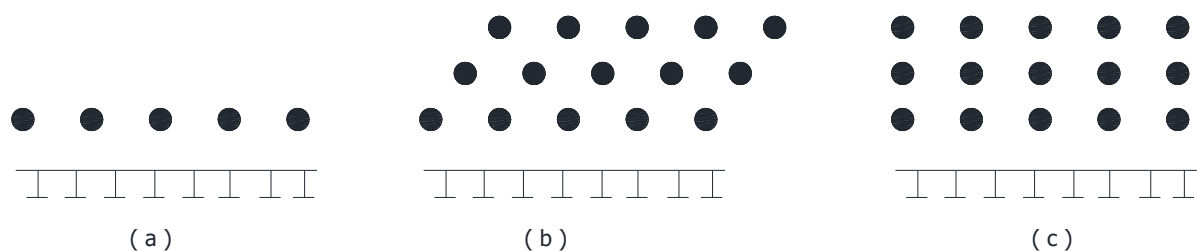
1.3 Diamètre du trou

Le diamètre du trou influe considérablement sur les autres paramètres des travaux de forage et tir :

- Il détermine la quantité d'explosifs par unité de longueur de trou.
- La qualité de la fragmentation des roches diminue avec l'augmentation du diamètre des trous
- Lors des travaux de tir dans les roches à gros blocs ayant une grande résistance au tir, l'action sur le diamètre des trous permet de régler leur fragmentation.

2. Disposition des trous et ordre de tir

Les trous peuvent être disposés suivant une ou plusieurs rangées.



Schémas de disposition des trous.

a : à une seule rangée ; b : à plusieurs rangées en quinconce ; c : à plusieurs rangées en damier

La disposition est caractérisée par :

2.1 La banquette

La banquette est la distance entre l'axe des trous de la première rangée et l'arrête supérieure du gradin. Elle représente également la distance entre les rangées de trous d'une volée de tir.

Pour un tir d'abattage, la banquette se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$B = K_B * D \text{ (en m)}$$

De quoi dépend B ?

K_B est compris entre 30 et 40, il est fonction de la dureté de la roche.

Nature de la roche	Roche tendre	Roche mi-dure	Roche dure
K_B	40	35	30

Source : EPC-France, Maîtrise du minage (Conception et réalisation de plans de tirs)

2.2 L'espacement

C'est la distance en mètre entre deux trous de mine adjacents dans une même rangée.

Pour un tir d'abattage, l'espacement est défini par la relation suivante :

$$B < E < K_e * B \text{ (en m)}$$

(2) De quoi dépend E ?

K_e = 1.3 pour les roches tendres
 = 1.15 pour les roches mi-dures
 = 1 pour les roches dures

2.3 La maille

C'est le produit Banquette x Espacement

2.4 Ordre de tir

Il peut être :

- instantané
- à court retard

L'amorçage instantané facile à réaliser correctement présente une grande sécurité contre les ratés de tir. On lui reproche d'ébranler sérieusement les terrains avoisinant et de fractionner insuffisamment les roches.

L'introduction du tir à micro-retard a contribué dans des larges limites au perfectionnement de l'abattage des roches à l'explosif. Lorsqu'il est correctement réalisé, il offre la possibilité:

- de régler la qualité de la fragmentation des roches tout en maintenant la sécurité des travaux de forage et de tir à un niveau appréciable.
- de diminuer de façon certaine l'ébranlement des terrains avoisinants.

3. Consommation Spécifique d'explosif

Le degré de fragmentation des roches lors de l'abattage à l'explosif dépend en grande partie des propriétés physiques et mécaniques des roches et des paramètres des travaux de tir.

La résistance au tir est caractérisée par la consommation spécifique/ratio/facteur poudre (q) d'explosif.

On appelle consommation spécifique (q) d'explosif, la quantité d'explosifs nécessaire pour l'abattage d'1 mètre cube de roche (ou 1 tonne) suivant une loi de fragmentation régie par plusieurs facteurs caractérisant la roche et l'explosif.

Le degré de fragmentation (n) est défini comme étant le rapport entre la dimension linéaire moyenne du bloc naturel en massif (l_m) et celle du morceau de la roche fragmentée (dm).

$$n = l_m / dm$$

Expérimentalement la valeur de n varie en général de 1 à 5 et rarement plus.

Le calcul approximatif de la consommation spécifique de l'explosif tient compte des paramètres suivants:

- Pour qu'une charge d'explosif fragmente un bloc de roche, il faut que l'énergie de la charge dépasse les résistances à la compression σ_{comp} au déplacement σ_d et à la traction σ_t de la roche et surmonte l'effet de la pesanteur. La consommation spécifique est donc proportionnelle à la somme des valeurs des résistances mécaniques des roches et à leur masse volumique :

$$q = f_1(\sigma_{comp}, \sigma_d, \sigma_t) \text{ et } q = f_2(\gamma)$$

- Du nombre des surfaces dégagées: les surfaces dégagées permettent la réflexion de l'onde de choc. Lors de l'explosion, les contraintes de compression au sein du bloc se reconvertissent dans les surfaces libres en traction facilitant ainsi la destruction de la roche.

$$q = f_3(N_{sd})$$

- Du degré de fragmentation (n). Son importance dans un massif de roche non fissuré entraîne la croissance proportionnelle de la consommation spécifique.

$$q = f_4(n)$$

La consommation spécifique est donc proportionnelle à la consommation spécifique étalon.

Le tir étalon consiste à fragmenter un bloc monolithe ayant 6 surfaces dégagées. Ce cube est librement suspendu et la charge de l'explosif étalon est placée dans le centre de ce cube. Le degré de fragmentation considéré pendant les essais est égal à 2.

La consommation spécifique étalon est donnée par la formule :

$$q_{ét} = 0.02 (\sigma_{comp} + \sigma_d + \sigma_t) + 2. \gamma \quad g/m^3$$

Ou : γ est la masse volumique de la roche exprimée en kgf/dm^3 .

En ex URSS les essais à l'explosif Ammonite N°6GV ont donné les résultats suivants :

Nature e la roche	$q_{ét}$ en g/m^3	catégories	Dureté (Protodiakonov)
Tirabilité facile	≤ 10	1, 2, 3, 4, 5	0 à 4

Moyenne	10.1-20	6, 7, 8, 9, 10	5 à 8
Difficile	20.1 – 30	11, 12, 13, 14, 15	9 à 12
Très difficile	30.1 – 40	16, 17, 18, 19, 20	13 à 16
Exclusivement difficile	40.1- 50	21, 22, 23, 24, 25	17 à 20

Dans la pratique, on détermine la consommation spécifique de l'explosif sur la base de la consommation spécifique étalon tout en tenant compte de la nature de l'explosif à utiliser, de la fissurité du massif, du degré de fragmentation recherché, de la qualité de la charge, du nombre de surfaces dégagées...

La formule empirique utilisée pour le calcul de la consommation spécifique de projet est:

$$qp = q_{\text{ét}} \cdot K_{\text{ex}} \cdot K_{\text{f}} \cdot K_{\text{sd}} \cdot K_{\text{c}} \cdot K_{\text{v}} \cdot K_{\text{d}}$$

Ou: $q_{\text{ét}}$: consommation spécifique étalon

K_{f} : coefficient de fissurité de la roche = $1.2 \cdot L_m + 0.2$

L_m étant la dimension moyenne du bloc en mètre dans le massif.

K_{d} : coefficient qui tient compte du degré de fragmentation nécessaire: = $0.5/d_m$ avec d_m dimension moyenne des morceaux de la roche fragmentée (m)

K_{c} est le coefficient qui tient compte du degré de concentration réelle de la charge.

Diamètre des trous (mm)	200	100			300		
Nature de la roche		Tirabilité facile	T. moyenne	T.difficile	T. facile	T. moyenne	T.difficile
K_{c}	1	0.95-1	0.85-0.9	0.7-0.8	1.05-1.1	1.2-1.25	1.3-1.4

K_{v} : coefficient qui tient compte de l'influence du volume de la roche fragmentée:

Pour les gradins de 15-18 m: $K_{\text{v}} = \sqrt[3]{15/H_g}$

Pour les gradins de hauteur supérieure: $K_{\text{v}} = \sqrt[3]{H_g/15}$

Avec H_g : hauteur du gradin en m

K_{sd} : coefficient qui tient compte du nombre de surfaces dégagées du massif à tirer

Nombre de surfaces dégagées	1	2	3	4	5	6
K_{sd}	10	8	6	4	2	1

Remarque:

- Les données du tableau des paramètres des travaux de forage et tir concernant l'explosif étalon utilisé en ex URSS, l'ammonite N°6GV (dont l'aptitude au travail est $360-380 \text{ cm}^3$). Pour un autre explosif, la consommation spécifique est calculée à l'aide de la formule :

$$q' = q \cdot K_{\text{ex}}$$

Avec : q : consommation spécifique de l'explosif étalon

K_{ex} : coefficient de conversion. $K_{\text{ex}} = \Delta \text{ét} / \Delta u$

Application 1 : soit la consommation spécifique étalon d'un massif dure $q_{\text{ét}} = 40 \text{ g/m}^3$ et l'aptitude au travail de l'explosif étalon soit pris égal à 360 cm^3 .
Calculer la consommation spécifique étalon d'explosif granulite dans les mêmes conditions de tir, sachant que son aptitude au travail est 320 cm^3 et celle de l'explosif ammonite des roches N°1, dont l'aptitude au travail est 450 cm^3 .

Application 2

Calculez la consommation spécifique d'explosif du projet pour l'abattage d'un massif rocheux avec les données de départ suivantes:

- dimension moyenne des blocs dans le massif: 0.6 m
- nombre de surfaces dégagées: 3
- hauteur des gradins 20 m
- type de l'explosif à utiliser: ammonite N°1 avec $\Delta u = 450 \text{ cm}^3$
- le degré de fragmentation voulu est: 4
- Diamètre des trous proposés: 200 mm
- dureté de la roche à abattre : 12 à l'échelle de Protodiakonov

Quelle serait l'ordre de grandeur de la dimension moyenne des roches abattues?

Rq : Au cours des travaux miniers, on calcule la consommation possible d'explosifs à l'aide de la consommation spécifique réelle (q_r) de l'explosif calculée à l'aide des procédés expérimentaux. (q_r est le rapport de la masse d'explosifs utilisés au volume des roches abattues)

4. Quantité des charges d'un trou

$$Q_{ch} = E \times B \times H_g \times q \quad (\text{kg})$$

H_g : hauteur du gradin en m

E : Espacement (m)

B : banquette (m)

q : consommation spécifique d'explosifs

5. Longueur des charges d'un trou

$$L_{ch} = Q_{ch}/P \quad (\text{m})$$

où : P est la charge linéaire des trous : $P = 0.785.D^2.\Delta$ (kg/m)

D : diamètre des trous pour les explosifs en vrac ; diamètre des cartouches pour les explosifs en cartouche.

6. Bourrage

Le bourrage est destiné à maintenir le confinement d'énergie dans le trou afin que la charge explosive achève au mieux le travail de fragmentation. Le bourrage est un élément essentiel pour la qualité d'un tir.

Un tir réalisé sans bourrage s'accompagne par des projections violentes des blocs de roche.

NB : la longueur d'un bourrage doit être minimale et suffisante

- le bourrage est obligatoire
- dans l'abattage par tranches à l'aide de mines verticales, il est généralement admis une hauteur de bourrage égale :
 - à l'épaisseur de la tranche à abattre en amorçage antérieur ou latéral descendant,
 - à la moitié de l'épaisseur de la tranche à abattre en amorçage postérieur ou latéral remontant.
- une longueur excessive du bourrage entraîne une augmentation de la zone de fragmentation non réglée et donc l'accroissement du taux des blocs hors gabarits
- les longueurs des bourrages sont plus grandes lorsque le tir concerne des roches de faible résistance au tir.
- La nature des matériaux de bourrage a une influence sur la fragmentation. L'expérience a montré que les bourrages réalisés à l'aide des produits de foration donnent des mauvais résultats (projection et débouillage importants au moment du tir), tandis que ceux fait à l'aide des gravillons 4 – 6 mm permettent une meilleure utilisation de l'énergie explosive. Des études préalables ont montrées que le meilleur matériau pour le bourrage est le granulat angulaire sec (< 30 mm). En effet, il a tendance à former un arc de compactage, qui ferme les parois du trou, augmentant sa résistance à l'éjection.
- On prend toujours des précautions spéciales au cours d'un bourrage pour éviter de couper les fils de l'amorce ou endommager le cordeau.

On distingue le bourrage de bouchon et le bourrage intermédiaire :

Longueur du bourrage total : $L_b = L - l_{ch}$ (m)

Où : L_b : longueur du bourrage

L = longueur du trou

l_{ch} : longueur de la charge

Longueur du bourrage de bouchon : $l_{bb} = (20-30).D$ (m)

D étant le diamètre du trou

Remarque : si $l_b > l_{bb}$; on emploie la charge discontinue

Longueur du bourrage intermédiaire : $l_{bi} = l_b - l_{bb}$

Longueur de la charge principale lors de la structure discontinue

$L_{chp} = 1.2.W$

Nature de la roche	Roche tendre	Roche mi-dure	Roche dure
Lb	30	25	20

Source : EPC-France, Maîtrise du minage (Conception et réalisation de plans de tirs)

7. Volume du bloc à tirer

Il dépend :

- de la productivité de la carrière

- des paramètres des équipements miniers
- de la périodicité des tirs

$$(1) \quad Vb = Hg.A.Lb \quad (m^3)$$

A : largeur du bloc (m)

A = W pour les tirs à une seule rangée

A = W + (n- 1) b pour les tirs à n rangées ; en général n = 2 – 5

$$(2) \quad Vb = Nj.Npe.Re \quad (m^3)$$

Nj : intervalle en jours entre deux tirs successifs

Npe : nombre de postes de travail de l'excavateur dans le jour

Re : rendement de l'excavateur

8. Longueur d'un bloc

$$Lb = Qj.Nj/Hg.A.Kf$$

Qj : productivité de l'excavateur en m³ /jour

Kf : coefficient de foisonnement

Nj : nombre de jours entre les tirs de sondages dans un bloc

9. Nombre de sondage dans un bloc à tirer

Le nombre de trous est donné par la formule : $n = A.Lb/ExB$

10. Paramètres du tas des roches abattues

Le tas des roches abattues est caractérisée par les paramètres suivants : forme, hauteur et largeur. Ces paramètres sont fonction des propriétés physico-mécaniques des roches, de la quantité et nature des explosifs, de la disposition des charges et de l'ordre de mise à feu des charges.

11. Longueur totale des trous forés nécessaires pour le tir d'un bloc :

$\sum L = N. L$ avec N= nombre total des trous et L : profondeur d'un trou

12. Nombre nécessaire de sondeuses pour desservir un seul engin d'extraction

$$Ns = \sum L/Rs.nps.Nj$$

Ou : Rs est le rendement de la sondeuse

Nps : nombre de postes de travail par jour de la sondeuse

13. Intervalle de retard d'un détonateur

$$T = K.W \quad (ms)$$

Avec : W : ligne de résistance au pied (m)

K : coefficient qui tient compte des propriétés des roches (ms/m)

Nature de la roche	Faible résistance au tir	Moyenne résistance au tir	Grande résistance au tir
Valeur de K	5 - 6	3 – 4	1.5 – 2.5

14. Rayon de la zone sismique

- pour les tirs instantanés : $Rs = 25 \sqrt{Qtot}$

- pour les tirs à retard : $R_s = 29 \sqrt{Q_{tot}/N}$
où : Q_{tot} est la quantité de la charge totale d'explosifs à tirer en kg
N : nombre de détonations

15. Diamètre optimal des morceaux (blocs) après le tir

$$d_m = L/6.5 \text{ ou } d_m = 170^3 \sqrt{E} \quad (\text{mm})$$

avec : L : largeur du godet de l'excavateur (mm)
E : capacité du godet (m³)

16. Dimension maximale des blocs après le tir

$$D_{max} = 800^3 \sqrt{E} \quad (\text{mm})$$

$$D_{max} = 500^3 \sqrt{V} \quad (\text{mm})$$

$$D_{max} = 0.5 B + 100 \quad (\text{mm})$$

V est la capacité de la benne du véhicule (m³)

17. Longueur de sous forage en fonction de l'angle d'inclinaison des trous

$$L_s = R.W \quad (\text{m})$$

$$L_s = (10-15)D \quad (\text{m})$$

Inclinaison des trous	90	85	80	75	70	60
Valeur de R	0.3	0.2	0.14	0.08	0.06	0.03

18. Volume des roches abattues par un trou

$$V_t = E \times B \times H_g \quad (\text{m}^3)$$

19. Nombre des trous d'un tir à une rangée (par volée)

$$N_{tr} = V_b/V_t$$

20. Plan d'un tir

C'est un document obligatoire, qui synthétise les données techniques et le mode opératoire pour le chargement d'un tir.

Sur un plan de tir, doit figurer les données suivantes :

- l'emplacement du pas de tir ;
- l'emplacement des mines à charger ;
- leur nombre ;
- le mode d'amorçage ;
- la profondeur des trous ;
- le diamètre des trous ;
- l'inclinaison des trous ;
- la maille ;
- le nombre de rangées ;
- la séquence d'amorçage ;
- la hauteur du bourrage ;
- la quantité d'explosif par trou ;

- la quantité totale d'explosif nécessaire ;
- les types des détonateurs
-

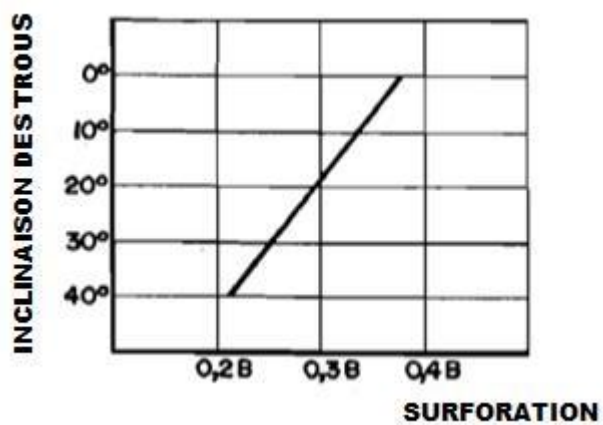
21. Autres méthodes de calcul des paramètres des travaux de forage et tir en MCO : Formules de Langefors et Yannick Bleuzen

Paramètres	Unité	Formules de Langefors	Formules de Yannick Bleuzen
Banquette B	m	$B = K \cdot D$; K (35 ÷ 45)	$B = 40 \cdot D$
Espacement S	m	$S = 1,25 \cdot B$	$S = 1,2 \cdot B$
Surforation l_s	m	$0,3 \cdot B$	$l_s = 0,15 \cdot B$
Bourrage l_b	m	$l_b = B$	$l_b = 20 \cdot D$; cas de l'amorçage ponctuel
Longueur à forer L	m	$L = \frac{H}{\cos(I)} + l_s$	
Quantité d'explosif Q	Kg	$Q = \left[\left(\pi \cdot \frac{D^2}{4} \right) \cdot l_s \cdot l_b \right]$	
Volume	m ³	$V = B \cdot S \cdot L$	
Consommation spécifique C_s	g/m ³	$C_s = \frac{Q}{V}$	

- Le rapport H/B (Stiffness ratio) est un facteur qui a une certaine influence sur la fragmentation, les vibrations, les projections et les nuisances sonores générées par les tirs, comme l'illustre le tableau suivant :

Hg/B	1	2	3	Sup 4
Fragmentation	Faible	Moyen	Bon	Excellent
Bruit	Sévère	Moyen	Bon	Excellent
Projection	Sévère	Moyen	Bon	Excellent

Vibration	Sévère	Moyen	Bon	Excellent
-----------	--------	-------	-----	-----------



Chapitre 9 : Mode d'action des explosifs

Le processus de la fracturation à l'explosif repose sur l'action combinée de l'onde de choc et des gaz d'explosion. La détonation n'est pas un phénomène instantané, les deux étapes qui la constituent ont des durées très différentes : le phénomène de l'onde de choc est très court par rapport à l'action des gaz. Bien que ces phénomènes ne soient pas totalement indépendants, on peut présenter leur action par deux phases successives, comme l'illustre la figure ci dessous.

Une phase dynamique, durant laquelle on peut distinguer différents phénomènes, relatifs à différentes zones du massif rocheux :

- l'onde de choc génère, tout d'abord, dans un régime que l'on peut supposer hydrodynamique, une onde de compression, qui va engendrer des contraintes supérieures à la résistance en compression de la roche. Cet état de contrainte va donc broyer la roche en fines particules, dans une zone autour du trou désignée par « zone de broyage ». La décroissance de ces contraintes est cependant très rapide : à courte distance (3 à 5 fois le rayon de la cartouche r_c), les contraintes sont inférieures à la résistance en compression ;
- On observe ensuite la création de fissures radiales : l'onde de choc perd en intensité, mais les contraintes tangentielles qu'elle crée sont encore suffisantes pour fracturer la roche via des contraintes tangentielles de traction. Malgré une décroissance en $1/r^3$ dans la zone de broyage et en $1/r^2$ par la suite, les contraintes demeurent supérieures à la résistance en traction de la roche, dans une zone appelée zone transitoire (entre 20 et 50 r_c). Au-delà de cette zone, aucune fissuration microscopique marquante n'apparaît : c'est la zone sismique. L'onde contribue à affaiblir le massif, sans pour autant mettre en cause sa structure globale par des pré-fissurations.
- le dernier phénomène de la phase dynamique fait intervenir les ondes de traction: en effet, les ondes de choc initialement créées vont rencontrer des surfaces libres (typiquement, le front à abattre ou les discontinuités du massif) sur lesquelles elles vont se scinder en une onde transmise et une onde réfléchie. La répartition entre les énergies transmises et réfléchies dépend du rapport des impédances des deux milieux. Dans le cas d'une interface roche-air, cette réflexion est presque totale. L'onde de compression initiale se réfléchit en une onde de traction. Cette onde réfléchie engendre dans le massif rocheux des contraintes de traction, qui vont dépasser les caractéristiques mécaniques de la roche et provoquer une fissuration appelée écaillage, dans une zone proche de l'interface. De plus, les ondes réfléchies, en se propageant, vont réinitialiser les fissures créées par la première phase ;
- une phase quasi statique, qui est la dernière étape de l'abattage à l'explosif: les ondes de contraintes ont joué leur rôle, fissurant ou affaiblissant le massif, les gaz d'explosion emprisonnés vont pouvoir se détendre, poursuivant leur propagation et leur action. Ils filtrent dans les discontinuités, participant éventuellement à la fissuration, et mettant surtout l'ensemble en mouvement ;

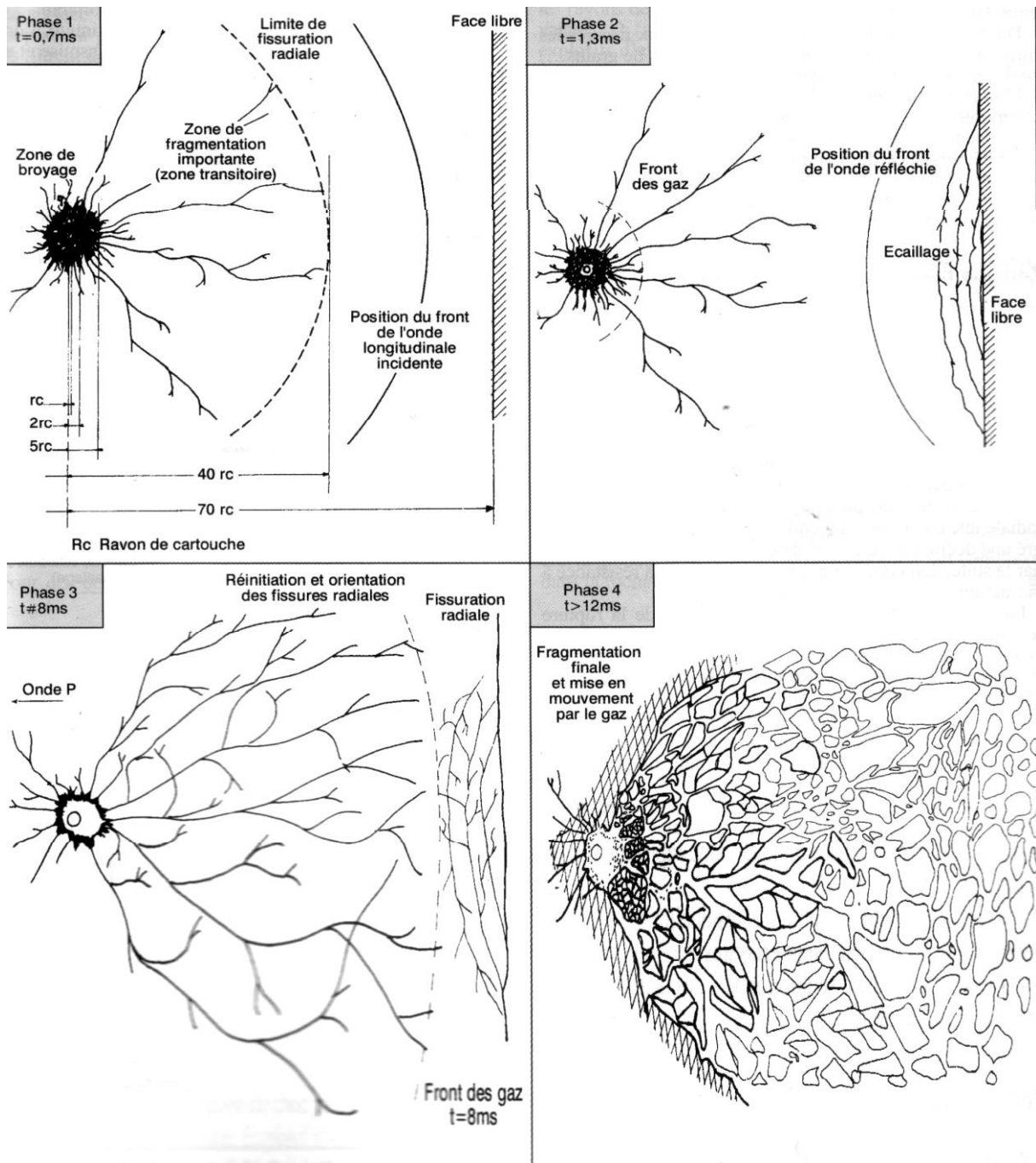


Figure : Différentes phases de fragmentation à l'explosif

Chapitre 10 : Tirs spéciaux

1. Notions

L'abattage à l'explosif provoque des effets souvent néfastes surtout si la charge a été exagérément calculée. On distingue deux conséquences majeures :

- l'effet avant : il y'a projections horizontales très importantes des roches abattues
- l'effet arrière : la roche demeurée en place est affectée (par des lithoclasses) au point de compromettre le bon déroulement des travaux d'abattage futurs.

2. tir amorti

Principe : voir exposé

Résultats d'essais dans un milieu calcaire

- si l'épaisseur du tas des roches laissées en place (b) est inférieure à W ; il en résulte encore des résidus de projection
- si $b > W$; la projection horizontale des blocs est totalement éliminée

NB : la densité des roches laissées sur place doit avoir une influence sur la valeur de b. les relations précédentes restent donc à vérifier pour un milieu différent.

Remarque :

Les projections violentes sont dues à un excès de consommation d'explosif et d'une longueur W insuffisante. Elles peuvent aussi survenir si les lithoclasses partent de la face libre (talus)

Remèdes :

- adoption des valeurs optimales de q et W
- tir amorti

Valeur de b

Certains ouvrages soviétiques proposent de définir la valeur de b suivant la formule ci-après :

$$b = K_f \cdot W (\sqrt{2q \cdot \eta \cdot E_o \cdot E / \delta} - 1)$$

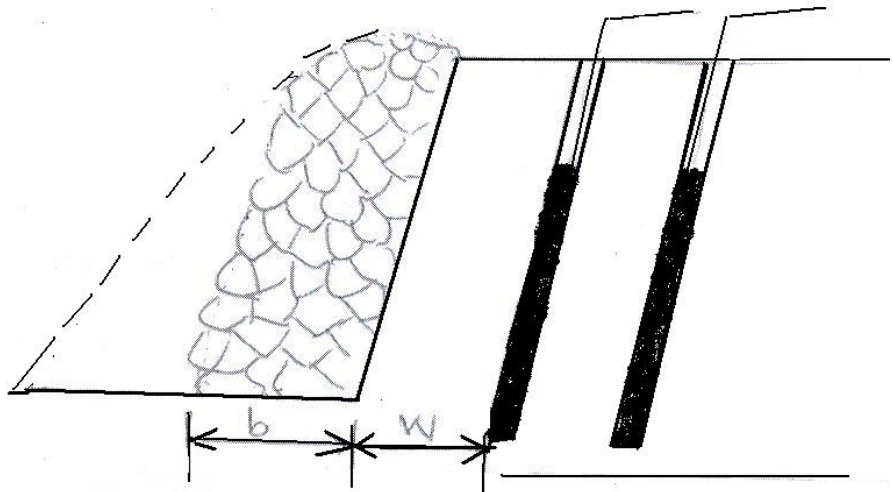
ou : K_f : coefficient de foisonnement

η : coefficient d'utilisation de l'énergie du tir pour la fragmentation et le déplacement des roches

E_o : énergie spécifique par kg d'explosif (kg.m/kg)

E : module d'élasticité des roches, Kg/ m²

δ : résistance du massif Kg/ m²



Tir amorti

3. Prédécoupage (présplitting)

Le prédécoupage est une technique de tir qui a pour but de minimiser le plus possible les dommages causés à la paroi (talus) par un abattage excessif. Cette méthode consiste à créer une fissure dans le massif dans le plan du futur talus avant toute action d'abattage.

Principe du prédécoupage :

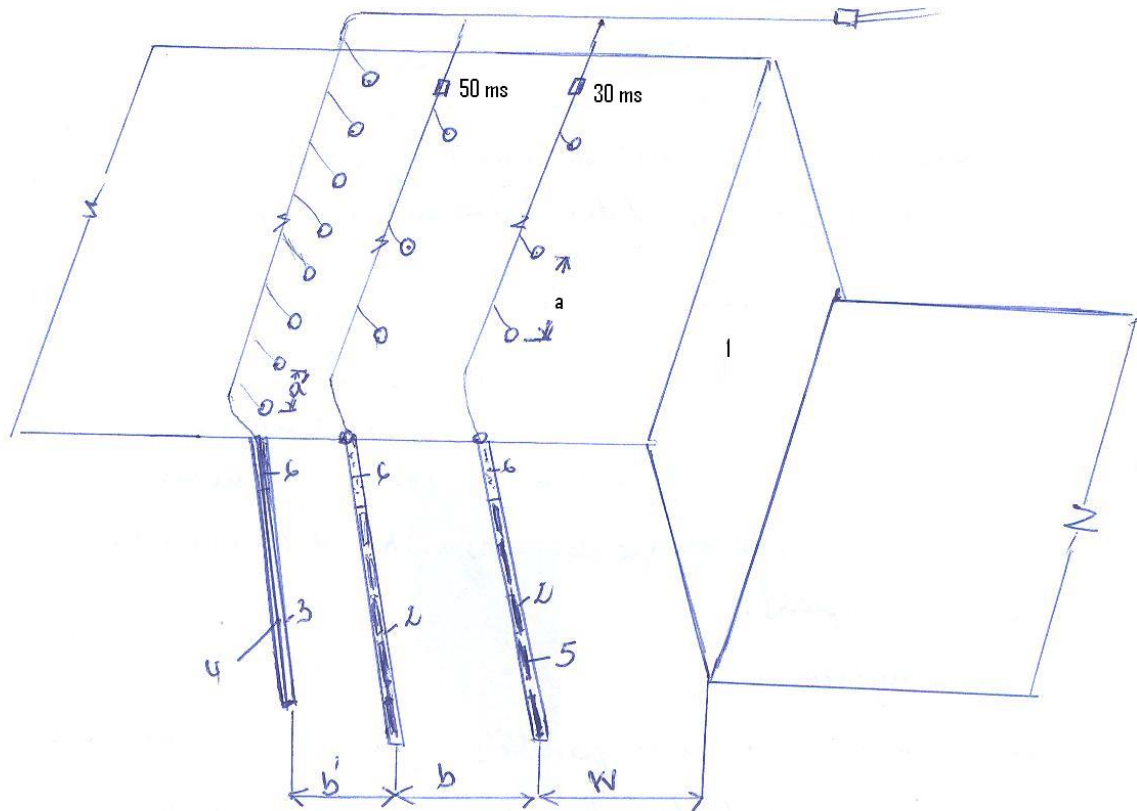
- réalisation des trous de réglage préalable du profil (ils sont tirés avant les trous d'abattage et ont pour effet de couper la roche suivant le plan des trous sans effet arrière, ni déplacement notable des terrains)
- les trous de prédécoupage sont rapprochés et ne comportent qu'une faible quantité d'explosifs

Exigences :

- les forages doivent être parallèles, équidistants et coplanaires
- la distance entre les trous de prédécoupage est environ 10 fois leur diamètre : $d_{tp} = 10D$
- le chargement est souvent effectué au cordeau de 40 à 70 g de pétrite au mètre.

NB : les variations sont possibles en fonction du type d'explosif utilisé : l'utilisation des boudins continus de gel donne des résultats satisfaisants.

- le bourrage doit être réalisé avec un matériau non compressible : graviers de granulométrie : 4-6 mm.
- Mise à feu des trous de prédécoupage simultanée.



Tir avec prédécoupage

- 1 : talus du gradin
- 2 : trous d'abattage
- 3 : trous de profil (prédécoupage)
- 4 : cordeau détonant (40 -70g/m)
- 5 : charge d'explosif
- 6 : bourrage

4. Post abattage ou abattage différé

Le but est le même que celui du prédécoupage. Le principe est le même mais le tir des trous de la dernière rangée se fait après le tir des trous d'abattage.

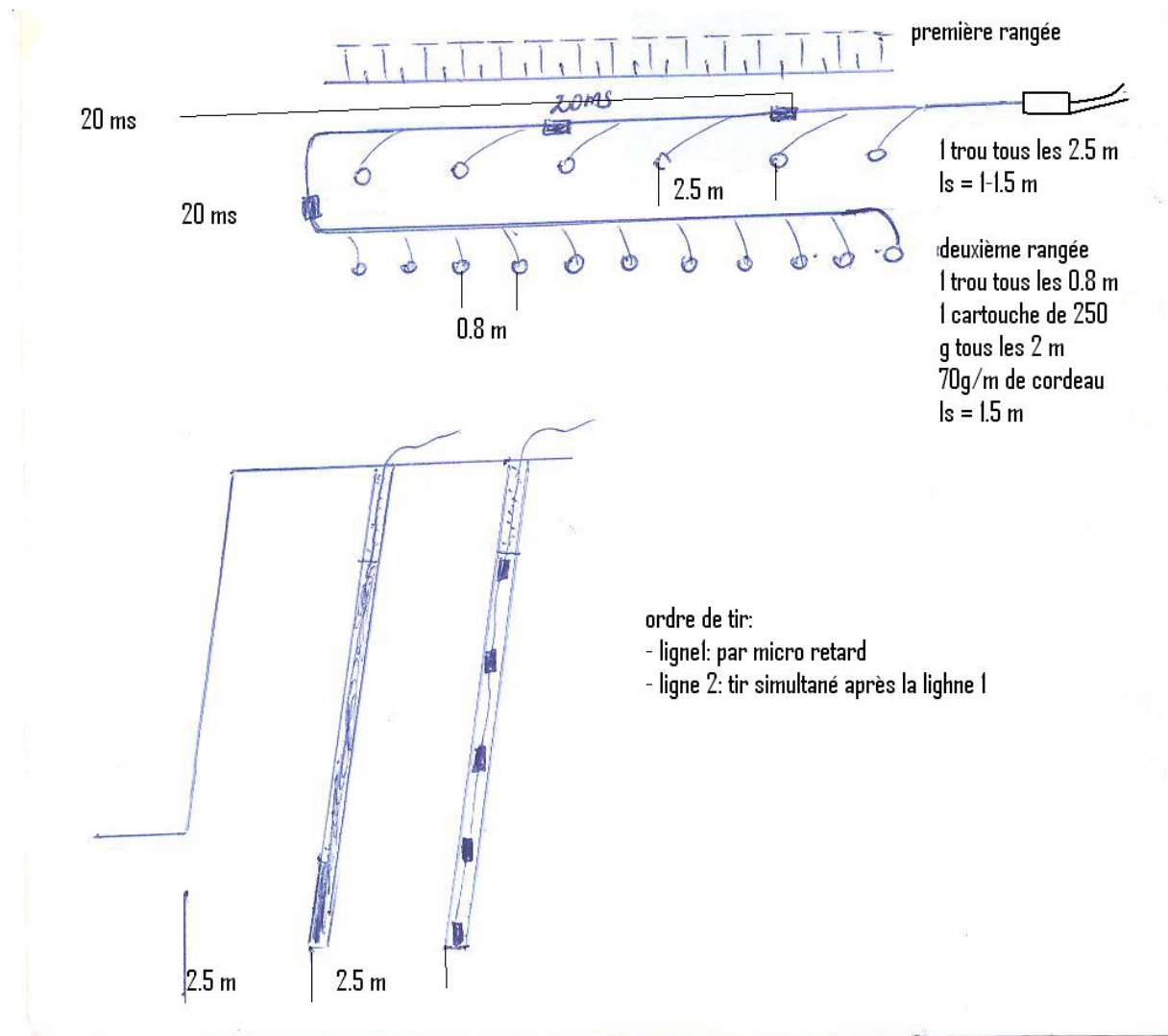
Quelques règles d'utilisation de l'abattage différé :

- espacement réduit des trous de la dernière rangée
- espacement des trous inférieur à l'épaisseur de la tranche à abattre
- la paroi libre doit être dégagée
- l'épaisseur de la tranche à abattre doit être constante

L'utilisation des micros - retards peut permettre l'abattage sur plusieurs volées.

Exigences à un bon résultat :

- bonne précision de foration et réalisation des trous parfaitement parallèles et coplanaires
- l'abattage d'une volée (s) ne doit pas endommager la paroi



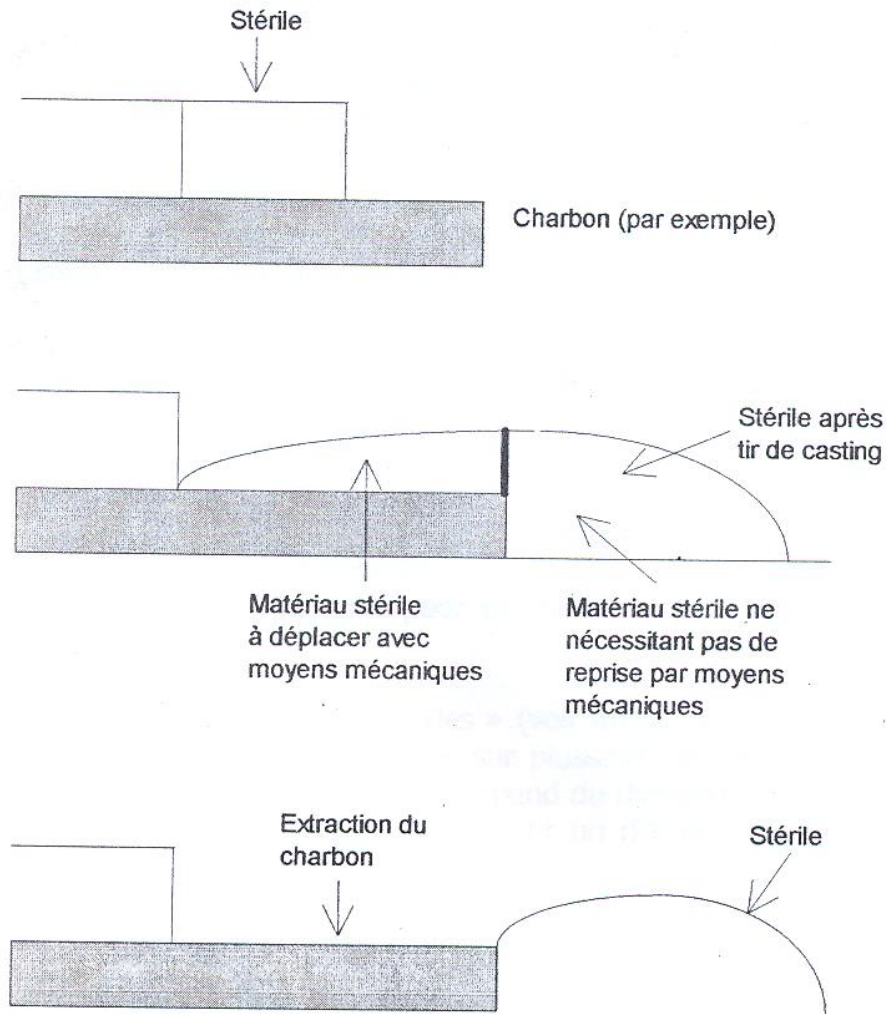
Post- abattage ou abattage différé

5. les tirs de projections ou tirs de casting

5.1 Principe général et raisons d'un tir de projection

Le tir de casting consiste à utiliser l'énergie de l'explosif pour non seulement fragmenter le matériau, mais également le déplacer le plus loin possible du front de taille.

Ce type de tir est mis en œuvre en tant que méthode d'exploitation sur certaines grandes mines à ciel ouvert, en général de charbon : il permet de déplacer la couche de stérile située au dessus de la couche de charbon avec une intervention minimum des engins mécaniques. Le surcoût lié au minage est aisément compensé par le gain de productivité pour le transport et l'évacuation des stériles.



Remarque :

Les tirs de casting peuvent être mis en œuvre ponctuellement sur tout type d'exploitation dans le but :

- d'améliorer le rendement des engins mécaniques en fournissant un résultat de tir plus étalé avec une granulométrie plus fine qu'un tir d'abattage classique.
- Ou lorsque le travail des engins mécaniques est impossible au pied du front de taille miné et nécessite le déplacement des matériaux à distance du front de taille.

5.2 Principes Généraux

Deux principes généraux guident le calcul des plans des tirs pour les tirs de projection :

- la consommation spécifique d'explosif est élevée : de 700 g/m^3 à 2 kg/m^3 ce qui a pour conséquence :

- les mailles ainsi obtenues sont plus faibles que les mailles pratiquées habituellement
- le trou de mine est complètement chargé d'explosif avec une hauteur de bourrage réduite (20. D)

- l'amorçage postérieur est obligatoirement pour conserver la faible hauteur de bourrage
- l'explosif employé devra avoir une énergie de gaz élevée type nitrate aluminisé ou émulsion vrac, amorcé par un explosif puissant type dynamite booster.

- **le temps d'initiation entre rangées est plus long** que les temps pratiqués usuellement pour les tirs d'abattage classiques

Type de tir	Temps d'initiation
Tir d'abattage	10 x banquette < temps en ms < 30 x banquette
Tir de projection	30 x banquette < temps en ms < 60 x banquette

Remarque :

- il est nécessaire que le temps d'initiation soit long pour permettre le déplacement des matériaux des rangées précédentes.
- Les tirs de projection sont réalisés sur plusieurs rangées (trois au minimum)
- L'épaisseur maximale de matériaux pouvant être traitée dépend du diamètre de foration et varie entre 25 m (pour un diamètre de 89 mm) à 60 mètres (pour un diamètre de 400 mm).

5.3 Paramètres techniques et spécifiques

les paramètres conduisant à l'élaboration d'un tir de projection s'orientent suivant trois axes :

- l'énergie à mettre en œuvre
- la séquence de mise à feu
- la quantité de matériau à déplacer

NB : toute conception qui s'intéresse à un ou deux de ces paramètres a peu de chance d'aboutir au succès escompté.

5.3.1 L'énergie explosive

La part de matériau transporté croît avec la charge spécifique d'explosif.

Résultats sur une hauteur constante de 23 mètres, une épaisseur de charbon de 7 mètres et une fosse d'accueil de 50 mètres :

- Pour une charge spécifique de 250 à 400 g/ m³, on assiste à une fragmentation du matériau avec un déplacement qui varie de 0 à 12%.
- Pour 450 à 600g/ m³, le déplacement est de 20 à 35%.
- De 650 à 800g/ m³, le déplacement varie de 42 à 46%
- Pour des charges de 850 à 1000g/ m³, on obtient un déplacement sans reprise à l'aide des moyens mécaniques de 47 à 50% des matériaux minés.

5.3.2 Séquence de mise à feu

❖ Séquence de mise à feu entre rangées

Un temps court entre la détonation des trous de rangées successives peut avoir un effet négatif sur le résultat final. Des temps courts peuvent causer des effets arrières en aval de la ligne de découpage, créant ainsi un front irrégulier pour le tir suivant.

Généralement ce temps augmente avec la largeur de banquette à abattre. Ce temps est compris en fonction de l'épaisseur de la banquette, de l'énergie explosive injectée et de la réponse du matériau, entre 25 et 100 ms.

Les objectifs étant de déplacer les matériaux de plusieurs dizaines de mètres en tenant compte d'un foisonnement raisonnable des dernières rangées, un temps entre

rangée de 30 à 60 fois la banquette d'initiation est à prendre en compte. Ce temps pourra aller crescendo vers les dernières rangées.

❖ **Séquence de mise à feu entre trous de la même rangée**

Pour obtenir un résultat optimal, les trous d'une même rangée doivent être tirés dans un intervalle de temps réduit (entre 5 et 25 ms).

Il a été démontré que des délais inférieurs n'ont pratiquement aucun effet. Des délais supérieurs à 25 ms pourraient créer par contre des surfaces libres intermédiaires pouvant s'apparenter à un tir d'abattage classique. Ceci fait perdre une partie d'énergie nécessaire au mouvement des matériaux au profit d'une énergie latérale néfaste pour le tir de projection.

Remarque : aujourd'hui seul un amorçage par détonateurs électroniques ou non électriques avec un des raccords de 17 ms permet d'assurer un délai réduit entre toutes les charges d'une même rangée.

6. Autres paramètres qui influencent le pourcentage des matériaux déplacés :

❖ **Le ratio Hauteur de front/Largeur de la tranche de réception**

La distance de projection est proportionnelle à la hauteur du front.

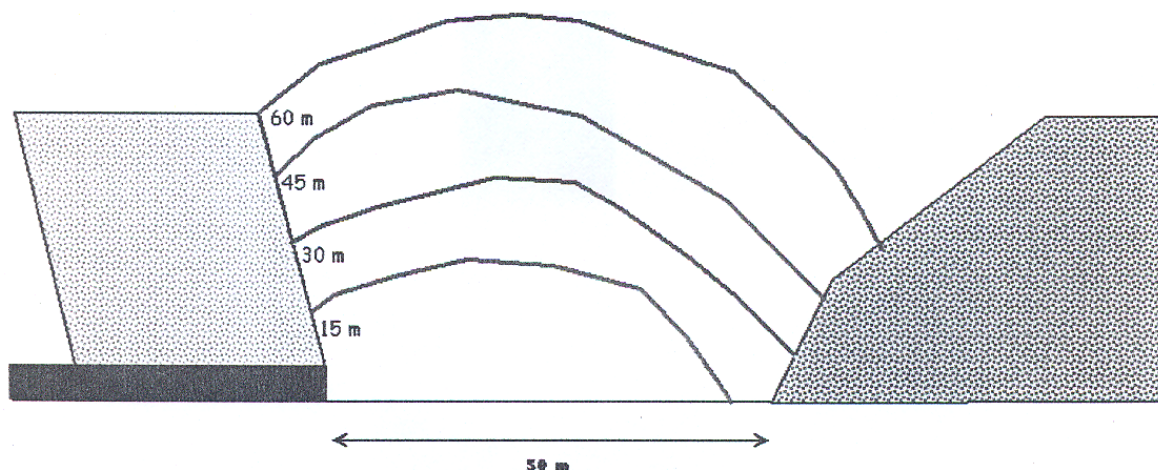


figure : influence de la hauteur de front sur la distance de projection

la formule de FR. CHIAPETTA permet de prédire la distance de projection

$$D = Vo \cos \theta [(Vo \sin \theta + \sqrt{(Vo \sin \theta)^2 + 2gH}) / g]$$

Avec: D : distance de projection en mètres

Vo : vitesse de la banquette d'initiation en m/s

θ : angle d'éjection en °

H : hauteur du front de taille en m

g : accélération due à la gravité en m/S²

remarque :

- l'énergie spécifique à injecter dans le massif est d'autant plus grande que le front est petit : il n'est pas rare de rencontrer des charges spécifiques de 800 à 1100 g/m³

pour des fronts de 12 à 18 mètres. Une hauteur de 20 mètres apparaît donc comme étant un minimum pour concilier un résultat technique satisfaisant et un gain des coûts de production. En deçà de 20 mètres, l'augmentation de la charge spécifique fait perdre une partie des avantages du tir de projection due à l'augmentation des coûts d'explosif

Résultats d'essais sur pour une charge spécifique de 900 g/m³ et une tranchée de réception de 50 mètres.

Pour des ratios Hauteur de front/largeur de la tranchée de réception de :

- 2 le déplacement est de l'ordre de 47 %
- 1.25, le déplacement est de l'ordre de 60%
- 1, le déplacement atteint 63%.
- 3, le déplacement est < à 30%

❖ **Diamètre de Foration**

Les ratios couramment admis des diamètres de Foration/Hauteur de Front se situent entre 10 et 15 mm par mètre de front d'abattage.

❖ **Angle de Foration**

L'angle de foration conditionne le pourcentage de déplacement des matériaux. L'angle théorique donnant le maximum de mouvement aux matériaux est obtenu avec 45° par rapport à la vertical mais il faut veiller à réaliser des trous parallèles au front et garder une épaisseur de banquette constante le long de celui-ci.

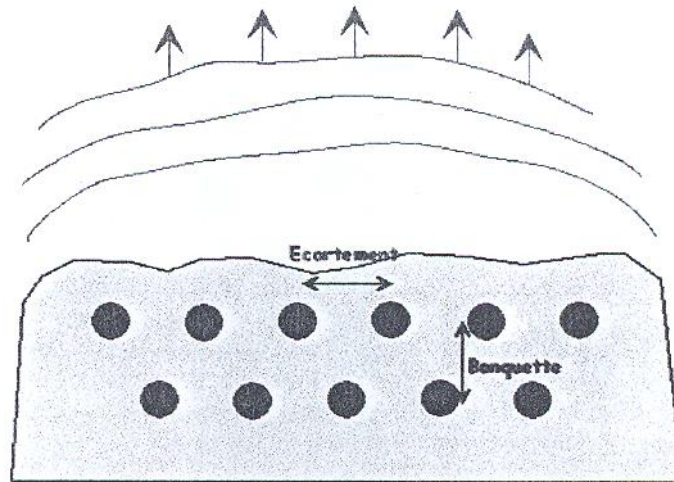
Lorsqu'on utilise des trous verticaux (plus facile à réaliser) des explosifs plus puissants devront être utilisés en pied.

❖ **Ratio largeur d'espacement/banquette des trous**

Ce paramètre influence également le pourcentage des matériaux à déplacer. Il existe deux théories sur le ration Espacement /banquette

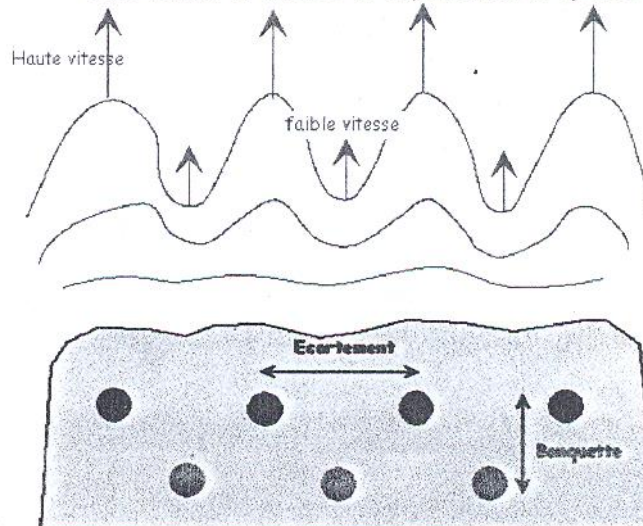
- il doit être compris entre 1.2 et 1.5
- il doit être compris entre 0.4 et 0.9

Déplacement et vitesse de déplacement constants



$$1.2 < Raties < 1.5$$

Déplacement et vitesse de déplacement irréguliers



$$Raties > 1.5$$

❖ **Vitesse d'éjection de la banquette**

Plus la vitesse de déplacement de la banquette est grande, plus le pourcentage de matériau mis en mouvement est important. Cette vitesse dépend de la hauteur du front de taille, de la charge spécifique mise en œuvre et de la largeur de la banquette qui doit être comprise entre **5.2 et 7 mètres**.

Pour mettre en mouvement les différentes banquettes jusqu'au tas en face, il est nécessaire d'obtenir des vitesses de déplacement comprises entre 12 et 27 m/s

Chapitre 11 : Paramètres d'abattage par trous profonds parallèles (souterrain)

Paramètres à calculer :

- **Ligne de moindre résistance :**

$$W = \sqrt{0.785 \cdot d^2 \cdot Kch \cdot \Delta / m \cdot q_{exp} \cdot \lambda}$$

Où : d : diamètre des trous profonds parallèles. Il est pris des valeurs standards et doit satisfaire aux conditions ci-après :

$$d \leq M/50 \text{ pour } f < 9$$

$$d \leq M/30 \text{ pour } f \geq 9$$

M est la puissance du gîte et f la dureté de la roche à l'échelle de Protodiakonov.

Kch : coefficient de chargement des trous profonds parallèles := 0.75 – 0.85

Δ : densité de l'explosif utilisé

Pour les trous chargés par de l'explosif en vrac : $\Delta = \Delta_t$

Pour les trous chargés par de l'explosif en cartouche : $\Delta = \Delta_t \cdot dc^2/dt^2$

m : distance relative entre les trous : elle est déterminée selon le graphe 6

q_{exp} : consommation spécifique d'explosif voir tableau.

λ : coefficient qui tient compte de la diminution du volume du minerai abattu à cause de la présence des trous de contour

$$\lambda = 2S / (2S + 0.5 a_{conv} \cdot \sum l_{cont})$$

avec : S : surface du front d'abattage en m²

a_{conv} : distance moyenne conventionnelle entre les trous profonds parallèles dans une rangée en m. On détermine a_{conv} de la figure 5.

$\sum l_{cont}$: longueur totale des trous de contour dans le chantier en m. elle dépend de la forme et des dimensions du chantier.

- **Distance entre les trous profonds dans une rangée :**

$$a = m \cdot W \quad (m)$$

- **Nombre des trous profonds dans une rangée :**

$$N = \frac{B}{a} + 1$$

Où : B est la largeur du chantier

- **Longueur totale des trous dans une rangée :**

$$\sum L = N \cdot l_t$$

- **Charge totale d'explosif :**

$$Q = q'_{exp} \cdot \sum L \quad (kg)$$

Où : q'_{exp} est la quantité spécifique d'explosif par m de trou calculée à l'aide de la formule suivante : $q'_{exp} = 0.785 \cdot d^2 \cdot \Delta \cdot Kch \quad (kg/m)$;

- **Charge par trou : P x Lt**

- **Quantité du minerai abattu en une volée :**

$$M = S \cdot W \cdot \gamma \quad (T) \quad \text{avec } S \cdot W = V$$

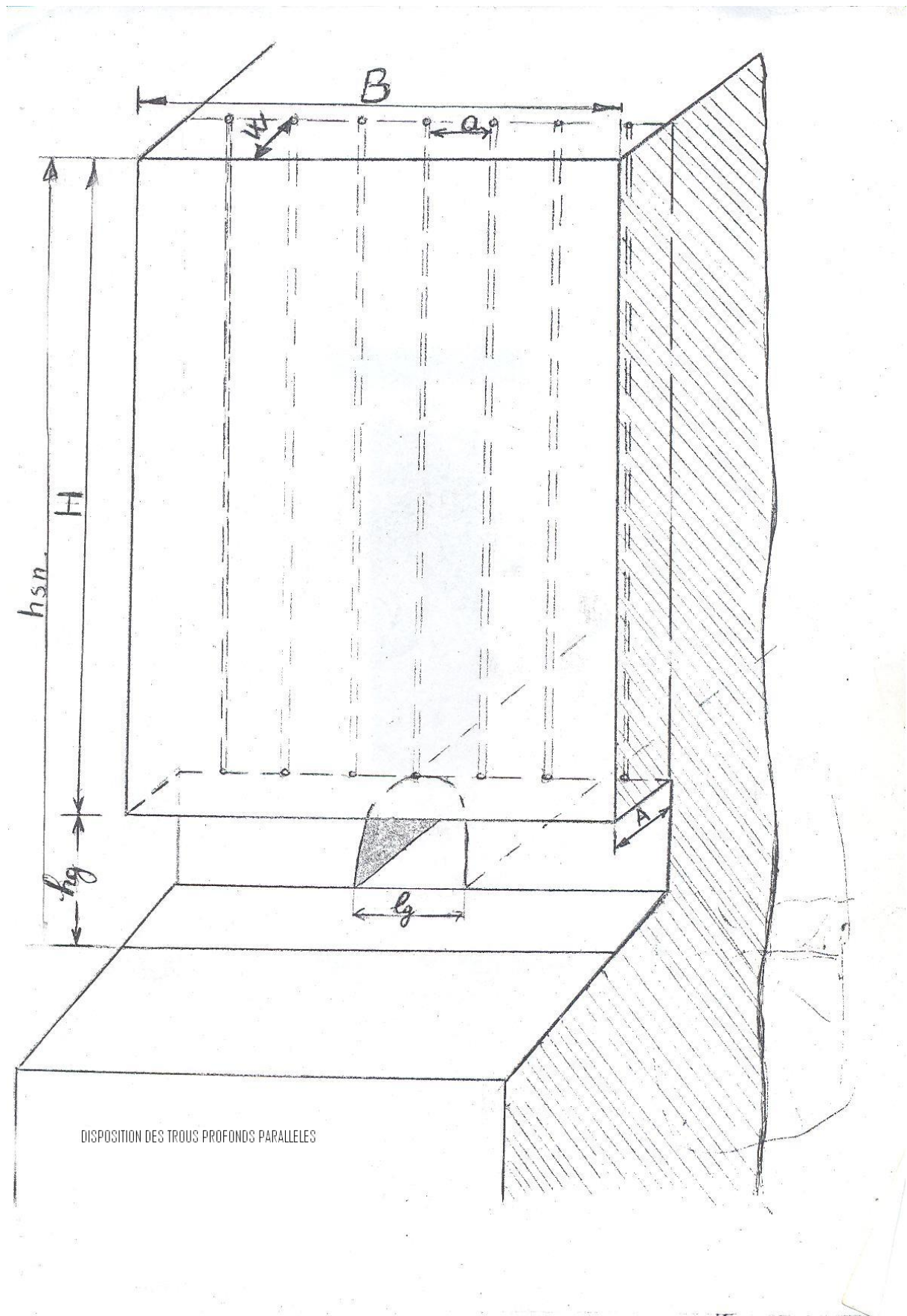
- **Consommation spécifique précise d'explosif :**

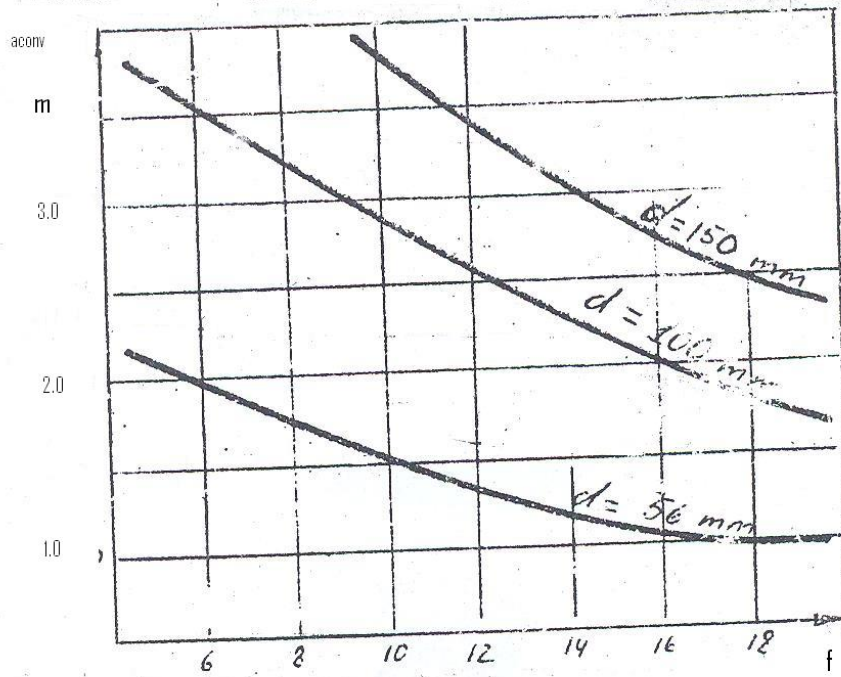
$$q^*_{ep} = \frac{q'_{ep} \cdot \sum L}{S.W} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Application :

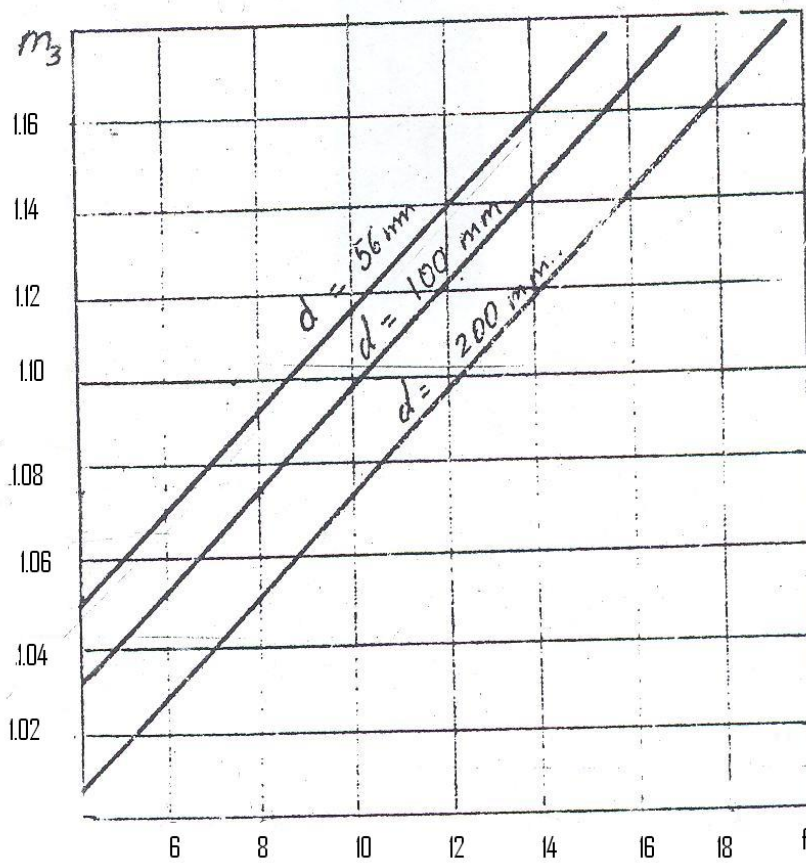
Déterminez les paramètres d'abattage par trous profonds parallèles du minerai avec les données suivantes :

- masse volumique du minerai : (2.7T/ m³)
- dureté du minerai : f = 8
- méthode d'exploitation par sous niveau
- hauteur du sous niveau : hsn = 16.5 m
- puissance du gîte : M = 18 m
- angle de pendage du gîte : 90°
- ouvrage de forage de forme carré et de section égale à 6.25 m²
- densité de l'explosif (charge en vrac) : 1030 kg/ m³
- diamètre des trous profonds proposés : 0.1m
- consommation spécifique d'explosif : 1.4 kg/ m³





Relation entre la distance moyenne conventionnelle, les trous profonds parallèles et la dureté f .



Relation entre la distance relative, les trous profonds parallèles et f

Chapitre 12 : Paramètres d'abattage par trous profonds en éventail (souterrain)

Paramètres à calculer :

- ligne de moindre résistance : W
- le nombre de trous : N
- la longueur totale des trous profonds : $\sum L$
- Quantité d'explosifs par trou ;
- volume total des explosifs chargés dans les trous d'un éventail ;
- masse et volume du minerai abattu par volée

Calcul de W

$$W = \sqrt{0.785 \cdot d^2 \cdot K_{ch} \cdot \Delta / m \cdot q_{exp} \cdot \lambda}$$

Où : d : diamètre des trous profonds en éventail. Prendre les valeurs standards : 42 mm ; 56 ; 80 ; 100 ; 120 ; 150 mm ...

Après avoir calculé d, vérifier si la valeur trouvée satisfait aux conditions suivantes (condition de dureté de la roche) :

$$d \leq M/50 \text{ pour } f < 9$$

$$d \leq M/30 \text{ pour } f \geq 9$$

M est la puissance du gîte et f la dureté de la roche à l'échelle de Protodiakonov.

K_{ch} : coefficient de chargement des trous profonds en éventail = 0.6 – 0.76

Δ : densité de l'explosif utilisé

Pour les trous chargés par de l'explosif en vrac : $\Delta = \Delta t$

Pour les trous chargés par de l'explosif en cartouche : $\Delta = \Delta t \cdot d_c^2 / d_t^2$

m : distance relative entre les trous profonds : on l'a déterminée à l'aide de la figure 4. Elle est fonction de la longueur moyenne l_m des trous profonds en éventail. l_m dépend des paramètres de la méthode d'exploitation

q_{exp} : consommation spécifique d'explosif voir tableau

λ : coefficient qui tient compte du changement du volume du minerai abattu à cause de la présence des trous de contour.

$$\lambda = \frac{S}{(S + 0.5 a_{conv} \cdot \sum l_{cont})}$$

avec : S : surface transversale du chantier en m²

a_{conv} : distance moyenne conventionnelle entre les trous profonds en éventail (voir figure 3)

∑l_{cont} : longueur totale des trous de contour dans le chantier en m. elle dépend de la forme et des dimensions du chantier.

- **Distance entre les trous profonds dans une rangée :**

$$a = m \cdot W \text{ (m)}$$

- **Nombre des trous profonds dans une rangée :**

Il dépend de l'exemple : il faut calculer la distance moyenne entre les charges

$$a_{\text{ext}} = (1-1.4)W$$

$$a_{\text{min}} = (0.4 - 0.5)W$$

$$a_{\text{moy}} = (a_{\text{ext}} + a_{\text{min}})/2$$

$$N = (2H + B)/a_{\text{ext}} + 1$$

Où : B est la largeur du chantier

- **Consommation d'explosif par volée :**

$$Q = V.q_{\text{exp}}$$

Consommation spécifique d'explosif par mètre de trou (charge linéaire :)

$$q'_{\text{exp}} = 0.785.d^2 \cdot \Delta.K_{\text{ch}} \quad (\text{kg/m})$$

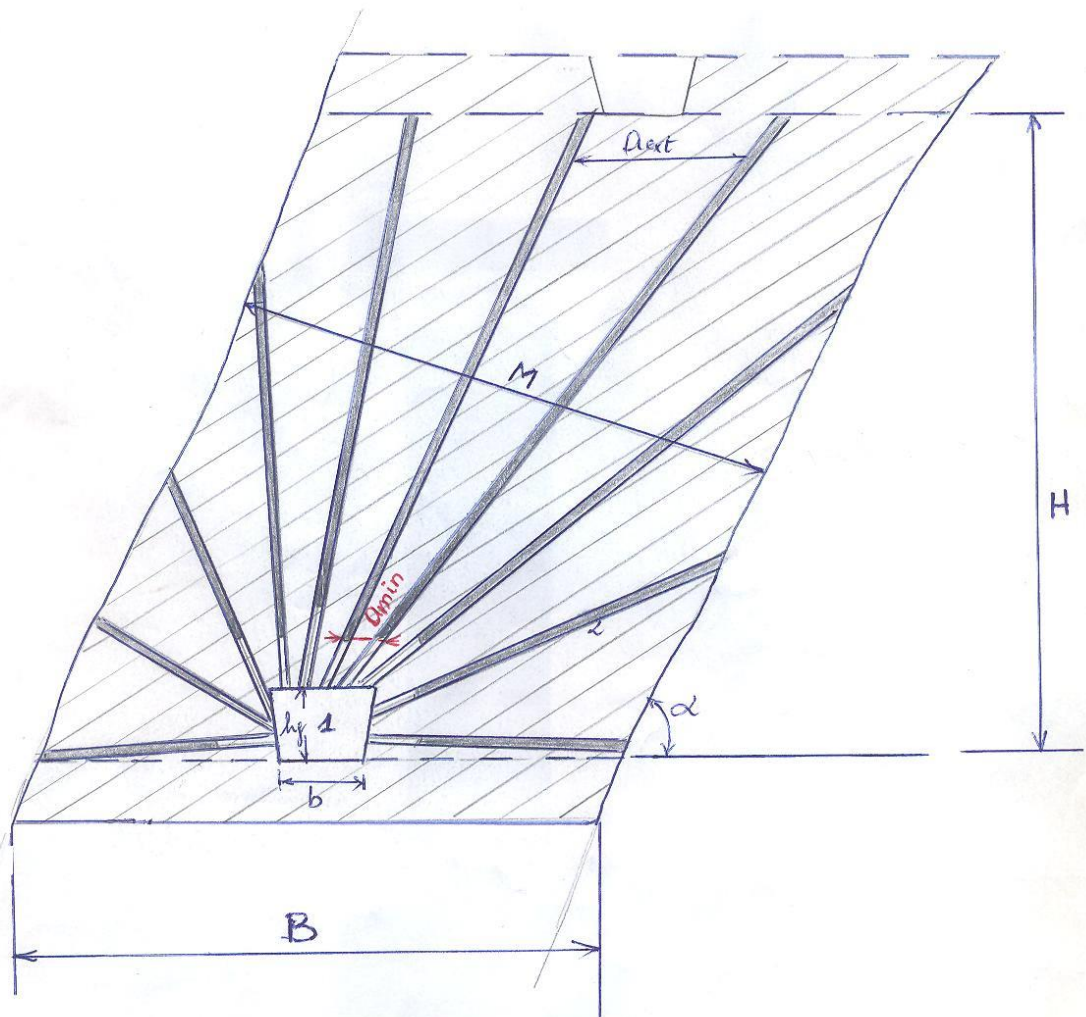
- **Quantité du minerai abattu en une volée :**

$$M = S.W.\gamma \quad (\text{T}) \quad \text{avec } S.W = V$$

Application :

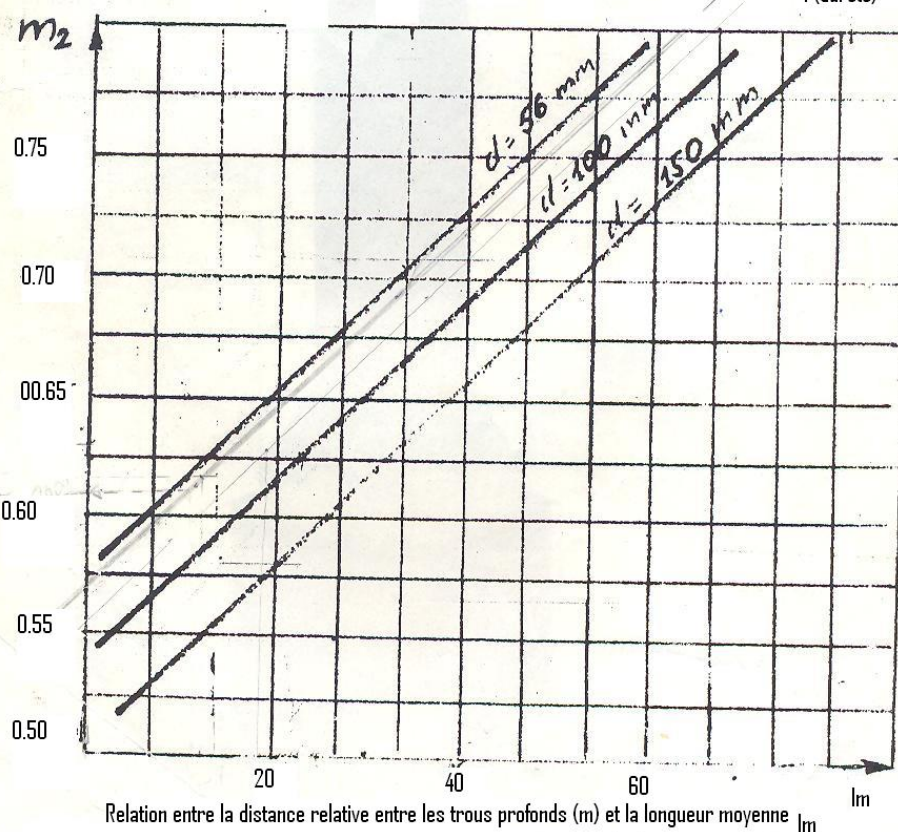
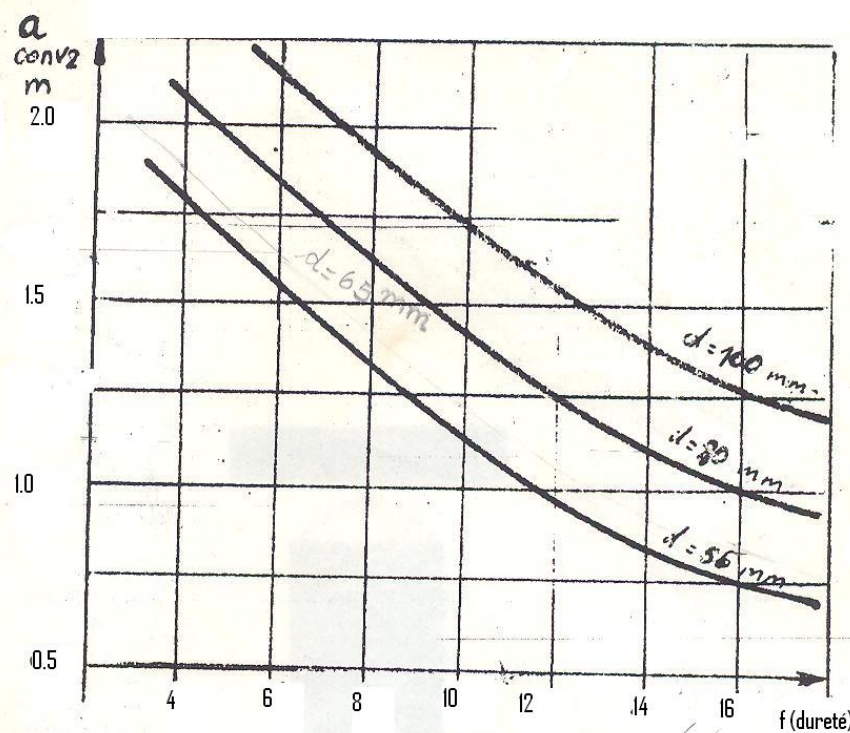
Déterminer les paramètres d'abattage du minerai dont la dureté à l'échelle de Proto est $f = 11$ et si les données de départ sont les suivantes :

- méthode d'exploitation par sous-niveaux
- densité de l'explosif utilisé : 1000 kg/m^3
- masse volumique du minerai : 2.5 T/m^3
- diamètre proposé des trous profonds : 0.1 m
- explosif en vrac
- angle de pendage du gîte : 90°
- largeur du chantier : $B = 24 \text{ m}$
- hauteur du chantier : $H = 36 \text{ m}$
- section de l'ouvrage de forage : 8 m^2
- largeur de l'ouvrage de forage : 3.2 m
- prendre $q_{\text{exp}} = 1.67 \text{ kg/m}^3$



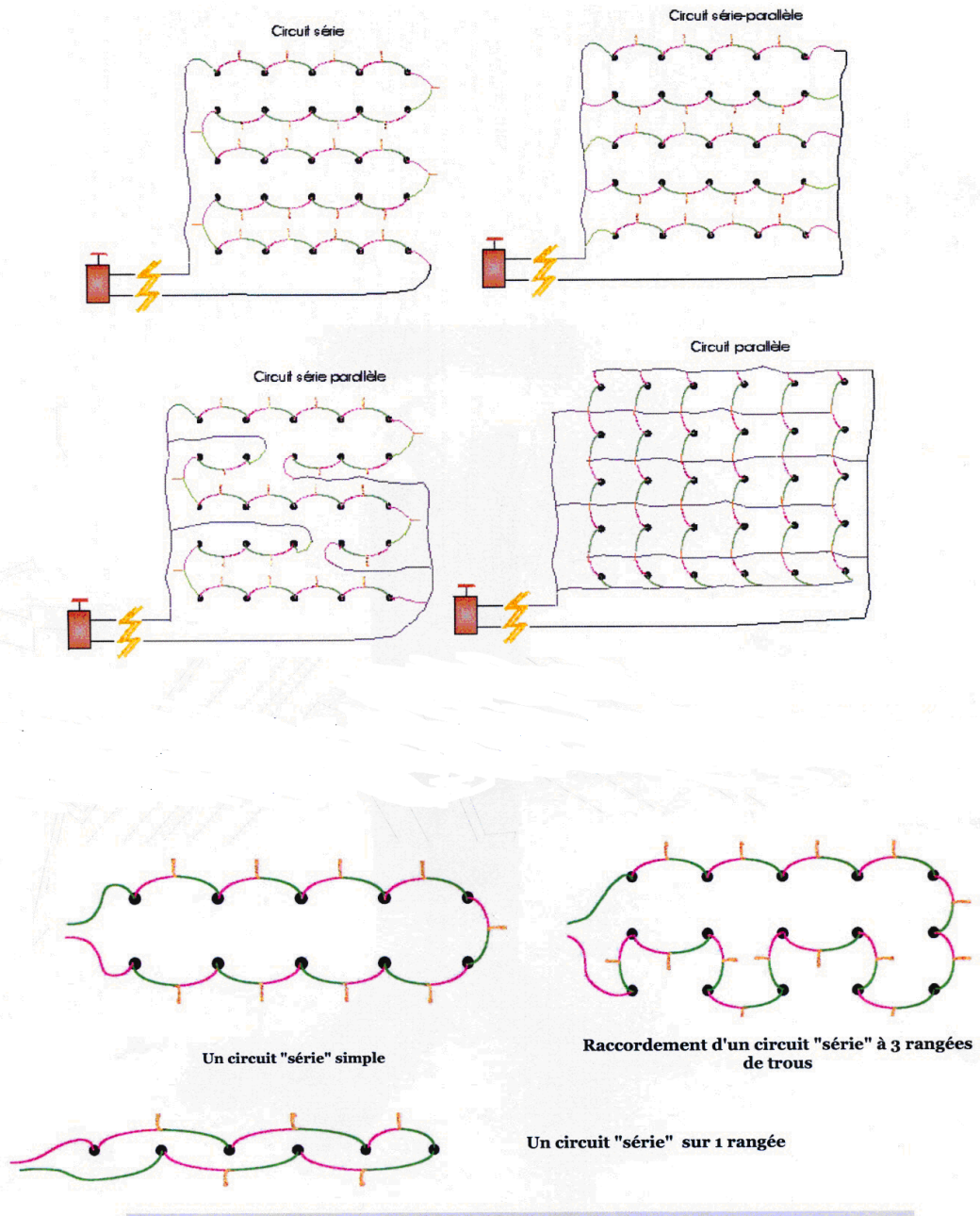
Disposition des trous profonds en éventail

1: ouvrage de forage; 2: trou profond



Chapitre 13 : Calcul de la Résistance d'un Circuit de Tir ; Calcul de l'Intensité du Courant nécessaire ; Dimensionnement d'un exploseur.

1. Différents Types de montage électrique



Remarque : Les circuits parallèles sont difficiles à mettre en œuvre et sont réservés à des spécialistes. Les circuits séries sont beaucoup plus faciles à mettre en œuvre. Ils sont le plus utilisés. La réglementation Française n'autorise explicitement que les circuits séries.

2. Vérification du circuit de tir

Une fois le circuit établi, le boute-feu s'assure de sa continuité par mesure précise de sa résistance au moyen de l'ohmmètre. Il contrôle ensuite, avec le même instrument, la ligne de tir ouverte (lecture sur l'écran : infini), puis la ligne fermée, ce qui lui permet de connaître la valeur de la résistance de la ligne de tir.

Il raccorde ensuite par des épissures la ligne au circuit des détonateurs puis la déroule jusqu'au poste de tir où il pratique une dernière mesure, à comparer avec la résistance théorique du circuit.

Selon le résultat de sa mesure, plusieurs situations peuvent se présenter :

- ❖ La mesure correspond à la valeur calculée à la valeur d'un détonateur près : la mise à feu est possible avec un exploseur adaptée.
- ❖ La mesure est inférieure à la valeur calculée : un contrôle visuel de la volée est alors indispensable : il faut déceler le problème et le réparer. Les causes peuvent être : mauvais branchement, un non raccordement d'un ou plusieurs détonateurs, un court circuit entre deux épissures ou plusieurs épissures touchent le sol, des détonateurs reliés sont exclus du circuit. Il faut refaire le calcul théorique et vérifier visuellement le branchement et les épissures.
- ❖ La mesure est supérieure à la valeur calculée, la valeur varie beaucoup. Les causes peuvent être la présence d'épissures sales ou mal serrées, les épissures sont en contact avec un milieu conducteur (eau ou partie métallique). On ne procède pas dans ce cas à la mise à feu. Il faut au préalable contrôler et resserrer les épissures.
- ❖ La résistance du circuit est infinie (l'écran de l'ohmmètre n'affiche rien) : le circuit est ouvert (coupure dans le circuit, épissure ouverte, détonateur défectueux).
Il faut vérifier le testeur, vérifier visuellement les lignes et les épissures et rechercher le détonateur défectueux par élimination.
Pour localiser l'interruption, on divise le circuit en deux parties de façon à détecter la moitié défectueuse à l'aide de l'ohmmètre. La moitié défectueuse sera à son tour partagée en deux, et ainsi de suite jusqu'à trouver le fil coupé.
- ❖ La résistance du circuit est nulle ou très faible : pile défectueuse ou court-circuit dans la ligne de tir : après examen de la ligne, on répare le défaut s'il est apparent, on remplace la ligne dans le cas contraire.
- ❖ La valeur lue n'est pas stable : il y'a une mise à la terre partielle du circuit : il faut rechercher l'emplacement de la blessure.

Remarque : un des moyens permettant de garantir un tir sans problème, et une lecture fiable à l'ohmmètre est la réalisation d'épissure bien serrée et isolée du sol.

3. Calcul de la résistance d'un circuit de tir

3.1 Circuit en série

La résistance ohmique d'un circuit en série est égale à la somme des résistances de chacun des éléments qui le composent.

$$R_{\text{totale}} = \sum R_{\text{du circuit}}$$

S'il y'a n éléments

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Remarque : Pour le circuit en série, la résistance totale du circuit est égale à la somme de la résistance du circuit des détonateurs et de celle de la ligne de tir.

$$R_T = n \times r_d + r_l$$

n : nombre de détonateurs

r_d : résistance d'un détonateur

r_l : résistance de la ligne de tir

Remarque : Ici la résistance d'une épissure a été considérée négligeable

Si non : $R_T = n \times r_d + r_l + R_{\text{ép}}$ avec $R_{\text{ép}}$ = résistance des épissures

Application1 : calculer la résistance totale d'un circuit de tir en série comprenant 15 détonateurs de moyenne intensité (R de la tête amorce = 0.45Ω) de 4 mètres de tige de cuivre de diamètre 0.51 mm ($R_{\text{fils}} = 0.17 \Omega/\text{m}$), la résistance de la ligne de tir étant égale à 6Ω . Résistance d'épissure négligeable.

Solution :

3.2 Circuit série- parallèle

Application2 :

Soit un tir de 5 séries de 44 détonateurs MI davey bickford (résistance de 1.5Ω) et intensité mini de fonctionnement 1.7 Ampères), reliés en parallèle. Une ligne de tir de 6Ω sera utilisée.

- Déterminez la quantité de courant requise
- Déterminez la résistance de chaque série
- Déterminer la résistance des 5 séries en parallèle
- Déterminer la tension nécessaire
- Dimensionner l'exploseur approprié.

Application 3 (circuit série-parallèle):

Soit un circuit composé de 5 séries réparties comme suit :

- série 1 : 60 détonateurs à 1.4Ω de résistance + 200 mètres de ligne à $0.17 \Omega/\text{m}$
- série 2 : 55 détonateurs à 1.4Ω de résistance + 150 mètres de ligne à $0.17 \Omega/\text{m}$
- série 3 : 50 détonateurs à 1.4Ω de résistance + 170 mètres de ligne à $0.17 \Omega/\text{m}$
- série 4 : 60 détonateurs à 1.4Ω de résistance + 150 mètres de ligne à $0.17 \Omega/\text{m}$
- série 5 : 40 détonateurs à 1.4Ω de résistance + 100 mètres de ligne à $0.17 \Omega/\text{m}$

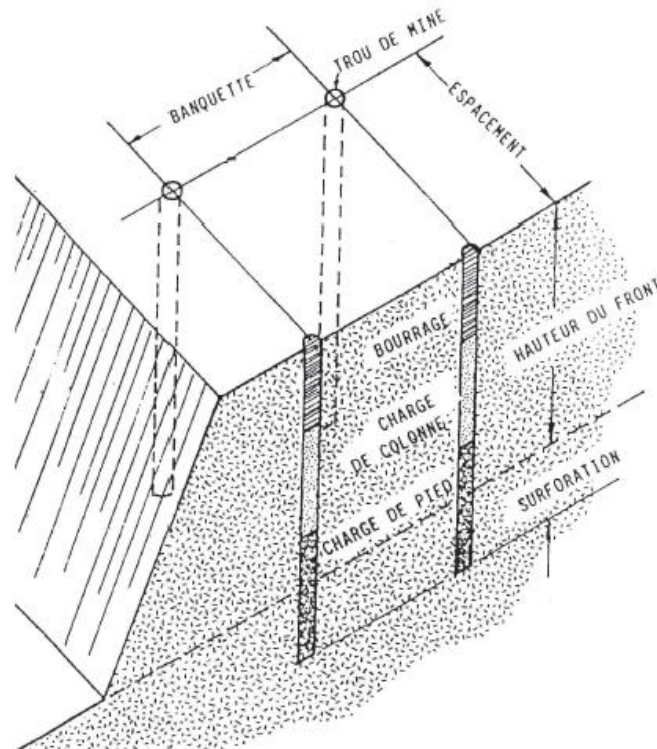
Ligne de tir : 6Ω

- Déterminer la résistance de chaque série ;
- Déterminer la résistance des 5 séries ;
- Déterminer la résistance totale ;
- Déterminer l'intensité du courant fourni avec un exploseur de 130 V ;
- Déterminer le voltage absorbé par la ligne de tir ;

- Déterminer le voltage disponible pour les 5 séries ;
- Déterminer l'intensité fournie à chaque série ;
- Quel commentaire vous inspire ces résultats si les détonateurs ont une intensité mini de fonctionnement de 0,8A ? de 1,2 A ?

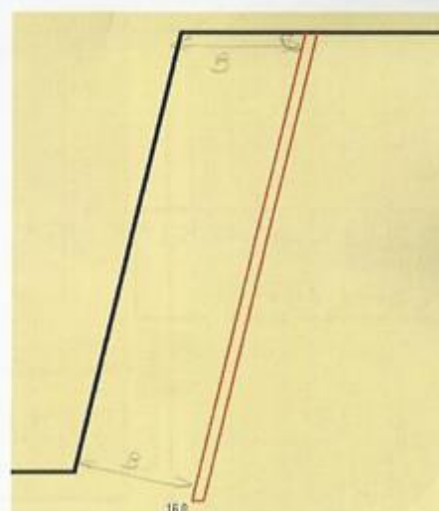
Chapitre14 : Géométrie du Tir

1) Banquette et Espacement

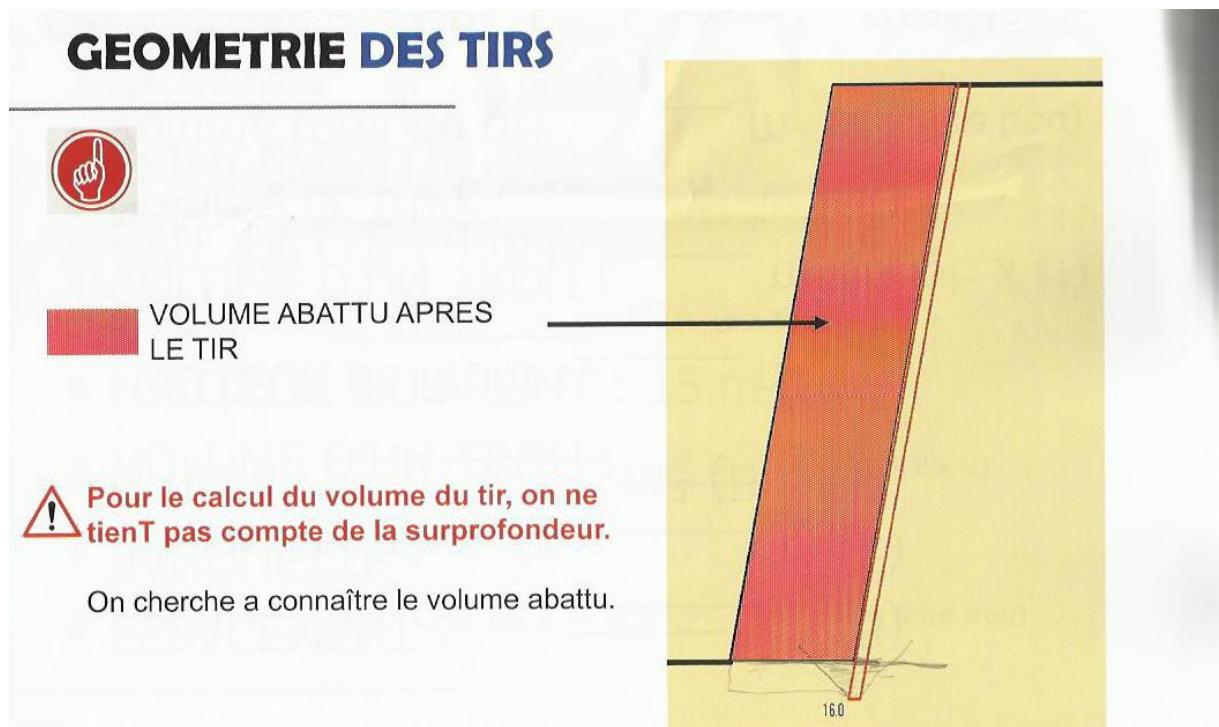


Définition des données suivantes :

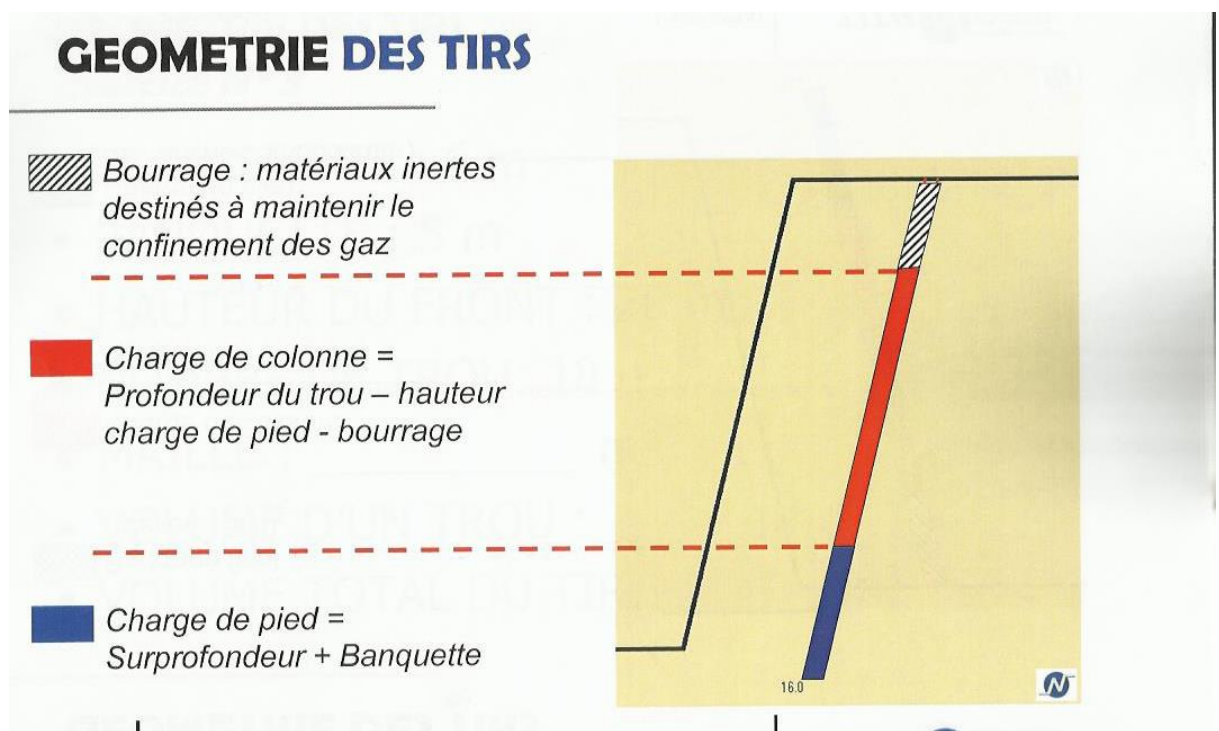
- banquette
- espacement
- profondeur des trous
- surprofondeur
- inclinaison du forage



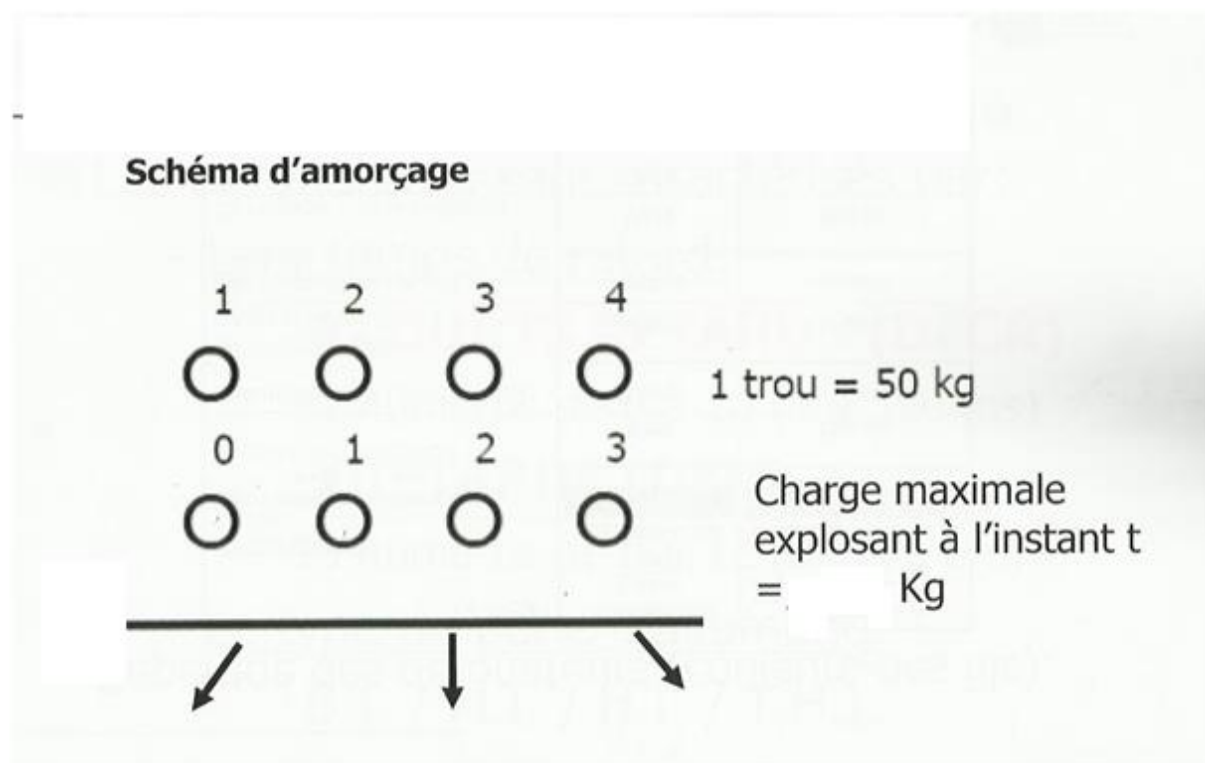
2) Volume abattu par le tir



3) Structure des charges

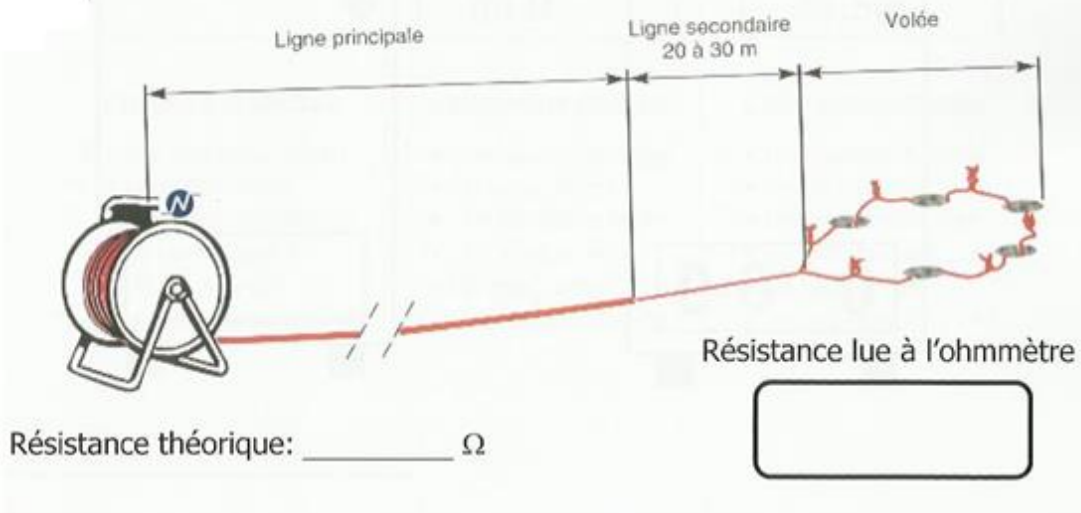


4) Charge unitaire



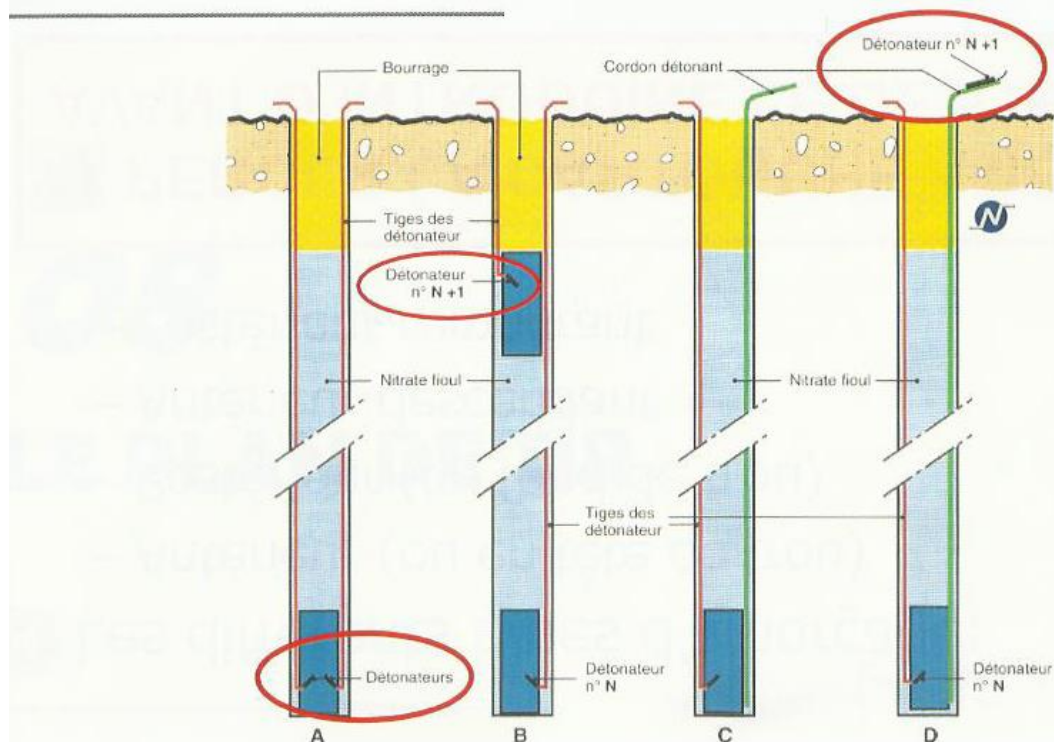
TEST DU CIRCUIT DE DETONATEURS

Le raccordement des détonateurs électriques se fait en **SERIE**

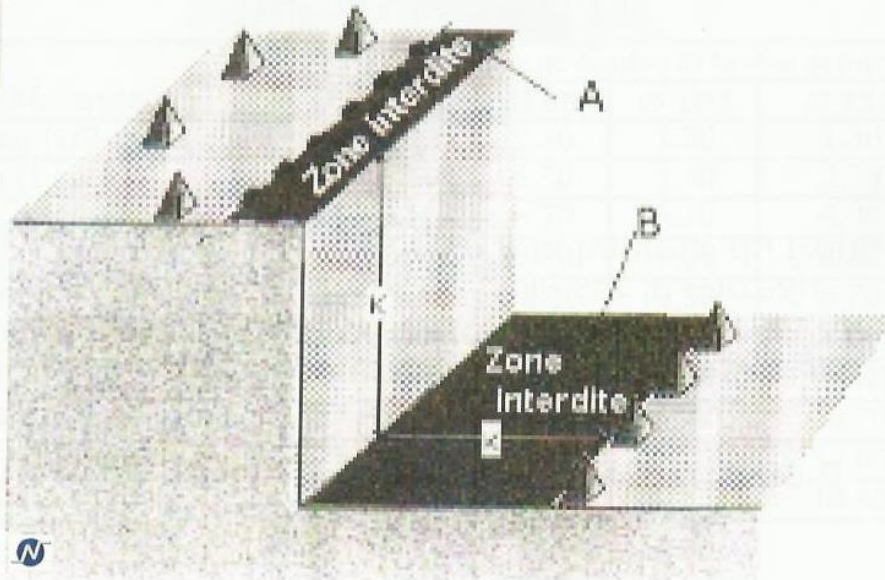


5) Amorçages de sécurité

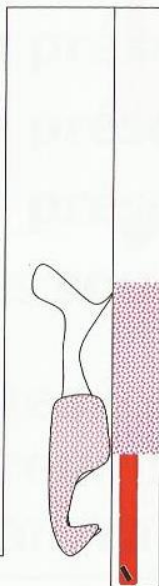
LES AMORCAGES DE SECURITE



MESURES DE SECURITE POUR LE CHARGEMENT



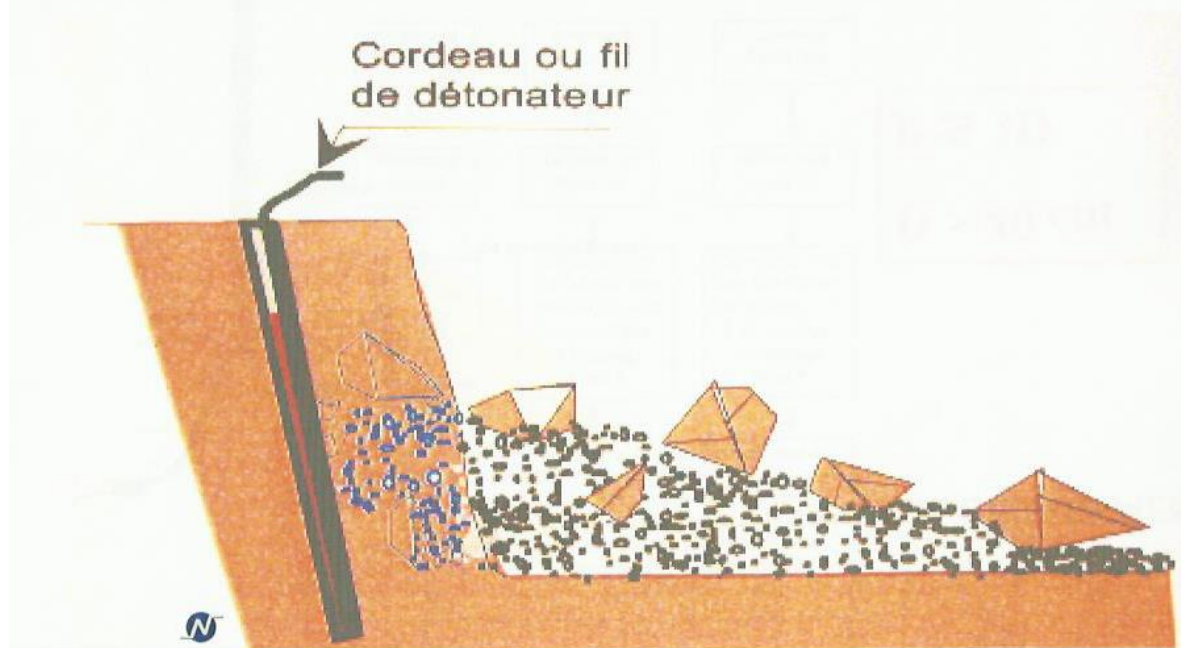
INCIDENTS DE CHARGEMENT



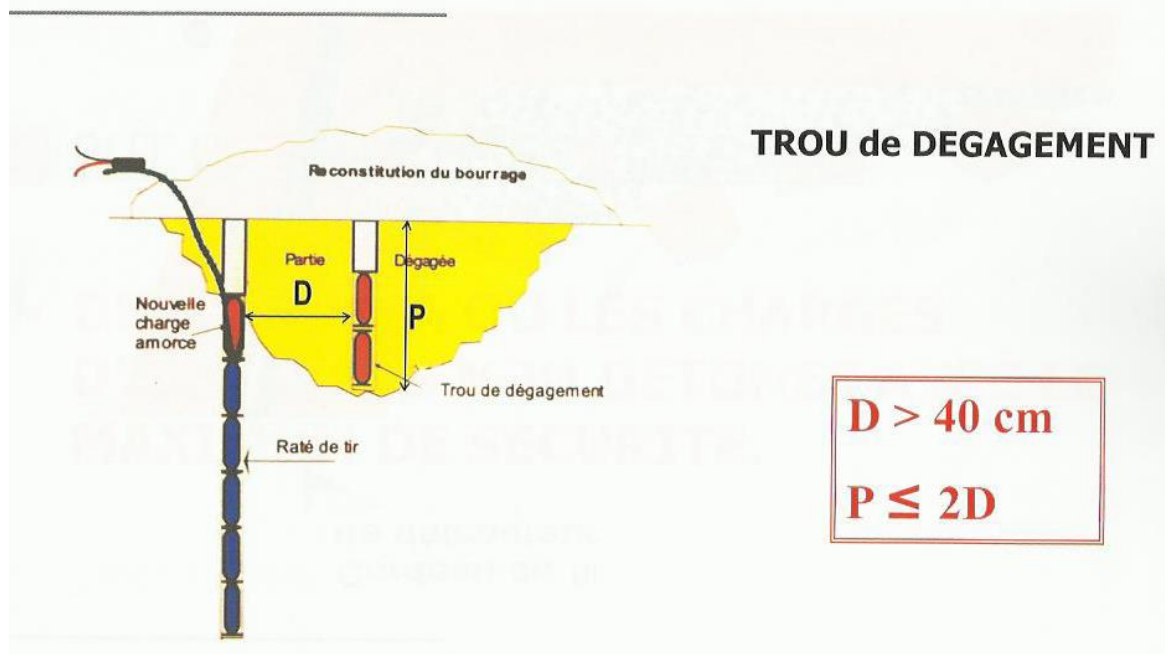
Le trou de mine est en cours de chargement, vous avez introduit 75 KG de nitrate fioul. Le niveau de produit vrac ne monte pas. Le foreur a indiqué une faille sur son rapport de foration. Que faites vous ? La charge maxi par trou ne doit pas dépasser **90 kG**.

Chapitre 15 : Incidents et anomalies du tir

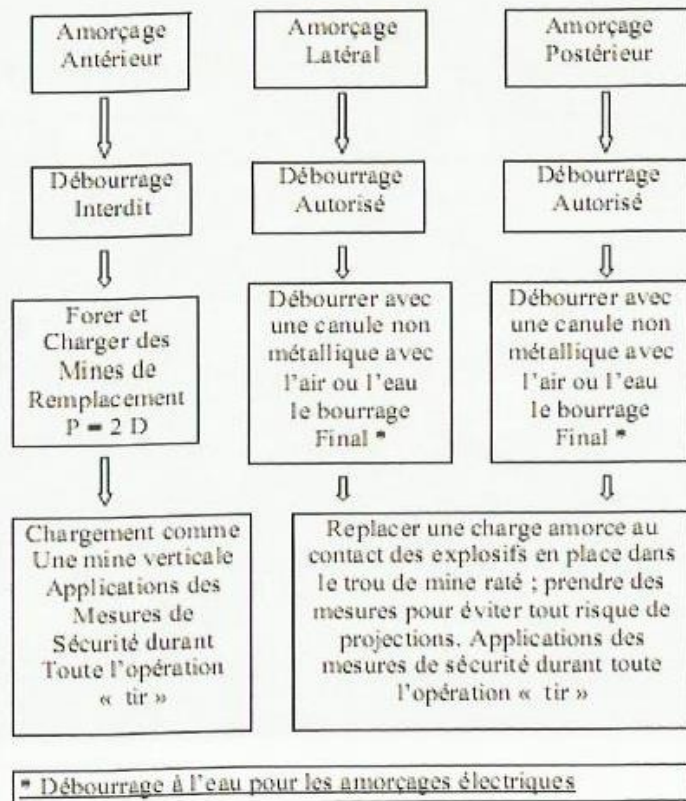
TRAITEMENT DU RATE



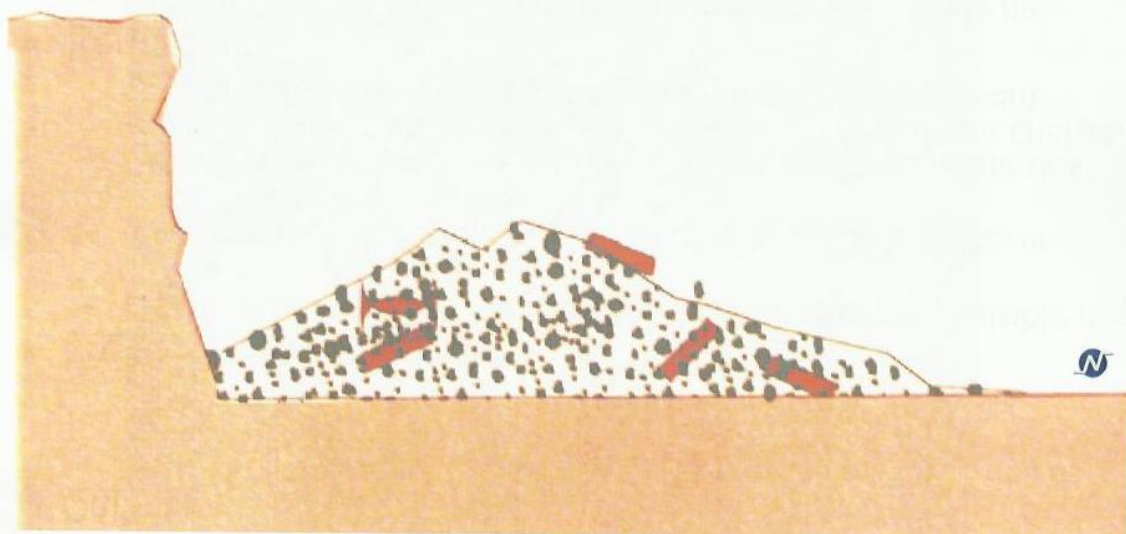
TRAITEMENT DU RATE



TRAITEMENT DU RATE



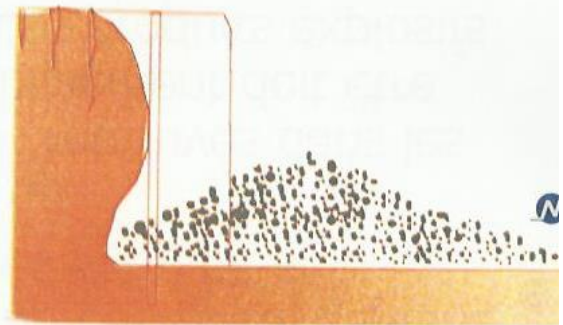
IMBRULES



ANOMALIES DE TIR

On constate après le tir une forte fissuration arrière et du sous-cavage.

Il y a risque d'éboulement de la partie supérieure du gradin. On balise la zone dangereuse. Si une purge efficace n'est pas possible on procède à un ou plusieurs « tirs fente » avec autorisation préfectorale. Si ces anomalies se renouvellent, on demande une modification du plan de tir concernant la répartition des charges, la hauteur de bourrage final, le rapport de maille, ou la surface de maille.

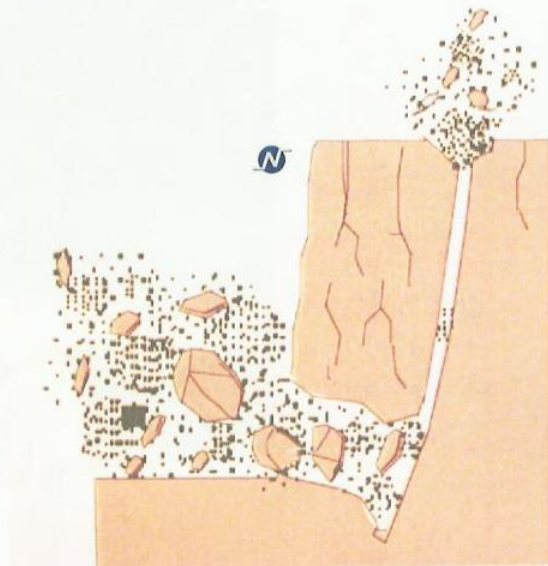


Quelques définitions :

- **Le collage** : C'est lorsqu'une partie de produits s'est trouvée coller sur le front
- **La chandelle** : C'est lorsque forme de gros blocs fissurés mais restés sur place.
- **Effets arrière** : ce sont des effets après le tir qui vont endommager une partie du prochain tir.
- **Culot** : C'est le fond de trou qui n'a pas tiré. Il est causé par une mauvaise foration, un mauvais nettoyage du trou avant minage.
- **Canon** : La charge a explosé mais elle est sortie du trou sans briser la roche ; le massif est resté intact après le tir. Il est causé par la rencontre d'une roche très dure, par l'insuffisance de charges explosives, le non respect de l'emplacement des détonateurs ou le non respect de distance entre les trous.

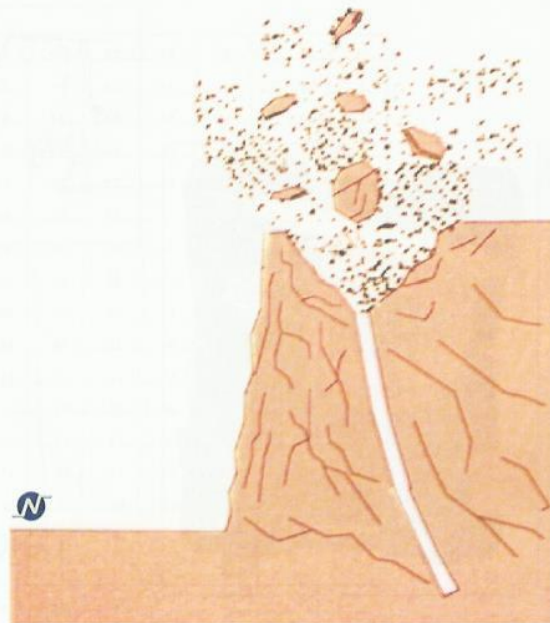
ANOMALIES DE TIR

- Lors du tir il y a des projections en pied, il y a risque d'atteinte du personnel ou des matériels situés hors de la zone contrôlée. La cause est probablement liée à une déviation du trou vers l'avant. Revoir la qualité de foration, implantation, inclinaison.
- Demander des mesures de déviation pour les prochains tirs.



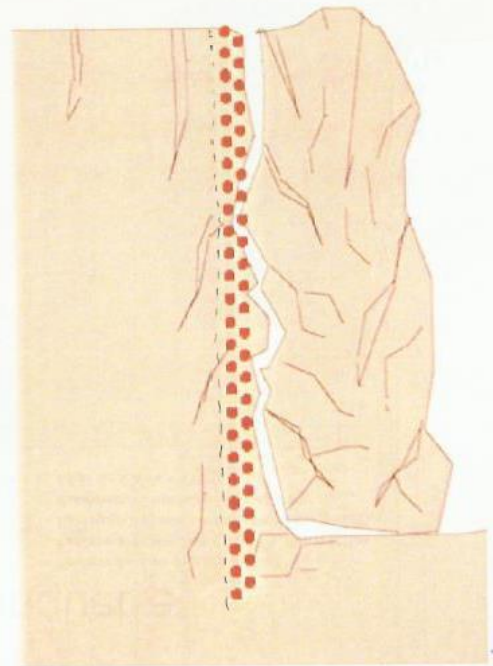
ANOMALIES DE TIR

- lors du tir, il y a des projections verticales. Les risques sont identiques au cas précédent. Revoir le plan de foration, la hauteur du bourrage final, l'implantation des mines, la largeur de la banquette.



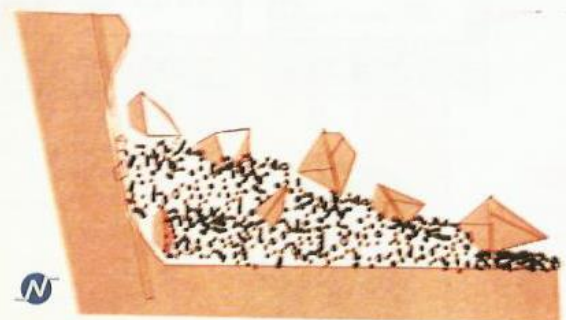
ANOMALIES DE TIR

- après le tir il y a formation d'une chandelle. On peut craindre un effondrement total du gradin. Baliser la zone à risque et revoir les paramètres de tir et de foration.



ANOMALIES DE TIR

- formation d'un surplomb, il y a risque d'effondrement. Si le trou est encore apparent, procéder à un tir d'alignement ; sinon effectuer une purge soignée ou un redressement du front de taille à l'aide de mine faiblement chargées. Risques de projections



Questionnaire de synthèse

- 1) Comment sont conditionnés les explosifs
- 2) Quelle est l'utilité du cordeau détonant
- 3) Quel est le composant de base des explosifs nitratés
- 4) Quelles sont les deux grandes familles des détonateurs électriques ?
- 5) Avantages et inconvénients des détonateurs MI et HI
- 6) Types des d.é retardés utilisés en minage
- 7) Technologie d'un d.N.E
- 8) Que doit-on faire pour limiter les vibrations au sol ?
- 9) Quels sont les principaux risques lorsqu'on charge avec du nitrate fioul
- 10) Précautions en tir électrique vis-à-vis des exploseurs
- 11) Explosif déflagrant ?
- 12) Explosif détonant ?
- 13) On a signalé une veine de terre ou d'argile ou un vide que doit-on faire au cours du chargement ?
- 14) Critères de choix des détonateurs avec longueurs de fils différentes ?
- 15) De quel matériel et de quel équipement doit disposer le boute feu pour charger une mine ?
- 16) Qu'appelle t-on tir à l'anglaise ?
- 17) Le pétardage ?
- 18) Quels sont les avantages de l'utilisation des détonateurs électriques retardés ?
- 19) Comment on fait pour vérifier le circuit de tir avec un ohmètre ?
- 20) Lorsqu'un ohmètre branché à un circuit de tir indique l'infini, qu'est ce que cela décèle ?
- 21) L'ohmètre affiche une valeur supérieure à la valeur calculée : de quoi s'agit-il ?
- 22) Quelles caractéristiques doivent avoir une ligne de tir ?
- 23) A l'aide de quel appareil on met à feu un tir électrique ?
- 24) Quels critères permettent de choisir un exploseur électrique pour mettre à feu une volée ?
- 25) Qu'est-ce qu'un détonateur non électrique ?
- 26) Quels sont les avantages de l'amorçage non électrique ?
- 27) Quelle quantité d'explosifs vous pouvez sortir du dépôt en une seule fois ?
- 28) Peut-on stocker dans un même dépôt des détonateurs et des explosifs ?
- 29) Quelles précautions prendre avant une mise à feu ?
- 30) Peut-on forer un trou de mine au voisinage d'un trou déjà chargé ou en cours de chargement ?
- 31) Qu'est qu'un plan de tir ?
- 32) Quelles sont les précautions à prendre à proximité d'une ligne électrique haute tension ?
- 33) Quelles sont les dimensions admises pour les cartouches, en chargement en chute libre ?

ETUDE DE CAS

Une entreprise minière envisage l'exploitation d'un gisement polymétallique affleurant ayant une puissance de 40 mètres. Les données géologiques et géomécaniques de la couche sont les suivantes :

- Pendage : zéro degré ;
- dureté à l'échelle du Professeur Protodiakonov : 12 ;
- Densité du minerai en place : 2.56 ;
- dimension moyenne des blocs dans le massif naturelle : 0.9 m ;
- dimension moyenne souhaitée des morceaux abattus : 20 cm ;

Hauteur du gradin : 20 m

On veut abattre le minerai à l'aide des explosifs sur deux gradins.

La sondeuse disponible pour la réalisation des trous peut permettre de réaliser des trous aussi bien verticaux qu'inclinés avec des taillants de diamètres variables : 100 mm, 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm

On utilisera de la détonite dont l'aptitude au travail est 450 cm³. Densité : 1.1

On donne B= 4 m ; E = 5m

En supposant qu'à chaque volée de tir, on disposera de trois surfaces dégagées, Calculer les paramètres des travaux de forage et de tir :

- 1) Avec des trous inclinés à 60 ° de l'horizontale et 100 mm de diamètre ;
- 2) Avec des trous verticaux de 80 mm de diamètre

Les dimensions du bloc à tirer étant de 32 m x 60 mètres, on vous demande de calculer :

- Le nombre de trous nécessaires à forer (on utilisera la disposition des trous en damier),
 - La longueur totale des trous forés,
 - La quantité d'explosifs nécessaire à l'abattage du bloc
 - La quantité du minerai abattu par volée ;
 - Le coût du minage d'une tonne du minerai si 1 Kg d'explosif coûte 200F, .
- 3) On dispose d'une pelle hydraulique de 12 mètres cube de godet pour le marinage des matériaux abattus.
- Le coefficient de remplissage du godet est de 0.9 ;
 - La durée d'un cycle de la pelle est 1,5 minutes ;
 - La durée d'un poste est de 8 heures ;
 - Nombre de poste par jour : 3
 - Le temps effectif de travail de la pelle est de 50 minutes par heure ;
 - Le coefficient de foisonnement du calcaire est 1,3

Calculer le temps du marinage.

- 4) Le calcaire est transporté à l'usine par des tombereaux rigides de 52 mètres cubes de benne utile et de 120 T de capacité max. L'usine est située à 2 kilomètres de la carrière.
- Le temps de roulage à charge des camions est de 25 Km/heure,
 - Le temps de roulage à vide est de 35 Km/heure ;

- Le temps d'attente au chargement et au déchargement autres manœuvres est évalué à 2 minutes 30 secondes ;
- Le temps de déchargement est d'une minute.

Calculez le temps de cycle des tombereaux.

Calculer le rendement d'un tombereau par jour.

Calculer le nombre nécessaire de tombereaux si le futur bloc sera tiré après 72 heures.

