



Polycopié de cours

Eléments de l'exploitation des mines

Réalisé par :

Docteur MerahChafia

Avant-propos:

Ce polycopié d'exploitation minière est destiné aux étudiants du deuxième cycle des mines. Il regroupe des questions relatives à l'exploitation minière.

Il reprend les grandes lignes du cours d'exploitation des mines, avec trois chapitres. Le premier chapitre est consacré aux différentes définitions relatives à l'exploitation des mines et à la classification des techniques d'exploitation. Le deuxième aborde le rapport de découverte à travers ses types, ses utilisations le long de l'exploitation d'un gisement minier, des exercices corrigés sont proposées.

Enfin le troisième et dernier chapitre est consacré à l'exploitation à ciel ouvert depuis toutes les définitions relatives à l'exploitation à ciel ouvert, les différentes étapes d'une exploitation minière.

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

Les termes utilisés en exploitation sont désignés entre parenthèses en anglais.

Table des Matières	pages
Introduction	1
<u>Chapitre I</u>	
DEFINITIONS RELATIVES A L'EXPLOITATION MINIERE	
I-1 DEFINITIONS	5
I-2 CLASSIFICATION DES GISEMENTS	10
I-2-1 Morphologie des corps de minerais	10
I-2-2 Eléments de classification des gisements	12
A- Classification selon la forme	12
a- Filons	12
b- Couches	13
c- Amas	13
B- Classification selon l'angle de pendage	15
I-2-3 Mur toit et puissance d'un gisement	16
I-2-4 Terminologie de la géométrie d'un gisement.	18
I-3- LES DIFFERENTES TECHNIQUES D'EXPLOITATION MINIERE	20
A- Exploitation à ciel ouvert	21
B- Exploitation souterraine	24
B-1 Méthodes conservant des vides résiduels après exploitation	27
B-2 Méthodes supprimant les vides résiduels après exploitation souterraine.	29
C- Exploitation par dissolution et la lixiviation <i>in situ</i> .	31
C-1 Exploitation par Dissolution	31
C-2 Exploitation par lixiviation in-situ	33
<u>Chapitre II</u>	
RAPPORT DE DECOUVERTURE (STRIPPING RATIO)	35
II-1 TYPES DE RAPPORT DE DECOUVERTURE	36
1- Le coefficient de recouvrement global	36
2- Rapport de découverte courant	37
3- Break-even Stripping Ratio (BESR)	37
II-2 SEQUENCE DE GEOMETRIE	38
1- Méthode de découverte décroissant	38
2- Méthode de découverte croissant	39
3- Méthode de rapport de découverte constant	39
II-3 EXERCICES D'APPLICATION	40

Chapitre III

ELEMENTS DE L'EXPLOITATION A CIEL OUVERT	48
a- Le gradin	48
b- Berme	50
III-1 CONTOUR DE LA MINE	51
III-1-1- Détermination des angles des bords de la mine à ciel ouvert	53
III-2 ETAPES DE L'EXPLOITATION A CIEL OUVERT	55
A- TRAVAUX D'ABATTAGE :	56
a- Objectifs	56
b- Eléments théoriques sur l'opération d'abattage	56
b-1 Mécanisme de l'explosion	56
b-2 Abattage de la roche	57
c- Exigences technologiques des travaux de forage et de tir	58
B- CHARGEMENT :	59
B-1 Les engins de chargement	61
C- TRANSPORT	63
D- MISE A TERRIL	64
D-1 DISTINCTION DES TERRILS	65
1- Terrils intérieurs	65
2- Terrils extérieurs	65
D-2 EXEMPLES DE TERRILS	66

Liste des Figures		Pages
Fig. 1.	Déroulement d'une opération minière	1
Fig. 2.	Processus minier.	1
Fig. 3.	Processus minier : les jalons importants jusqu'à la faisabilité.	2
Fig. 4.	Terrain encaissant.	7
Fig. 5.	Représentation d'une salbande.	8
Fig. 6.	Représentation d'un intercalaire.	8
Fig. 7.	Répartition des ressources minières sur le territoire Algérien.	10
Fig. 8.	<i>a. Coupe d'un filon.</i>	12
	<i>b. Coupe d'un filon de cuivre en Allemagne.</i>	
Fig. 9.	Filons réticulés.	13
Fig. 10.	Filons parallèles.	13
Fig. 11.	Couche.	13
Fig. 12.	Vue en plan d'un amas.	14
Fig. 13.	Quelques exemples de types de gisements.	14
Fig. 14.	Principaux types de gisements et méthodes d'exploitation.	15
Fig. 15.	Angle de pendage.	15
Fig. 16.	Angle de pendage d'une couche.	16
Fig. 17.	Divers angles de pendage de la couche.	16
Fig. 18.	Mur, toit, angle de pendage d'un filon.	17
Fig. 19.	Recouvrement-éponte.	18
Fig. 20.	Plongement.	18
Fig. 21.	Extension.	18
Fig. 22.	Traversée -puissance.	19
Fig. 23.	Terminologie de la géométrie d'un gisement.	19
Fig. 24.	Schéma de l'exploitation par découverte.	23
Fig. 25.	Schéma de l'exploitation par fosse.	24
Fig. 26.	Coût selon la méthode.	26
Fig. 27.	La technique d'exploitation par chambres et piliers (modifié d'après Atlas Copco Rock DrillsAB).	29
Fig. 28.	Technique d'exploitation par tranches montantes remblayées (Source : BRGM).	30
Fig. 29.	Exemple de technique d'exploitation du sel par dissolution in situ par forage isolé (Source : modifié d'après CSME).	31
Fig. 30.	Exploitation du sel gemme en sondages par technique des pistes.	32
Fig. 31.	Exploitation du sel gemme en sondages par hydrofracturation. D'après document de J.CROIZIER CSME.	33
Fig. 32.	Technique d'exploitation par lixiviation in situ (Source : BRGM).	34
Fig. 33.	Variation du rapport de découverte en fonction de la puissance.	44
Fig. 34.	Relation entre le tonnage des fosses et la valeur.	47
Fig. 35.	Eléments d'un gradin dans une exploitation à ciel ouvert.	48
Fig. 36.	Berme de sécurité.	51
Fig. 37.	Berme de transport.	51
Fig. 38.	Terminologie relative à l'exploitation à ciel ouvert.	52
Fig. 39.	Pente de travail.	53
Fig. 40.	Angles des bords de la mine à ciel ouvert.	53
Fig. 41.	Développement de la fissuration dans l'abattage du massif rocheux.	58
Fig. 42.	Chargeuse CATERPILLAR type 988B, mine de Boukhadra 2015.	62
Fig. 43.	Camion CATERPILLAR 775F, mine de Boukhadra 2015.	64
Fig. 44.	Terril de la GECAMINE, Lumumbashi.	67
Fig. 45.	Terril de Monte Kali.	68
Fig. 46.	Monte Kali, attraction touristique.	69

Liste des tableaux		Pages
Tab. 1.	Influence de la méthode d'exploitation sur la dilution et le taux de récupération (source U.S. Bureau of Mines).	26
Tab. 2.	Tonnage for the pit Outlines. . Tonnages pour les contours possibles de la fosse.	46
Tab. 3.	Valeurs des fosses si le minerai vaut 2 \$ par tonne et si les stériles coûtent 1 \$ par tonne.	46
Tab. 4.	Variation de l'angle du talus du gradin en fonction de la nature des roches.	50
Tab. 5.	Angle du talus du gradin et du bord inexploitable.	54

INTRODUCTION

L'exploitation minière est en plein développement surtout pour certains métaux très demandés et de plus en plus rares tels que l'or. La demande mondiale de ces minerais depuis la fin du XX^{ème} siècle a conduit à la multiplication des grands projets miniers.

La découverte de gîte économique nécessite impérativement une intense exploration. Dès que les premiers indices découverts, les géologues déterminent la rentabilité du gisement à partir d'études sur sa taille et sa richesse. Si le gîte est économique, les travaux de développement et de construction des installations sont entrepris avant la réalisation de l'activité industrielle proprement dite d'extraction, et de concentration de minerais. La fermeture des installations (clôture et abandon) intervient à la fin du cycle de vie de l'opération.

Avant les années 70, les aspects environnementaux d'une opération minière n'étaient pas pris en considération et la réglementation était peu exigeante. Actuellement, le respect de l'environnement fait partie du cycle minier qui comprend dès les premières étapes (Fig. 1) des activités orientées sur la prévention (plan de fermeture) et la maîtrise des impacts résiduels (réhabilitation progressive) liés à l'existence des installations industrielles et des perturbations du milieu naturel [4].

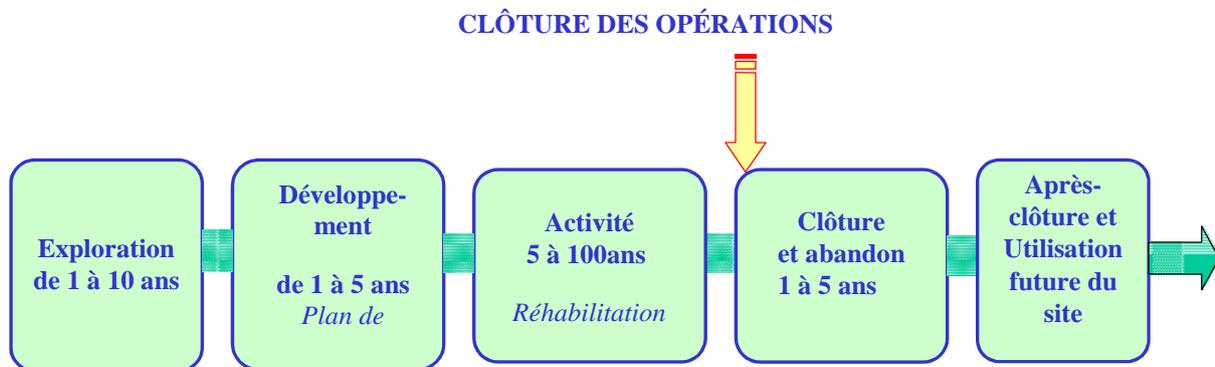


Fig. 1. Déroulement d'une opération minière.

Un processus minier englobe l'ensemble des étapes successives à réaliser pour exploiter un gisement minier (Fig.2), depuis son exploration, jusqu'à la réhabilitation du site après exploitation.

Ces étapes nécessitent de nombreuses compétences et sont ponctuées par des jalons bien définis, qui valident le déroulement du processus (Fig.3).



Fig. 2. Processus minier.

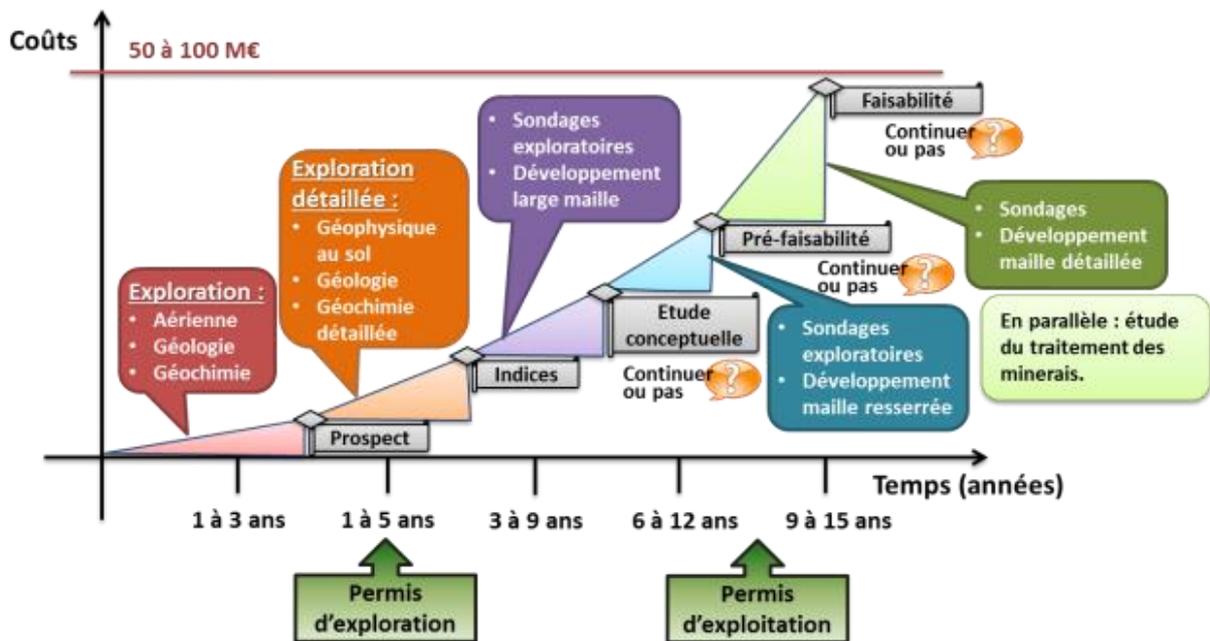


Fig.3.Processus minier : les jalons importants jusqu'à la faisabilité

Tout projet minier englobe des aspects économiques et risques à savoir :

Economie d'un projet minier

Une entreprise minière se distingue des autres entreprises par ses spécificités économiques liées aux facteurs suivants :

- ✓ le gisement : il est caractérisé par une localisation géographique imposée, une durée de vie limitée, des spécificités à intégrer dans l'exploitation (radioactivité ou minéraux à risque sanitaire (Pb, asbeste, ...)), des contraintes réglementaires ;
- ✓ le process : un système technique complexe nécessitant une main d'œuvre qualifiée,
- ✓ Les investissements : lourds et longs (aléas nombreux), nécessitant des marges importantes ;
- ✓ le marché /aval : fixe les prix et les quantités (prévisions sujet aux fluctuations très importantes), contexte international ;
- ✓ la législation / contexte géopolitique : droits miniers en fonction de l'intérêt de l'état, risques spécifiques évolutifs par pays / zone géographique.

Les risques d'un projet minier

En plus du concept de « **faisabilité technico-économique** », il est impératif de considérer le « **concept socio-économique** » dans tous les secteurs d'activités de l'industrie extractive. Les opérateurs miniers ont de plus en plus besoin d'un « **Permis Social** » des populations locales à côté de leurs permis administratifs (Permis Exclusif de Recherche : PER, Permis d'Exploitation : PEX) :

Tout projet minier doit dès le départ créer un **dialogue avec les populations locales** et intégrer la **limitation et le traitement des impacts environnementaux** des exploitations, garant de son **acceptation sociétale**.

✓ **Les risques financiers :**

L'objectif d'un projet minier ce n'est pas d'extraire « le plus de ressources », mais d'extraire des « ressources à un coût profitable ». Les risques financiers sont la résultante de tous les risques d'un projet minier. Ils intègrent **CAPEX** (dépenses d'investissement de capital) et **OPEX** (dépenses d'exploitation) et augmentent avec l'évolution du projet. Ils sont tributaires du prix de vente du produit fini [11].

✓ **Les risques techniques :**

Ils sont liés à la fiabilité des hypothèses/scénarios retenus (calcul prévisionnel des ressources/réserves, méthode d'exploitation et de traitement retenue, équipements et engins minier choisis etc.). Il ne faut pas négliger les aléas /risques accidentels : glissements/rupture brutale (rock burst) liés aux instabilités des terrains, inondation, explosion, feux, pollution (rupture de digues de stockage des résidus de traitements,etc.)

✓ **Les risques de planning :**

Ils sont liés à la planification minière, à la réalisation des travaux et à l'obtention des autorisations.

✓ **Les risques environnementaux :**

Ils sont liés aux bruits, aux poussières, à la pollution de l'air et de l'eau, aux affaissements miniers en surface.

✓ **Les risques médiatiques :**

Ces risques sont liés à l'acceptabilité du projet ou de la société minière concernée par la population locale.

✓ **Conseil:Gestion des risques miniers :**

Les points clé de la gestion des risques miniers sont :

✓ **Anticiper pour mieuxgérer :**

Pour réussir un projet d'exploitation, l'opérateur minier ne doit être ni trop optimiste, ni trop pessimiste dans ses prévisions et ses choix de cibles, procédés et méthodes :

✓ **Adopter les solutions technico-économiques et sociales en étant sélectif et en informant les communautés concernées.**



Chapitre 01

DEFINITIONS RELATIVES A L'EXPLOITATION MINIERE

DEFINITIONS RELATIVES A L'EXPLOITATION MINIERE

Les minéraux et les produits qui en sont dérivés sont à la base de la plupart des industries. L'exploitation de gisements minéraux se pratique sous une forme ou une autre dans presque tous les pays du monde ; les activités minières ont des répercussions importantes sur l'économie, l'environnement, l'emploi et la vie sociale, qui débordent les frontières des pays ou des régions où elles ont leur siège.

I-1 DEFINITIONS

1. Industrie :

- 1- Selon le dictionnaire Larousse : ensemble des activités économiques qui produisent des biens naturels par la transformation et la mise en œuvre de matières premières.
- 2- Ensemble des activités économiques qui produisent, transforment des matières premières ou de l'énergie.

Industrie minière

C'est le secteur économique qui regroupe les activités de prospection et d'exploitation de mines.

Elle concerne l'extraction des minéraux, de terres rares et des métaux dont le cuivre, le fer ou l'or. Son activité est cadrée dans la plupart des pays par un code minier.

2. Économie :

L'économie est une science qui étudie la production, la répartition, la distribution et la consommation des richesses d'une société. Son principe général, la rentabilité, consiste à consommer un minimum de moyens en vue de réaliser un maximum de profits.

3. Exploitation :

Action d'exploiter, de faire valoir en vue d'une production. Exploitation de fer, phosphate, de la houille, du sol, des ressources naturelles.

Exploiter : mettre en valeur quelque chose pour en tirer **profit**.

4. Gite (ore body) :

Concentration géologique de minerai [14].

5. Corps minéralisé (mineralized zone, ore body)

Partie de gisement dans laquelle le minerai est présent on dit aussi formation minéralisée.

6. Gisement (deposit)

Gite ou partie de gite valorisable par une exploitation. Un gisement comprend généralement des zones minéralisées et des zones stériles [14].

En géologie et dans le domaine de l'industrie minière ou pétrolière, un gisement est une **concentration** d'une ressource naturelle dans le sol ou le sous-sol que l'on peut exploiter en construisant une mine à ciel ouvert, souterraine et/ou des puits de forage.

- Gisement de gaz,
- Gisement pétrolifère.
- Gisement de fer, or, phosphate,...

Un gisement est une **accumulation naturelle**, locale de matière minérale (solide, liquide, ou gazeuse) susceptible d'être exploiter.

Un gisement minier est une accumulation naturelle de minerais de laquelle une matière première peut être extraite. dans le but de faire du **profit**

7. Minerai (ore)

Roche présentant une concentration anormalement élevée en minéraux utiles. Un minerai peut contenir également des minéraux sans valeur qui constituent la gangue [14].

Selon l'Institute of Mining of Metallurgy en Grande Bretagne :

«Un **minerai** est une accumulation naturelle de minéraux d'intérêts économiques, de laquelle un ou plusieurs constituants utilisables peuvent être extraits ».

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

- On appelle **gisement** de **minéraux utiles** et des **matières premières** la partie de l'écorce terrestre au sein duquel, à la suite de divers processus géologiques, s'est accumulée de la matière minérale dont la quantité, la qualité et les conditions de gisement rendent possible l'**exploitation** et le **traitement**.

- Les gisements sont une partie intégrante et très importante de l'**économie** de production.

La matière première qui est utilisée pour les besoins industriels, ou dans le but d'extraire les **composés chimiques naturels** ou des **éléments indispensables** à l'économie nationale est appelée **mineraï**.

8. Gangue (gangue, matrix)

Minéral ou roche sans valeur associé au mineraï.

9. Terrains encaissant (country rocks)

Roche ou sol dans lequel la substance utile s'est mise en place .On parle aussi de roche-hôte quand il y'a eu migration avant piégeage de la minéralisation.

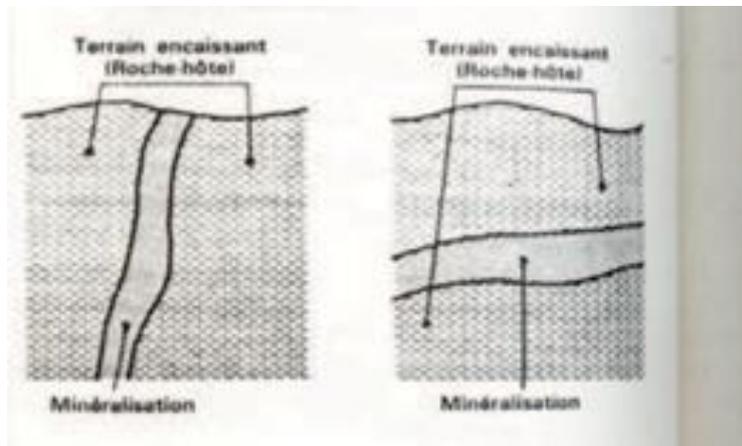


Fig.4.Terrain encaissant.

10. Recouvrement (Overburden)

Terrain stérile qui doit être excavé pour atteindre le mineraï .On dit aussi « morts-terrains ».

11. Salbande (Clay gouge, clay band)

Remplissage argileux généralement situé aux épontes.

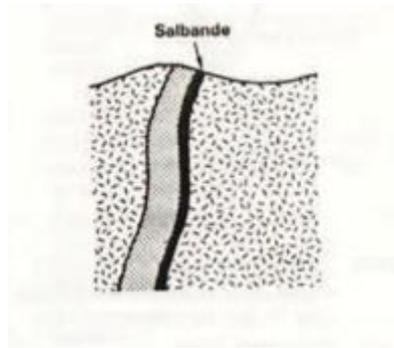


Fig.5.Représentation d'une salbande.

12. Intercalaire (Intermixedwaste)

Zone stérile continue située à l'intérieur d'une formation minéralisée.

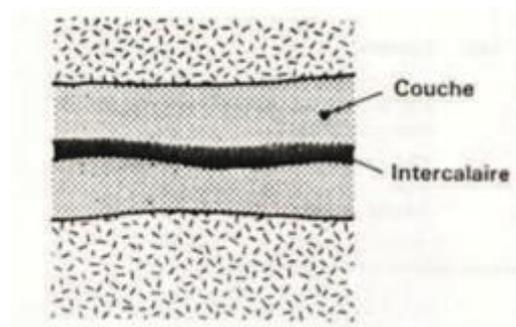


Fig.6.Représentation d'un intercalaire.

13. Clauses industrielles

Les réserves minimales et la teneur minimale en composants de valeur, de même que la quantité maximale admissible des éléments nuisibles dans la matière première rendent possible l'exploitation des gisements des minéraux utiles, sont inclus sous le terme de clauses industrielles qui n'ont rien d'absolu et ne sont pas fixées une fois pour toutes.

Plus des minerais de moins en moins riches et les exigences envers la qualité des matières premières minérales ont diminué.

Exemple : La teneur en cuivre du minerai extrait au début du 19^{ème} siècle s'élevait à 10%, a diminué comme suite.

1881- 1890 5 %

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

1901 – 1910	3.8 %
1921 – 1930	1.5 %
1951 1980	0.8 %
Vers 2000	0.4 %

13. Economie Minière

Il est essentiel de voir en quoi diffère l'exploitation minière des autres secteurs tels que l'agriculture et la pêche

Facteurs Economiques De Bases : On A 5 Facteurs

1. Les gisements ne sont pas renouvelables ;
2. Les gisements sont très irrégulièrement distribués (la nature impose la localisation des gisements et le potentiel d'une région) ;
3. L'industrie minière s'accompagne d'un très haut risques de pertes financières ;
4. Il peut s'écouler une durée très longue entre la découverte et la mise en production ;
5. Les gisements minéraux contiennent presque toujours les sous produits valorisables.

La place que le secteur minier a toujours occupé une place importante cela s'explique d'abord par l'existence d'un contexte géologique extrêmement variée qui a favorisé la genèse de plusieurs types de gisements.

14. Produits miniers

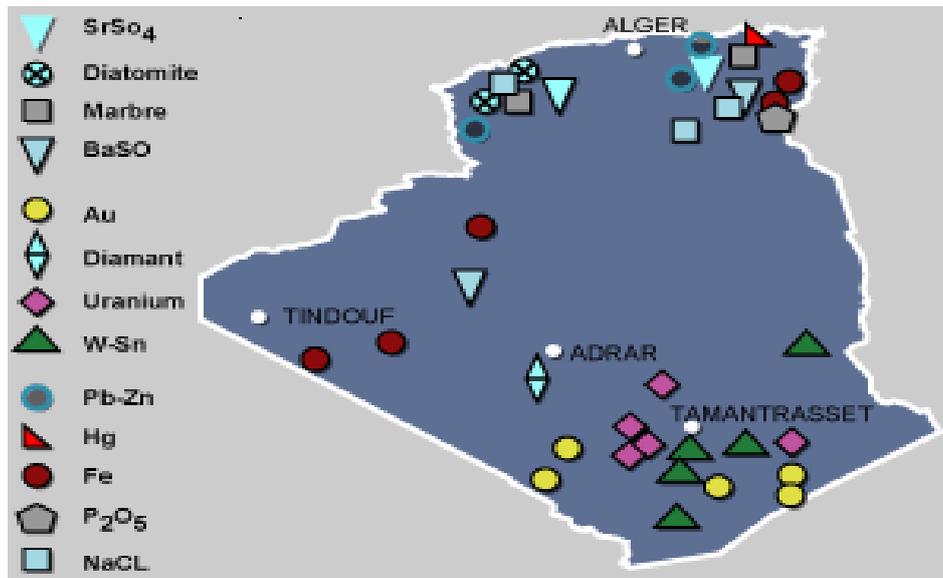


Fig.7. Répartition des ressources minières sur le territoire Algérien, 2009.

Selon les **statistiques** du site officiel du ministère de l'énergie et des mines publiés en **2009** plusieurs produits marchands à partir des substances minérales ont été extraits, on cite quelques exemples : fer, phosphate, or, baryte, marbre,...etc.

I-2 CLASSIFICATION DES GISEMENTS

Le mineur définit les principaux types de gisements en fonction de la géométrie (enveloppe spatiale) et la position du corps minéralisé par rapport au plan horizontal :

I-2-1 Morphologie des corps de minerais

La forme des gisements, leurs dimensions, dépendent fortement de leur origine.

Elles influent aussi très nettement sur les méthodes d'exploitation du minerai.

Les colonnes minéralisées ont naturellement 3 dimensions dans l'espace. Suivant les rapports de ces 3 dimensions, on peut distinguer trois types de formes [8] :

- isométriques dont les 3 dimensions sont à peu près égales (**amas** et nids, poches et boules, **lentilles**) ;
- corps ayant la forme de colonnes, dont l'une des dimensions est beaucoup plus Grande que les deux autres (longueur dépasse largeur et puissance). Ils se rencontrent assez rarement et se sont toujours formés après les roches encaissantes ;

➤ corps ayant la forme de dalles, dont deux dimensions sont grandes (longueur et largeur) et la troisième (puissance) est petite. **Les filons, les couches** et les lames en font partis.

Remarque 1 : cette distinction et ces dénominations sont très arbitraires et ne correspondent pas toujours avec la réalité, mais elles sont pratiques. En effet, on rencontre dans la nature des formes de corps de minerais très compliquées, qui ne correspondent à aucun des trois premiers types. Parmi les nombreux corps compliqués, les plus typiques sont les « **stockwerks** ».

Ils sont constitués par un véritable réseau entrecroisé de petits filons et filets de minerais, dont l'ensemble a une forme générale isométrique. Ils sont caractéristiques de nombreux gisements d'uranium, d'étain, d'or, de cuivre,....

- **Stockwerk** mot d'origine allemande, de même signification ; en anglais stockwork : Type de minéralisation se présentant sous la forme d'un réseau très densifié de petits filons.
- Certains minerais se présentent sous forme de corps **massifs**, tandis que d'autres sont **disséminés**.
- Les minerais **massifs** sont caractéristiques du fer, du chrome, du cuivre, du plomb, du zinc, du manganèse, du graphite et du soufre.
- Les minerais **disséminés** sont caractéristiques de l'or, de l'argent, du platine, du molybdène, du wolfram, de l'étain, du nickel, du cobalt, du mercure, ...

Remarque 2 : étant donné que les gisements de minerais sont étroitement liés aux massifs rocheux, il est naturel qu'ils subissent, de même que les roches, l'influence des processus de plissement et celle des diverses irrégularités de dislocation. On rencontre donc fréquemment, dans les gisements, des **discontinuités** dues à des failles.

I-2-2 Eléments de classification des gisements

Les gisements peuvent être classés selon la forme, l'angle de pendage, la puissance,...

A- Classification selon la forme

Dans la nature, les minerais se rencontrent, quelle que soit leur origine, principalement sous trois formes et qui sont :

- Les amas,
- Les filons,
- Les couches.

a- Filons (lode, vein)

On parle de filon, lorsque la masse minérale **remplit** une fente de roche. Il est encaissé dans des roches formées antérieurement au phénomène de remplissage de la fente par la matière minéralisée. Par exemple, les filons hydrothermaux résultent du remplissage de fissures ou de cavités par une précipitation de substances amenées par une circulation d'eaux thermales.

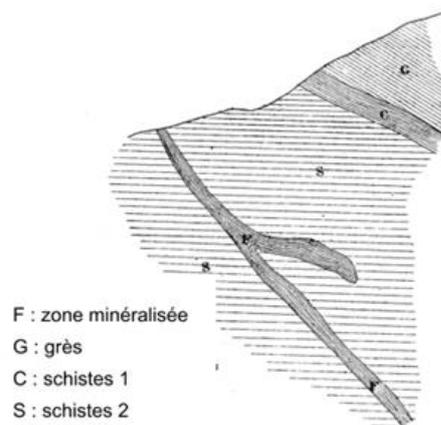
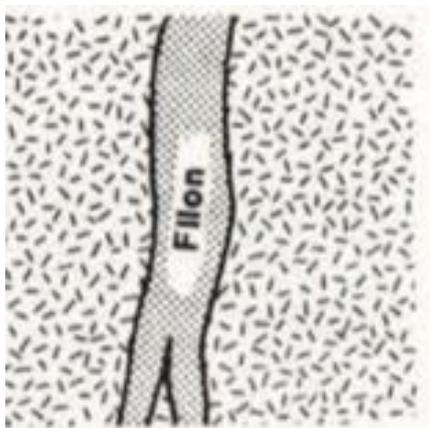


Fig.8. a.Coupe d'un filon

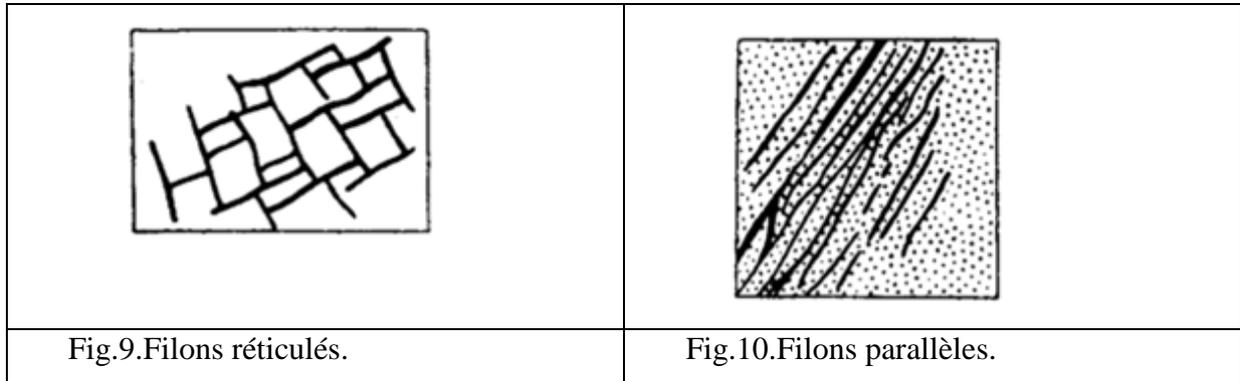
b.Coupe d'un filon de cuivre en Allemagne.

Remarque 3 : les modes de répartition du minerai dans les gisements filoniens peuvent être envisagés pour classer les gisements filoniens ;

Habituellement dans un corps de minerai, on rencontre plusieurs colonnes minéralisées qui ont des formes, des dimensions et des volumes plus ou moins égaux, et qui sont séparées par des intervalles à peu près réguliers. Il existe des séries de filons parallèles

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

(Fig.10), les champs de filons réticulés (Fig.9, les filons se recoupent suivant toutes les directions possibles), les filons rayonnants (les éléments convergent vers un même point).



b- Couches (layer, seam, bed)

Une couche, est un corps minéralisé en forme de dalle, **d'origine sédimentaire**, qui est séparé des autres roches par les surfaces planes de stratification, **les épontes**.

Les couches sont des formations qui se sont constituées en même temps que les roches qui les contiennent, ce qui les différencie des filons. Elles peuvent avoir subi des plissements lors de leur histoire.

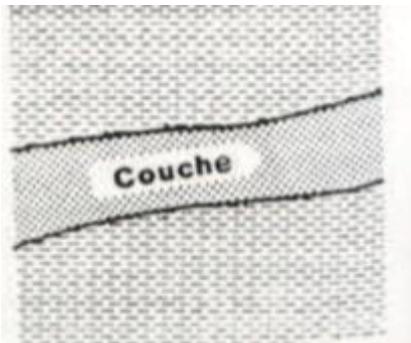


Fig.11.Couche.

c- Amas(ore mass, ore body)

C'est un gisement qui s'étend dans les trois dimensions, par opposition aux couches et aux filons (deux dimensions).

On appelle **amas** les gisements de forme quelconque dont toutes les dimensions sont du même ordre de grandeur, lentille (amas aplati), et colonne (la dimension verticale prédomine sur longueur et largeur ; aussi appelé « pipe » ou « cheminée » [8].

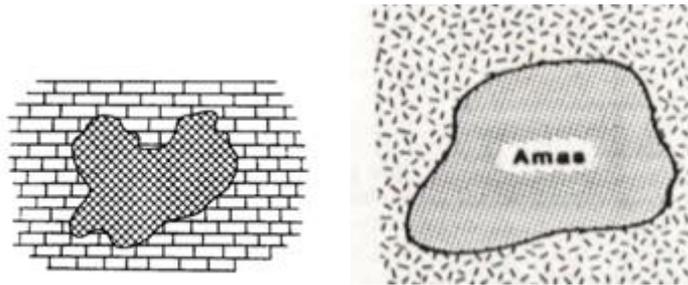


Fig.12.Vue en plan d'un amas.

Un amas se révèle en surface, soit par les affleurements de sa masse principale, soit par ceux de masses minérales moins importantes avec lesquelles il est plus ou moins en relation [9].

Un amas existe rarement seul, il est presque toujours accompagné d'autres masses plus ou moins exploitables.

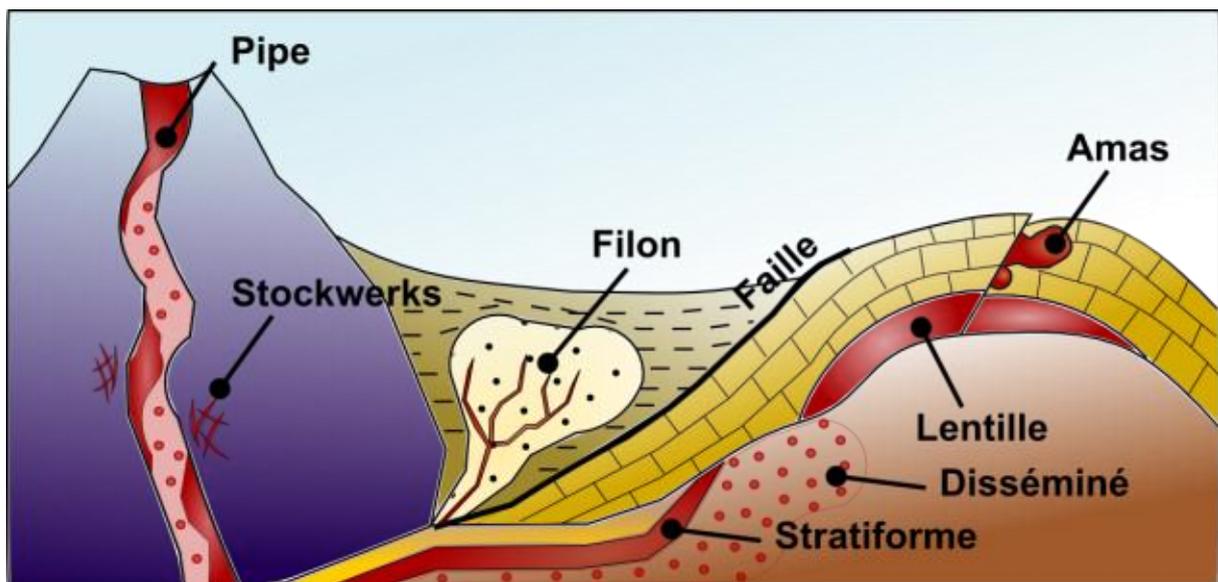


Fig.13.Quelques exemples de types de gisements.

Dans la figure ci-dessus outre les gisements définis précédemment on cite

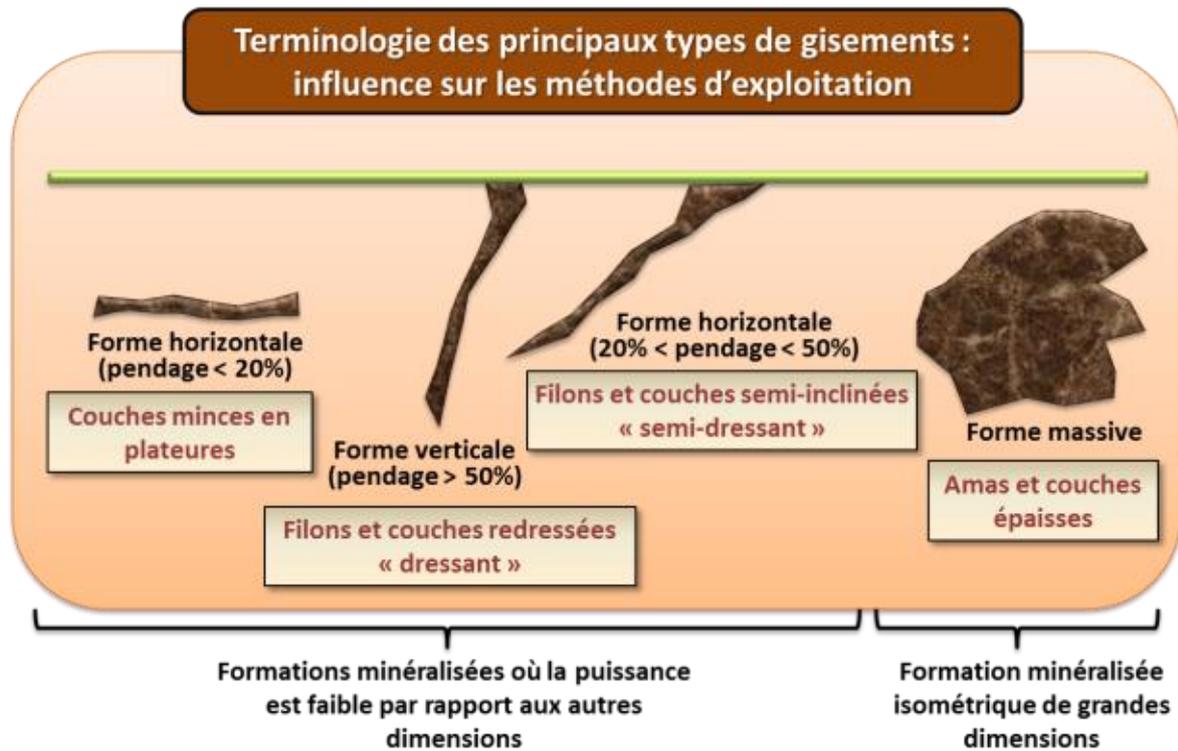


Fig.14 .Principaux types de gisements et méthodes d'exploitation.

B- Classification selon l'angle de pendage

On définit d'abord le **pendage** (dip)

Angle du plan moyen du gisement avec l'horizontale. C'est l'angle entre une surface (couche, plan de schistosité,...) et un plan horizontal.

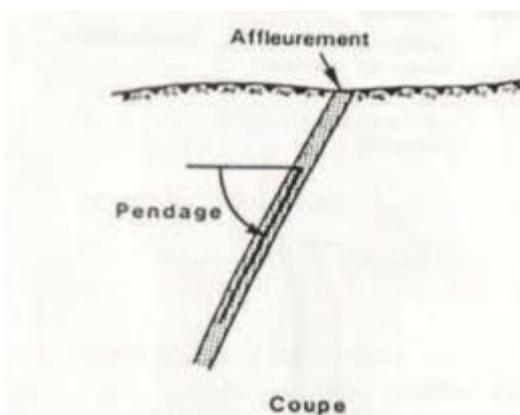


Fig.15.Angle de pendage.

Le pendage d'un gisement de minerai désigne l'angle entre le plan horizontal et le plus grand plan inscriptible dans le gisement [1].

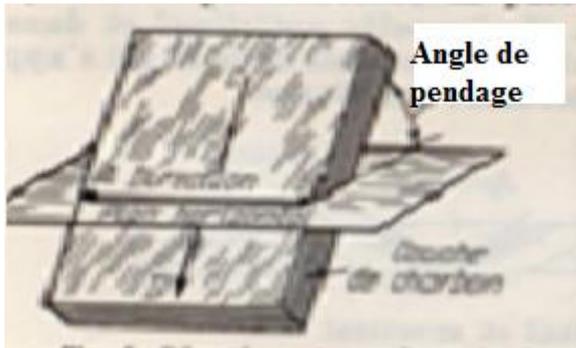


Fig.16.Angle de pendage d'une couche.

On distingue une classification des gisements selon l'angle de pendage comme suit :

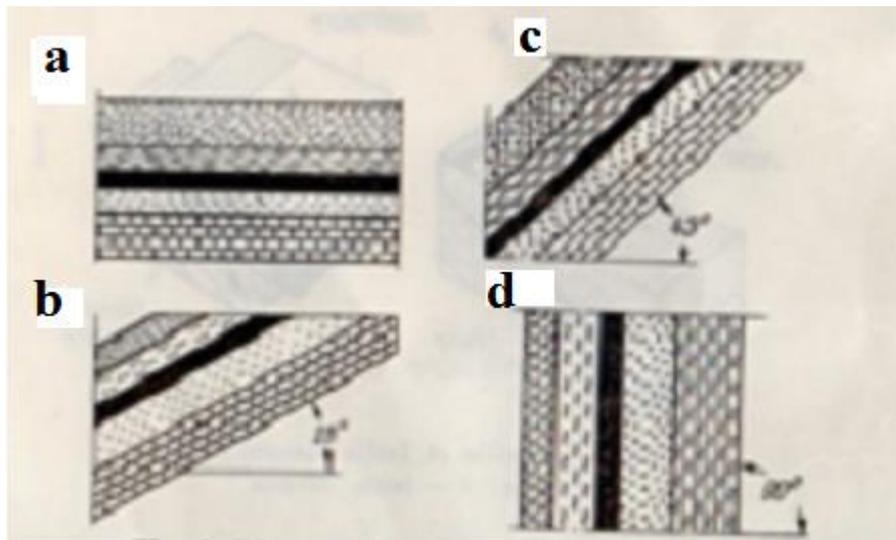


Fig. 17 .Divers angles de pendage de la couche.

➤ **Gisement inclinés faiblement ou plateurs (plats):**

dont l'angle de pendage est de 0° à 25° (Fig.6, a , b).

➤ **Gisements semi- dressant :**

dont l'angle de pendage varie entre 25° à 45° (Fig.6,c).

➤ **Gisement dressant :**

dont l'angle de pendage est supérieur à 45° à 90° (Fig.6,d).

I-2-3 Mur toit et puissance d'un gisement

Pour définir ces éléments on propose :

a- Eponte (wall)

Surface séparant le minerais du stérile. Par extension, terrains stériles au contact du minerais

b- **Mur** (foot-wall)

Épente située au dessous du minerai .Au sens géologique, et dans le cas d'une couche, le mur désigne l'épente de formation plus ancienne que le minerai ; le mur géologique coïncide avec le mur du mineur à moins que des mouvements de terrains n'aient renversé la série stratigraphique.

Pour un mineur ce terme désigne la surface inférieure d'une formation, ou bien les terrains situés immédiatement sous elle. Ex. le mur d'un filon, d'une couche.

c- **Toit** (hangingwall)

Épente située au-dessus du minerai. Au sens géologique, et dans le cas d'une couche, le toit désigne l'épente de formation plus récente ; le toit géologique coïncide avec le toit du mineur, à moins que des mouvements de terrains n'aient renversé la série stratigraphique.

Pour un mineur ce terme la surface supérieure d'une formation, ou bien les terrains la surmontant immédiatement. Ex. le toit d'un filon, d'une couche.

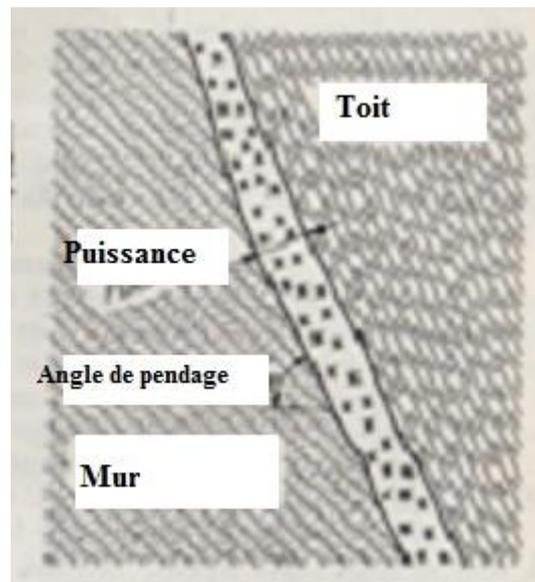


Fig.18. Mur, toit, angle de pendage d'un filon.

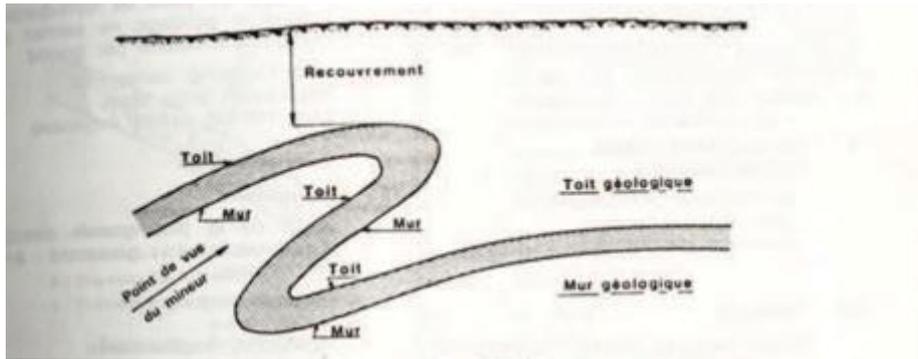


Fig.19. Recouvrement-éponge.

I-2-4 Terminologie de la géométrie d'un gisement.

On définit également :

a- **Plongement** (plunge, strike)

Angle de la plus grande direction d'extension du gisement avec l'horizontale.

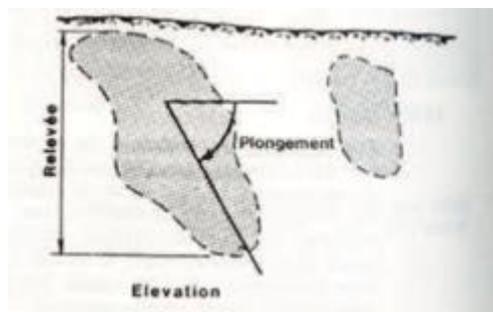


Fig. 20. Plongement.

b- **Extension** (horizontal extent.)

Distance horizontale mesurant le gisement suivant une direction donnée.

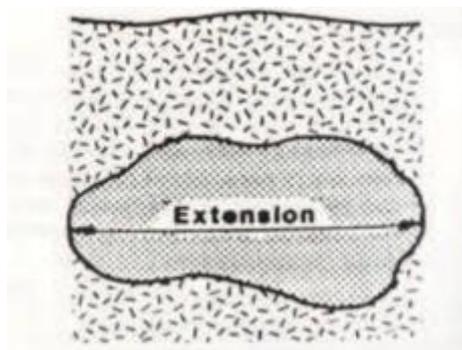


Fig. 21. Extension.

c- **Puissance** (thickness)

Epaisseur du gisement entre le toit et le mur, mesurée perpendiculairement aux épontes.

d- **Traversée** (spacing , intersection)

Distance entre les épontes (horizontale, verticale, ou le long du sondage).

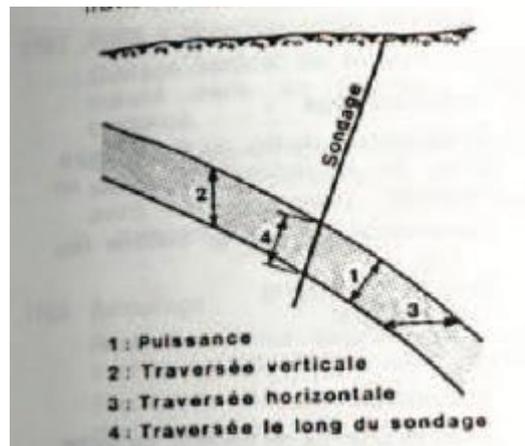


Fig. 22.Traversée-puissance.

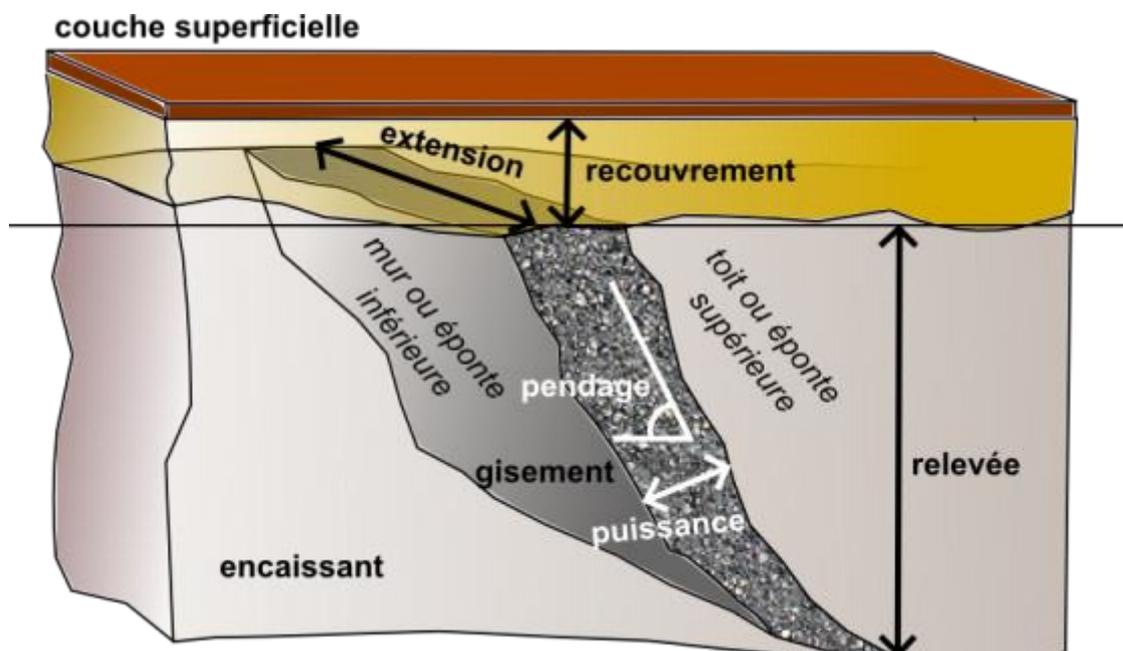


Fig.23.Terminologie de la géométrie d'un gisement.

I-3- LES DIFFERENTES TECHNIQUES D'EXPLOITATION MINIERE

L'exploitation d'une mine consiste à extraire des roches ou minerais qui ont un intérêt économique. Il existe plusieurs techniques d'exploitation minière qui peuvent être réparties en trois grandes familles :

- La mine à ciel ouvert ;
- La mine souterraine ;
- L'exploitation par dissolution et la lixiviation *in situ*.

En complément, une quatrième famille peut être définie, elle concerne l'exploitation des placers qui est très spécifique même si elle reste du type ciel ouvert [10].

l'exploitation minière de placers est une méthode particulière d'exploitation minière lorsque le gisement de minerai de valeur (diamant, pépites d'or, etc.) s'est accumulé dans des sédiments alluviaux.

Le terme «placers» est de dérivation espagnol et a été utilisé par les mineurs espagnols au Nord et Amérique du Sud comme un nom pour les gisements d'or trouvés dans les sables et graviers des ruisseaux. A l'origine, il semble avoir voulu dire «banc de sable» ou «une place dans un cours d'eau où l'or a été déposé». Alors que de nombreux autres termes ont été inventés pour les dépôts en résidus altérés et alluvions n'est tout aussi succincte et expressive comme «placers».

On retient alors que placers désigne : dépôts de sable ou de gravier contenant des particules de minerai (or, gemmes ou autres métaux lourds de valeur).

L'exploitation des placers est souvent utilisée pour extraire l'or.

La décision d'exploiter un gisement en ciel ouvert ou en souterrain est principalement dictée par le **coût de revient de l'unité de minerai marchand**.

Ce coût dépend de plusieurs facteurs :

- la situation géographique,
- le type de gisement,
- la géométrie,
- la position spatiale,
- la situation hydrogéologique,

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

- la quantité de minerai,
- la quantité de stérile de recouvrement,
- le cours des éléments valorisables.

Avantages de l'exploitation minière à ciel ouvert

Il y a un certain nombre d'avantages de l'exploitation minière à ciel ouvert par rapport à l'exploitation minière souterraine [7]:

- à ciel ouvert peuvent parfois être mis en production rapidement.
- de plus grandes possibilités de mécanisation de l'utilisation d'équipement d'exploitation minière de grandes dimensions, puissants et très efficace de plus grandes possibilités de mécanisation de l'utilisation d'équipement d'exploitation minière de grandes dimensions, puissants et très efficace de :
 - ❖ 270 tonnes camions de capacité (500 tonnes)
 - ❖ 170 m³ la capacité des godets draglines
 - ❖ 140 m³ la capacité des godets de pelles à 8400 m³/h capacité des godets, godet pelles sur pneus
- l'efficacité du travail plus la production par homme 5-6 fois plus élevée
- moins de 25 à 30 % des coûts d'exploitation minière de la mine (U/g par tonne de minerai)
- La possibilité d'augmentation plus rapide de la production de minéraux, le plus élevé de leur rétablissement
- La liberté de mouvement l'amélioration des conditions de travail et d'hygiène.

A- L'exploitation à ciel ouvert (Mine à Ciel Ouvert MCO ou « *open pit, open cast, open cut* » en anglais)

L'exploitation à ciel ouvert consiste à enlever les stériles de recouvrement et à accéder au gisement à partir du jour. On l'appelle également découverte.

Elle consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée en surface après avoir enlevé les matériaux stériles qui le surmontent. Les MCO concernent habituellement

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

l'exploitation de parties de gisement situées proches de la surface topographique (typiquement entre 0 et 400 m de profondeur) [10].

Cette exploitation à ciel ouvert est généralement décidée selon le rapport de découverte (nommé également taux de découverte, ratio de découverte, taux de recouvrement).

Après les travaux de décapage qui consistent à enlever les horizons superficiels, il est nécessaire de réaliser les travaux de découverte qui concernent la partie stérile de la roche renfermant le minerai.

Lorsque le taux de découverte devient trop important, une exploitation à ciel ouvert n'est plus rentable [4].

On distingue classiquement, selon la disposition des zones minéralisées :

- Exploitation en découverte : C'est une exploitation à ciel ouvert, dont l'extension est prépondérante par rapport à la profondeur, réalisée par la méthode des tranches horizontales simultanées.
- Exploitation en fosse :

Une fosse est une excavation résultant d'une exploitation à ciel ouvert (entonnoir). Diffère de « fouille » et « déblai » par la taille considérablement supérieure, et de « découverte », par une extension verticale plus importante et des méthodes d'exploitation différentes.

Les exploitations à ciel ouvert nécessitent généralement des engins de chantier aux gabarits importants et peu communs aux autres secteurs de l'industrie (pelles, roues-pelles, draglines, tombereaux, foreuses).

a- Exploitation par découverte (stripmining)



Fig. 24. Schéma de l'exploitation par découverte.

①	Front d'exploitation du minerai
②	Minerai
③	Front de découverte
④	Terrain stérile
⑤	Remblais

Cette méthode s'applique aux gisements stratiformes, peu profonds et s'étendant fortement horizontalement. Une tranchée ouverte est créée dans le recouvrement stérile sur la largeur totale à exploiter (elle est élargie progressivement vers les extrémités qui constituent le front de découverte) jusqu'au début de la surface de minéralisation : c'est la découverte. Ce procédé est continu, l'extraction et l'évacuation s'enchaînant.

L'exploitation du minerai se fait à partir d'une tranche initiale qui progresse parallèlement à la découverte (front d'exploitation), les stériles étant remis en place au fur et à mesure pour combler l'excavation (front de remblayage). Le matériel utilisé est divers : pelles, camions, draglines, pelles mécaniques, racleurs, etc.

b- Exploitation par fosse (open pitmining)

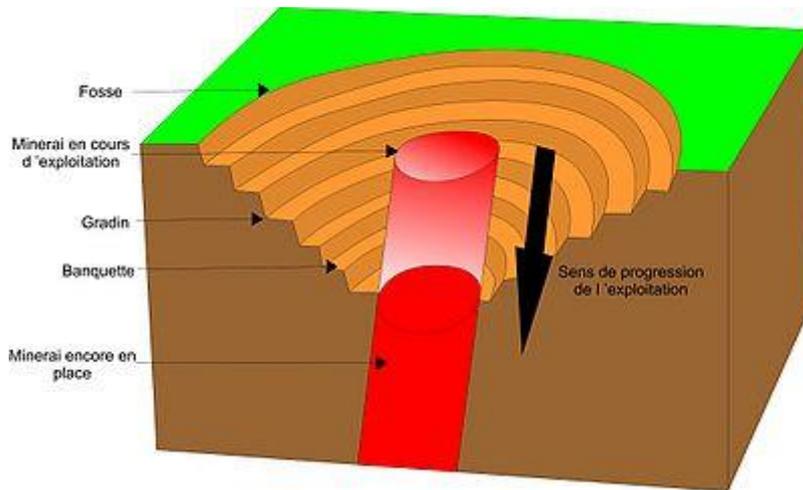


Fig.25.Schéma de

l'exploitation par fosse.

Elle s'applique lorsque le gisement s'enfonce dans le sous-sol avec une extension latérale réduite.

Cette méthode s'applique à l'extraction de minerai encaissé dans des roches dures, disséminé ou en veines profondes avec une extension latérale réduite. Elle est réservée aux filons, aux couches fortement pentées et aux amas. Ainsi, dans ce type d'exploitation, la découverte va porter sur tout le volume du cône qui constitue la fosse. Tous les matériaux stériles sont évacués hors de la fosse et stockés (pour remblayer éventuellement le trou). Les parois de la fosse, pour des raisons de sécurité, doivent avoir une inclinaison horizontale limitée entre 30° et 70°, cette valeur variant selon la nature de la roche. Seulement, le taux de découverte va s'accroître très vite avec la profondeur (plus la profondeur augmente, plus le cône augmente, influant fortement sur la découverte totale), ce qui limite l'intérêt économique de la méthode.

B- l'exploitation souterraine (Travaux Miniers Souterrains : TMS)

Cette technique d'exploitation concerne les ressources minérales **à forte valeur ajoutée** car elle est plus coûteuse.

Elle consiste à exploiter le minerai depuis une excavation créée sous la surface du sol, en souterrain, dans ce cas il n'est pas nécessaire d'enlever l'ensemble des matériaux stériles qui le surmontent.

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

Dans une exploitation souterraine, pour accéder au gisement il est nécessaire d'enlever une quantité minimale de morts-terrains qui correspond aux travaux d'ossature (tels que : descenderies, galeries, puits,..). Ces derniers permettent d'accéder au minerai et de mettre en place toutes les infrastructures afin d'assurer la ventilation, l'exhaure des eaux, l'accès du personnel et l'évacuation du minerai .Le choix entre les différentes techniques d'exploitation souterraine dépend des facteurs suivants:

- Géométrie du corps minéralisé (couche, amas, filon, subhorizontal, subvertical, épais, mince, profond);
- Compétence du minerai (friable, résistant);
- Nature de l'encaissant et sa délimitation avec le minerai (épointes franches avec coupe argileuse, éponte diffuses);
- Fracturation.

En complément, l'occupation de la surface et la géographie du site, le savoir-faire de l'exploitant (ou l'historique minier du site) et les objectifs économiques peuvent également intervenir dans le choix de la méthode d'exploitation souterraine.

Bien que chaque mine soit un cas particulier, il demeure impératif dans une exploitation de rechercher de la rentabilité et de la sécurité à travers un ensemble de techniques pour procéder à l'abattage du minerai dans le respect de l'environnement.

Selon le type de traitement de zones excavées après exploitation, On distingue classiquement [10] :

- Méthodes d'exploitation souterraine laissant des vides résiduels ;
- Méthodes visant à supprimer les vides résiduels après exploitation, soit par remblayage, soit par foudroyage (éboulement de roches, épontes et recouvrement au sein de la cavité).

La sélection de la méthode d'exploitation et de ses variantes prend également en compte les caractéristiques mécaniques des matériaux (le minerai et l'encaissant) et les priorités déterminées en terme de coût de production, taux de récupération ou sélectivité [13].

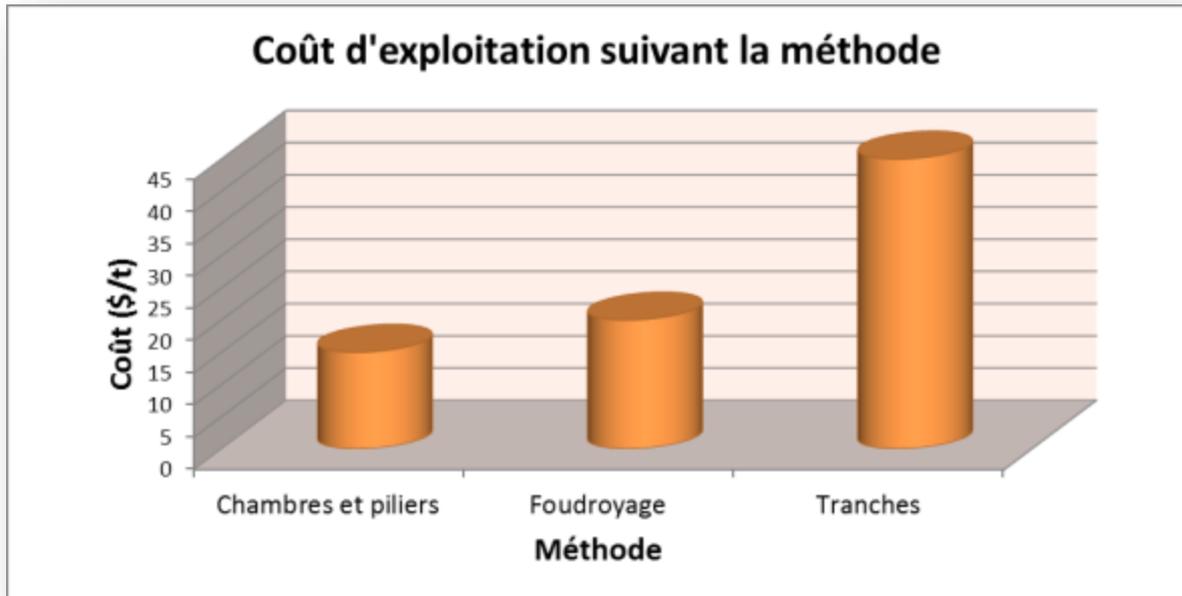


Fig.26.Coût selon la méthode.

Le taux de récupération, la dilution et le salissage ont une grande influence sur le rendement et la rentabilité de l'opération. Les objectifs fixés pour ces valeurs, déterminent la méthode de l'exploitation et sa variante.

Tab.1. Influence de la méthode d'exploitation sur la dilution et le taux de récupération (source U.S. Bureau of Mines).

<i>Influence de la méthode d'exploitation sur la dilution et le taux de récupération (source U.S. Bureau of Mines)</i>		
Chambres et piliers, non remblayée	10%	75%
Chambres et piliers, remblayée	10%	95%
Foudroyage	15%	90%
Tranches remblayées	5%	85%

Les principales opérations en TMS sont :

- Travaux préparatifs d'accès (descenderie et puits),
- Abattage : il peut être à l'explosif ou mécanique (scies, machines à attaque ponctuelle ou mineur continu) ,

➤ Purge et soutènement : il s'agit de sécuriser le site après les tirs afin de faciliter les étapes suivantes (des pinces à purger notamment),

- Chargement/transport (Marinage : déblayage),
- Exhaure,
- Aérage,
- Remblayage.

B-1 Méthodes conservant des vides résiduels après exploitation

Plusieurs méthodes peuvent être groupées dans cette famille, notamment celles :

- Par chambres et piliers abandonnés ;
- Par chambres-magasins (vides) ;
- Par sous-niveaux abattus.

Une des méthodes les plus répandus de cette famille est celle des chambres et piliers abandonnés,

B-1-1 L'exploitation par chambres et piliers (« room and pillar ») :

Méthode d'exploitation souterraine qui consiste à abattre et extraire les couches de minerai sur une grande surface entre toit et mur, en laissant, au moins temporairement des piliers qui évitent, par leur disposition et leur nombre, l'effondrement des terrains sus-jacents.

En fonction du traitement des piliers ou des chambres au cours de l'exploitation, on parle de chambres et piliers abandonnés, chambres et piliers foudroyés, chambres et piliers remblayés.

Elle s'applique pour tous les types de gisements mais principalement aux formations d'origine sédimentaire dont le pendage ne dépasse pas une vingtaine de degrés.

Principe de la méthode des chambres et piliers [13] :

- Ouvrir des chambres (stopes, rooms)
- Laisser des piliers (pillars)
 - ✓ Circulaires
 - ✓ Carrés
 - ✓ Murs longitudinaux
- Fin d'exploitation
 - ✓ Remblayer, foudroyer

Chapitre I ————— Définitions Relatives A L'exploitation Minière

Généralement l'abattage du minerai se fait par foration puis tirs de mine pour fragmenter et ébouler la partie qui va être extraite (Fig.27). Des vides (ou chambres) sont ainsi créés et séparés par des piliers de minerai laissés en place qui supportent, au moins temporairement, le poids des terrains sus-jacents et assurent la stabilité globale de la mine. Les chambres servent ensuite de voies de roulage pour le transport du minerai par camions ou par bande transporteuse. La mécanisation est très importante dans ce type d'exploitation et les volumes créés permettent l'utilisation d'engins de chantier classiques (camions à benne basculante, jumbos, chargeuses).

Dans le cas de galeries de faible hauteur (3 m), des chargeuses et des camions spécialement adaptés peuvent être utilisés. Le taux de défrètement (égal au rapport entre la quantité de minerai laissée en place et celle extraite) d'une exploitation par chambres et piliers varie généralement entre 40% et 75% mais reste dépendant de la compétence du minerai vis-à-vis de la profondeur : le taux diminuant lorsque le minerai est peu résistant (piliers plus importants) et/ou lorsque la mine s'approfondit.

Si la stabilité locale n'est pas assurée le toit des chambres et des galeries peut être boulonné. Le dimensionnement des ouvrages souterrains (piliers notamment) est essentiel.

Dans le cas de piliers instables (fracturation, vieillissement, effet de l'eau, etc.) leur renforcement, par remblayage des chambres notamment, est parfois nécessaire pour remédier à cet impact. Une autre solution consistant à détruire les piliers (foudroyage) est parfois envisagée selon les cas d'occupation de la surface.

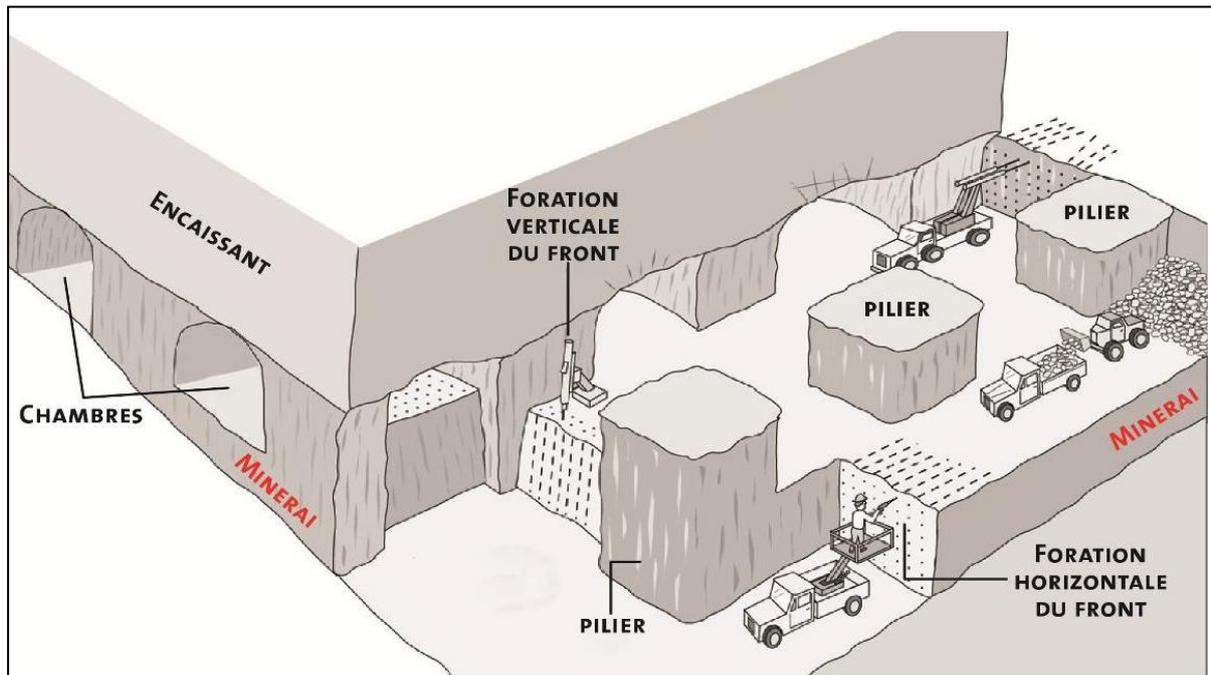


Fig. 27. La technique d'exploitation par chambres et piliers (modifié d'après Atlas Copco Rock DrillsAB).

B-2 Méthodes supprimant les vides résiduels après exploitation souterraine :

On cite les méthodes :

- par chambres remblayées et piliers abandonnés ;
- par chambres et piliers foudroyés ;
- par chambres-magasins remblayées ;
- par tranches montantes remblayées ;
- par sous-niveaux foudroyés ;
- par blocs foudroyés ;
- par tailles.

La méthode par tranches montantes remblayées sera donnée comme exemple en détail.

L'extraction par tranches montantes remblayées (« *cut and fill* » Fig.28) est particulièrement adaptée à l'exploitation des filons de faible puissance et à fort pendage, encaissés dans un massif rocheux stable. Le minerai est abattu et déblayé par tranches horizontales, prises en montant. Cette technique permet généralement une bonne sélectivité du minerai et un excellent taux de récupération. Les vides sont remblayés progressivement (avec les stériles des galeries d'ossature ou résidus de l'unité de traitement) pour permettre d'élaborer un plancher de travail à la tranche suivante. L'abattage du minerai peut se faire par:

- ✓ Gradins renversés : les vides sont remblayés avec des matériaux secs ou humides. Le minerai est abattu en montant, par tranches de 3 à 4 m d'épaisseur et par des trous de mine verticaux forés à l'aide de perforatrices montées sur chariot ;
- ✓ Abattage du front : les vides sont remblayés avec du sable, de façon quasi complète, le sable formant une surface suffisamment dure pour la circulation des engins sur pneus à la tranche suivante. L'exploitation est entièrement mécanisée, avec forage par jumbos et déblocage par chargeuses.

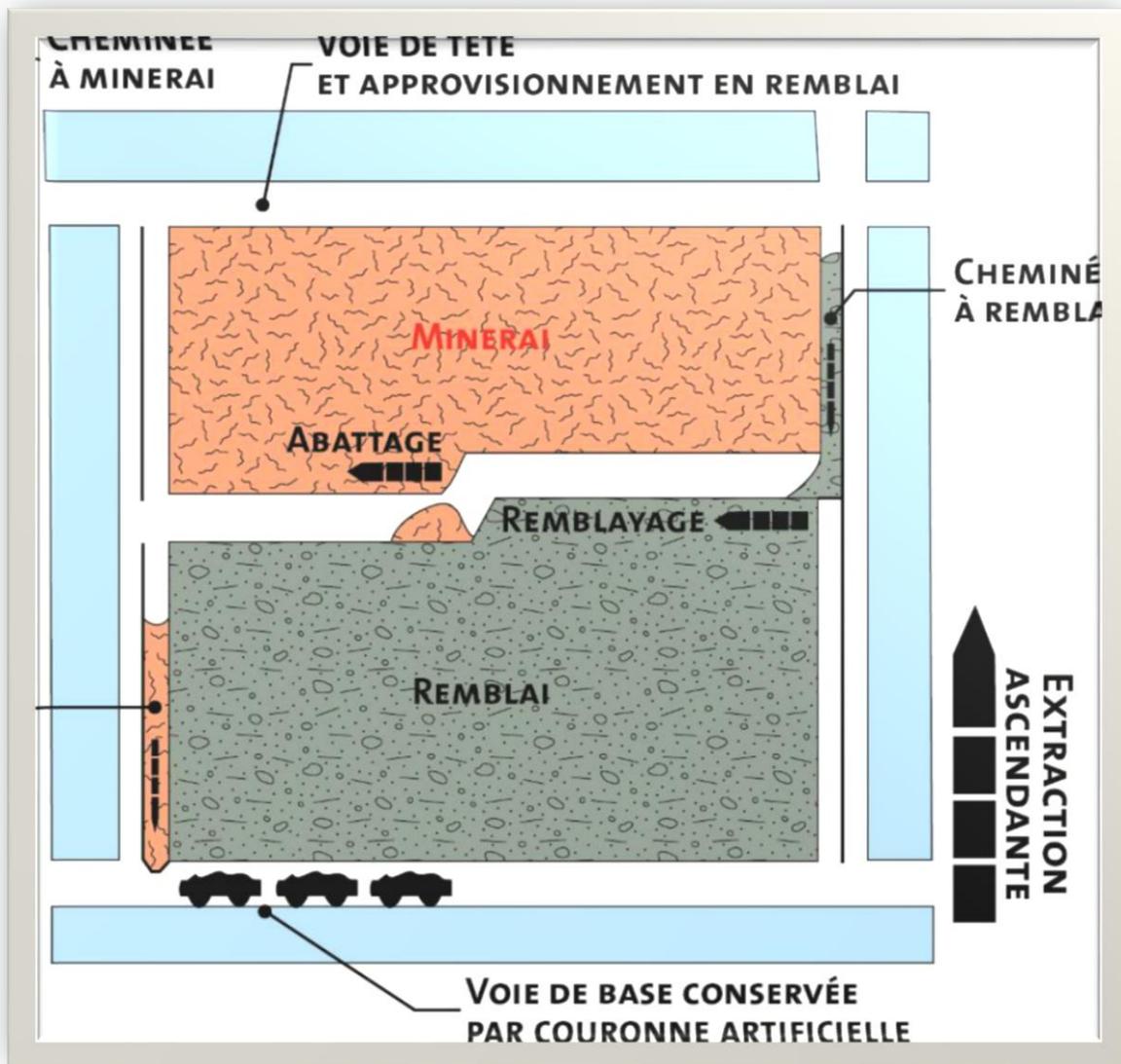


Fig. 28. Technique d'exploitation par tranches montantes remblayées (Source : BRGM).

C- L'exploitation par dissolution et la lixiviation in situ.

C-1 Exploitation par Dissolution

Cette technique est spécifique aux minerais solubles et concerne donc particulièrement les exploitations de sel gemme.

Le principe est simple : on réalise un forage par lequel on injecte de l'eau douce dans la couche de sel (Fig.29). Ce dernier se dissout dans l'eau injectée et il ne reste plus qu'à pomper ensuite la saumure ainsi obtenue qui est saturée à environ 300 grammes par litre. Celle-ci peut être ensuite canalisée vers une usine de traitement non nécessairement située sur le site de forage [10].

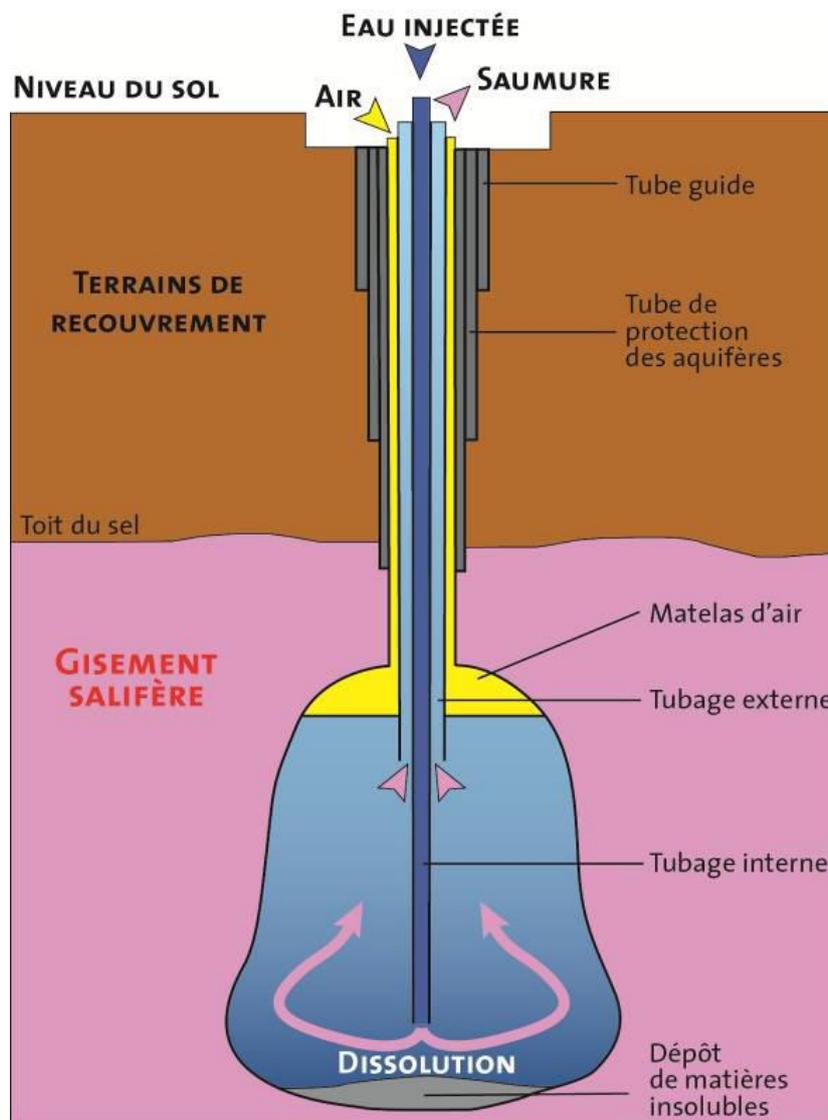


Fig. 29: Exemple de technique d'exploitation du sel par dissolution in situ par forage isolé (Source :modifié d'après CSME).

Cette technique admet des variantes, on cite :

Une première technique est celle des *sondages en pistes*. Elle consiste à introduire dans les forages un double tubage permettant d'une part d'injecter de l'eau douce et d'autre part de soutirer la saumure. Il se crée ainsi une cavité de dissolution au niveau du forage. On réalise des pistes de forage. Elles consistent en un ensemble de vingt à trente sondages, espacés d'environ cinquante mètres et disposés suivant la ligne de plus grande pente du gisement(Fig.30). On injecte de l'eau dans chacun d'eux jusqu'à ce que les chambres de dissolution communiquent.

L'exploitation sur l'ensemble de la piste ainsi formée, s'effectue en injectant l'eau douce dans le puits amont et en soutirant la saumure par le puits aval. Il se produit ainsi un lessivage complet du gisement permettant une exploitation quasi totale. Son défaut est d'entraîner l'effondrement du toit de ces cavités et donc la formation de cratères au niveau du sol.

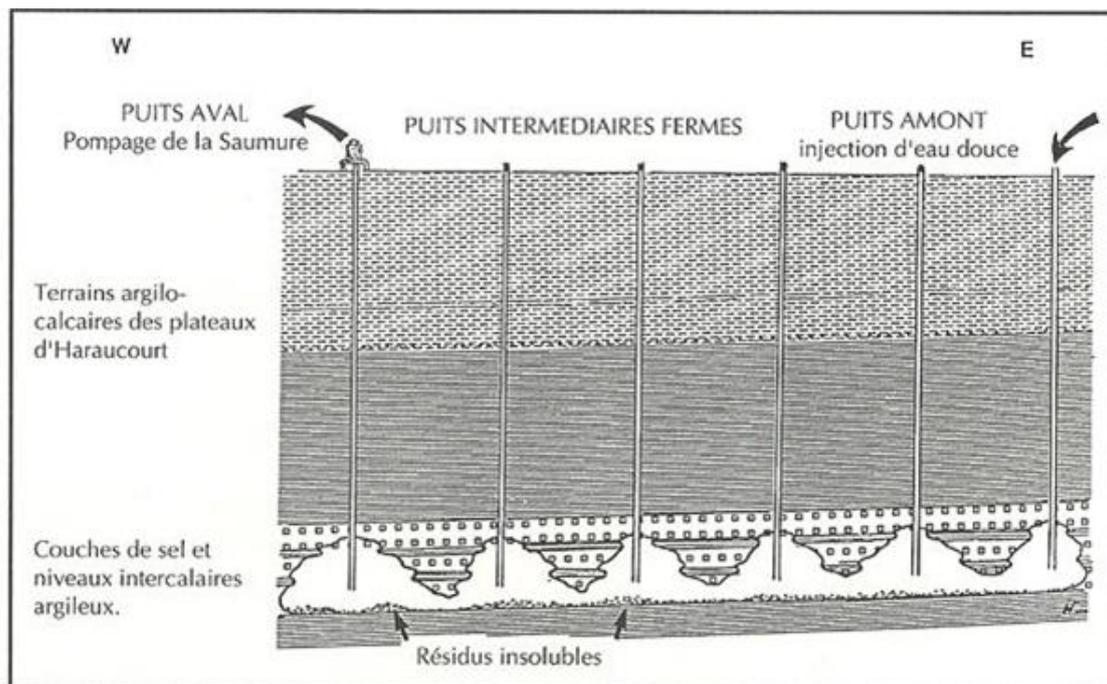


Fig.30. Exploitation du sel gemme en sondages par technique des pistes.

Une deuxième technique est l'*hydro fracturation*. Elle consiste à faire plusieurs forages jusqu'à la base du gisement puis à y injecter de l'eau sous forte pression pour créer des fracturations horizontales qui vont faire communiquer les puits. Par la suite on fait circuler de l'eau à basse pression entre un puits d'injection et un de pompage (Fig.31). À la différence de la méthode des *sondages en pistes*, cette technique permet de créer des cavités de formes prédéfinies et, en contrôlant les injections d'eau, de conserver des piliers évitant

ainsi l'effondrement des terrains. Cela ne supprime cependant pas complètement les importants affaissements.

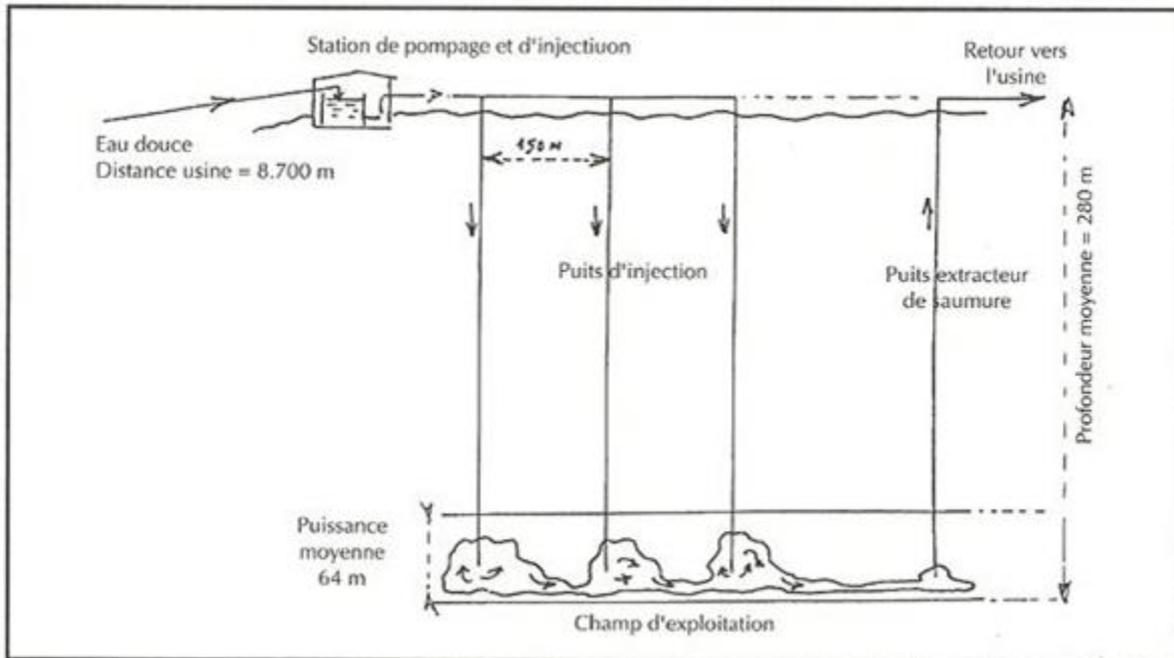


Fig. 31. Exploitation du sel gemme en sondages par hydro fracturation D'après document de J.CROIZIER CSME.

C-2 Exploitation par lixiviation in-situ (« in situ leaching »)

Cette technique permet d'exploiter des gisements à basse teneur minérale, stratiformes, encaissés dans des horizons gréseux perméables et encadrés par des horizons très peu ou pas perméables à l'aide d'une série de puits injecteurs et producteurs, une circulation de solution lixivante (souvent de l'acide sulfurique ou du carbonate de soude) est établie, permettant ainsi l'attaque du minerai (Fig.32). La solution est, par la suite, récupérée pour la phase de traitement.

Cette technique a le principal avantage de pouvoir récupérer des métaux ou minerais de valeur sans avoir recours aux techniques minières traditionnelles impliquant : explosions, découverte coûteuse ou infrastructures souterraines. Cette technique a donc une faible influence en surface et ne crée aucune versé à stérile.

Néanmoins elle présente un risque de contamination des eaux souterraines.

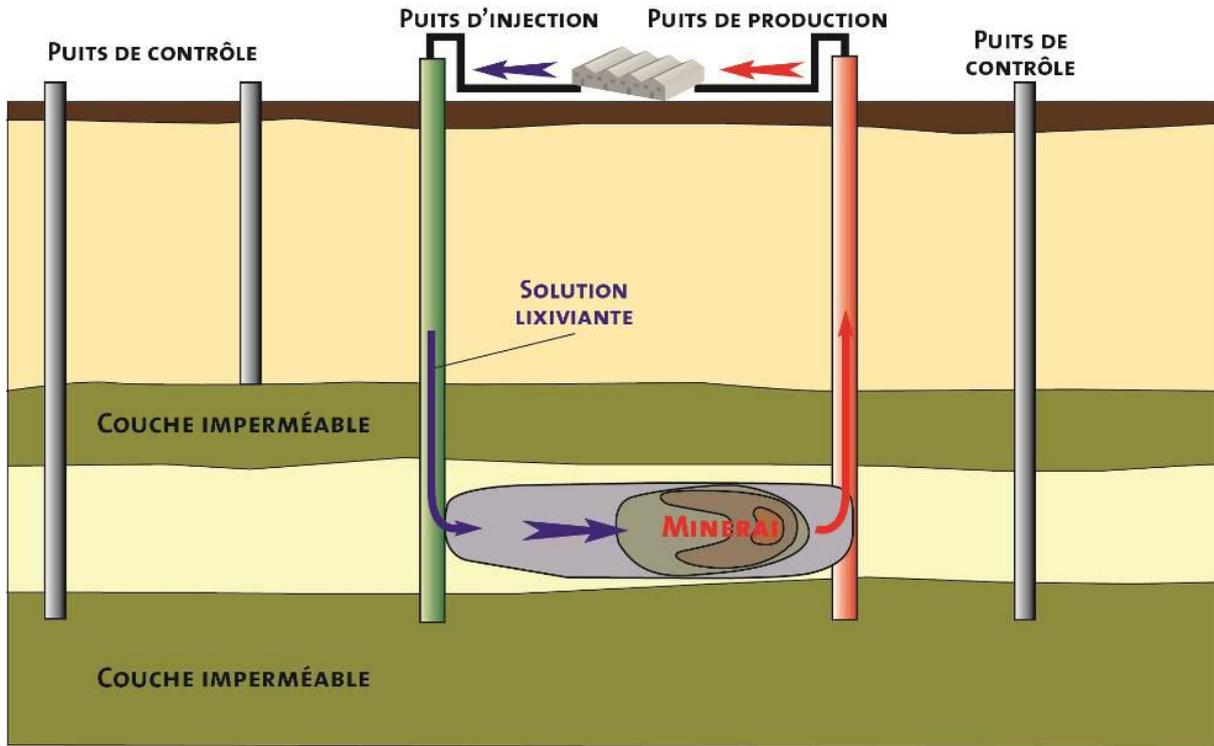


Fig. 32. Technique d'exploitation par lixiviation in situ (Source : BRGM).

Chapitre 02

RAPPORT DE DECOUVERTURE (STRIPPING RATIO)

RAPPORT DE DECOUVERTURE (STRIPPING RATIO)

Dans l'industrie minière, le **rapport de découverte** désigne le rapport entre le volume de morts - terrains (ou stériles) devant être déplacés afin d'extraire du tonnage de minerai. Par exemple, un ratio de découverte de 3: 1 signifie que l'extraction d'une tonne de minerai nécessitera l'extraction de trois tonnes de stériles [12].

Le coefficient de recouvrement fait simplement référence à la quantité de stériles traités afin de récupérer certaines quantités de minerai.

C'est mathématiquement exprimé par le ratio de stériles de minerai.

Les unités pour les rapports d'enlèvement peuvent varier et dépendent habituellement des propriétés géologiques du gisement et la matière minée. Elle peut être exprimée en tonnes (t), ou mètres cubes (m³). En général, pour le charbon, mètres cubes (m³) ou tonnes (t) sont utilisés. Cependant, pour les mines de roches dures où la géologie est généralement complexe avec la présence de différents types de roches, le tonnage (t) est généralement préféré.

Cependant, une grande variété d'unités sont utilisées ainsi qu'indiqué ci-dessous :

$$SR = \frac{\text{Stérile(volume)}}{\text{Minerai(volume)}}$$

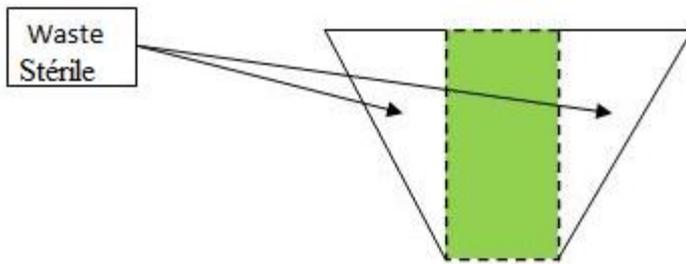
$$SR = \frac{\text{L'épaisseur des morts – terrains .}}{\text{L'épaisseur Minerai)}} \dots \dots \text{Surtout les filons de charbon plat}$$

$$SR = \frac{\text{Surface de stériles.}}{\text{Surface de Minerai)}} \dots \dots \text{l'analyse 2D donnée sur les coupes transversales}$$

II-1 TYPES DE RAPPORT DE DECOUVERTURE

1- Le coefficient de recouvrement global (Overall Stripping Ratio (OSR) est donné par :

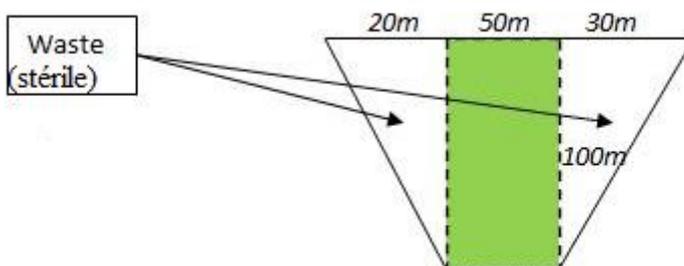
$$SR(total) = \frac{\text{Volume stérile}}{\text{Volume minerais}}$$



On donne la formule :

$$SR = \frac{\text{volume de stérile dégagé de la profondeur } d}{\text{volume de minerais récupéré à la profondeur } d} ; \quad m^3/m^3$$

Exemple : Déterminer le coefficient de recouvrement de la section de minerais (zone verte) indiqué ci-dessous :



On sait que Stripping Ratio=SR= $\frac{\text{Stérile(surface)}}{\text{minerais(surface)}} ;$

$$SR = \frac{(\frac{1}{2} \times 20 \times 100) + (\frac{1}{2} \times 30 \times 100)}{50 \times 100}$$

$SR = 2500/5000 = 1:2$ (c.-à-d. 0,5) (c.-à-d. une unité de stériles sont enlevés pour récupérer 2 unités de minerai).

Remarque : On passe par la détermination de la zone de stériles en calculant les zones respectives représentant les surfaces des triangles et le diviser par le domaine de rectangle représentant le minerai.

2- Rapport de découverte courant

Il correspond aux volumes des roches de recouvrement et de minerai extrait pendant une période donnée de l'exploitation en m^3/mois ; m^3/an ,...[9].

Le rapport de découverte courant calculé est comparé au rapport de découverte rentable pour la teneur calculée et si le rapport calculé est moins que celui rentable, les limites de mine sont augmentées ; mais, si le rapport calculé est plus grand, les limites de mine sont réduites en taille. Ces approximations continuent jusqu'à ce qu'on trouve la limite de mine qui se conforme à la courbe de découverte.

3-Break-even Stripping Ratio (BESR)

Le rapport de découverte maximum admissible (Ratio SR_{max}) définit le seuil de rentabilité. Cela représente le plus haut possible d'unités de stérile qui peuvent être traités. Si le SR dépasse le BESR alors l'opération sera non rentable vu que le revenu généré par le minerai est insuffisante pour compenser les coûts engagés dans l'exploitation minière. Il semble qu'il y a un calcul qui permet de déterminer le seuil au-delà duquel le coût pour enlever les morts-terrains devient prohibitif (exagéré).

Le BESR est calculé pour le moment où le seuil de rentabilité se produit et le découverturenécessaire est payé par la valeur nette du minerai retiré. En général, le BESR peut être déterminé comme suit :

$$BESR = \frac{I-CT}{CW}$$

Avec :

I = Revenus/tonne de minerai

CT = coût de production par tonne de minerai (y compris tous les coûts au point de vente, à l'exclusion de décapage).

Le coût L'exploitation (production) comprend le coût de l'exploitation minière, le broyage, et l'administration générale. Certains coûts supplémentaires sont considérés comme le raffinage, la vente, l'amortissement, et la plupart du temps dépendent de la marchandise minées et les décisions de gestion.

Chapitre II ————— Rapport De Découverte (Stripping Ratio)

CW = coût d'extraction (décapage) par tonne de stérile.

Exemple :

Déterminer le BESR dans l'extraction et le traitement d'un minerai de cuivre 0,60 % si le prix de vente du cuivre en concentré est de 1,63 \$/kg et l'ensemble des coûts de productions globaux sont 6,80 \$/tonne et le coût d'extraction par tonne de stérile est de 7,50 \$/tonne. La récupération globale est de 92 %.

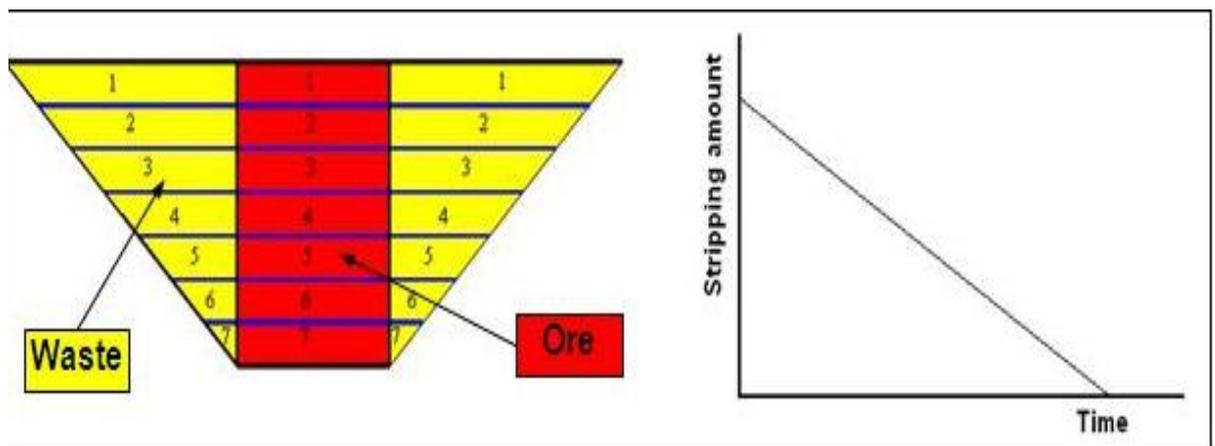
Calculer le BESR

$$\text{BESR} = [(0,006 \cdot 0,92 \cdot 1,63 \cdot 1000) - (6,8)] / 7,5 = 0,29 = 0,3$$

II-2 SEQUENCE DE GEOMETRIE[7]

1-Méthode de découverte décroissant :

Cette méthode exige que chaque banc de minerai soit extrait dans l'ordre, et tout le stérile sur le gradin donné est enlevé sur la limite de mine.



Les avantages :

- L'espace d'exploitation disponible ;
- L'accessibilité du minerai sur le banc suivant facile ;
- Tout l'équipement travaillant sur le même niveau ;
- Aucune dilution à partir du minage des stériles au-dessus du minerai ;
- Les besoins en équipement ne sont qu'un minimum vers la fin de la vie de la mine.

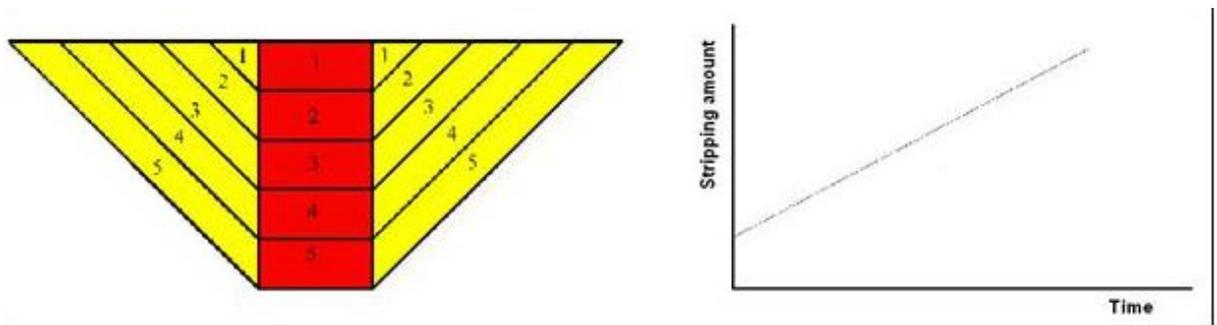


Les inconvénients ;

➤ Les coûts d'exploitation sont maximum au cours de premières années lorsque les profits sont nécessaires pour gérer les intérêts et le capital de repayment.

2-Méthode de découverte croissant

La découverte est exécutée juste comme nécessaire pour découvrir le minerai. Les pentes en activité des faces stériles sont maintenues parallèles à l'angle global de pente de la fosse.



Les avantages :

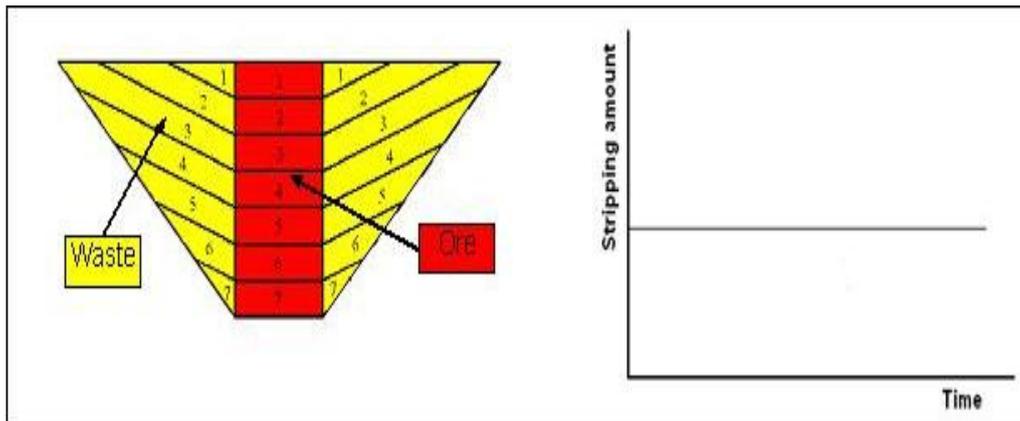
Des bénéfices maximum en premières années d'opération ce qui réduit considérablement le risque d'investissement dans le déplacement de stérile pour que le minerai soit extrait à une future date ;

Les inconvénients :

Dans cette méthode il n'est pas possible d'actionner un grand nombre de gradins simultanément empilés et étroits pour répondre aux besoins de production.

3-Méthode de rapport de découverte constant

Cette méthode essaye d'enlever le stérile à un taux approché par le rapport de découverte global.

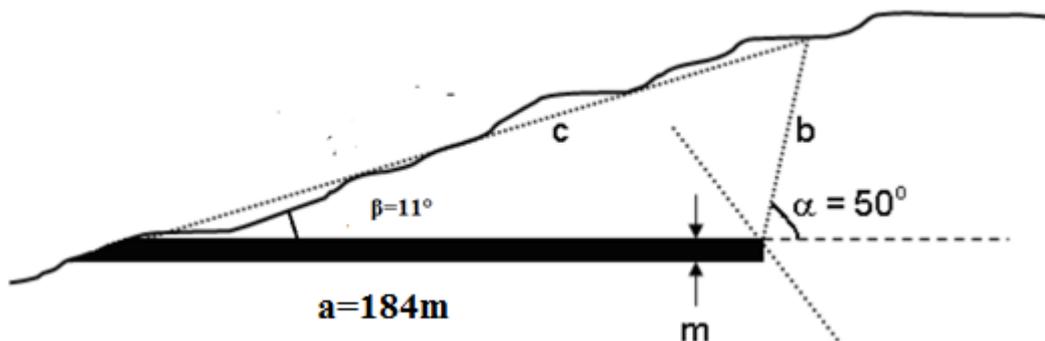


La taille de flotte d'équipement et les besoins de main-d'œuvre durant toute la vie de projet sont relativement constants.

II-3 EXERCICES D'APPLICATION

Exercice 1 (cet exercice est inspiré de [7])

La section verticale d'un gisement horizontal et quelques paramètres relatifs sont donnés ci-dessous.



Prix de revient du m^3 de stériles déplacés $5000\text{Da}/\text{m}^3$

Prix de revient admissible du minerai est de $30000\text{Da}/\text{t}$

Prix de revient d'extraction du minerai lui-même dans une exploitation à ciel ouvert $8000\text{ Da}/\text{t}$

Masse volumique du minerai $1.5\text{t}/\text{m}^3$

La longueur dans la troisième direction : 500m

Chapitre II ————— Rapport De Découverte (Stripping Ratio)

1. Déterminer le rapport de découverte limite (économiquement admissible).
2. Calculer la puissance du filon m.
3. Donner les variations du rapport de découverte en fonction de la puissance du filon (graphe).
4. Interpréter le résultat

On donne : la surface A d'un triangle dont les côtés ont pour mesures : a, b et c

$$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \text{ avec } s = \frac{1}{2}(a+b+c)$$

N-B : pour cet exercice on recommande d'utiliser la formule de Héron et la loi de sinus.

Calculer l'aire d'un triangle à l'aide de la formule de Héron

Soit p le périmètre d'un triangle dont les côtés ont pour mesures a, b et c.

On a donc :

$$p = a + b + c.$$

On note s le demi-périmètre. On a :

$$s = \frac{1}{2} p = \frac{1}{2} (a + b + c).$$

Alors l'aire du triangle A est telle que :

$$A^2 = s(s-a)(s-b)(s-c)$$

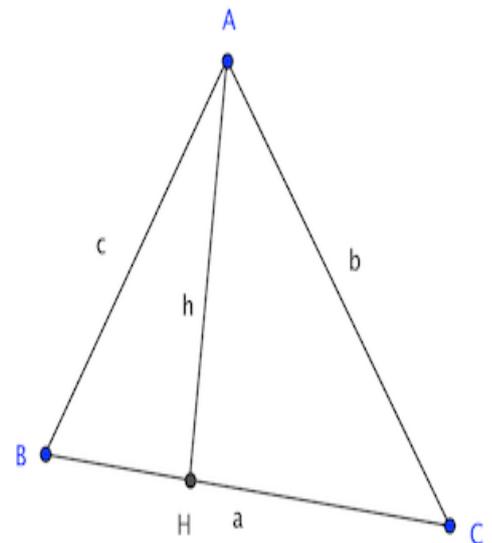
et de là :

$$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)}$$

$$A = \sqrt{S(S-a)(S-b)(S-c)}$$

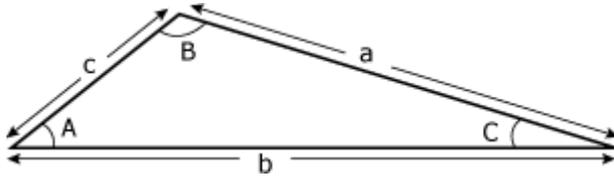
Loi des sinus

La loi des sinus établit que le rapport entre la mesure du côté opposé à un angle et le sinus de cet angle est équivalent pour



tous les angles d'un triangle quelconque (figure 4.32).

Figure 4.32 Loi des sinus.



Si l'on se reporte au triangle de la figure 4.32, on peut énoncer la loi des sinus comme suit :

$$\frac{a}{\sin. A} = \frac{b}{\sin. B} = \frac{c}{\sin. C}$$

Solution de l'exercice1

1- $Keconomic = \frac{Pa-Pm}{Pst} ; t/m^3$

Avec

Pst :Prix de revient du m³ de stériles déplacées 5000Da/m³

Pa : Prix de revient admissible du minerai 30000Da / t

Pm : Prix de revient d'extraction du minerai lui-même dans une exploitation à ciel ouvert 8000Da/ t

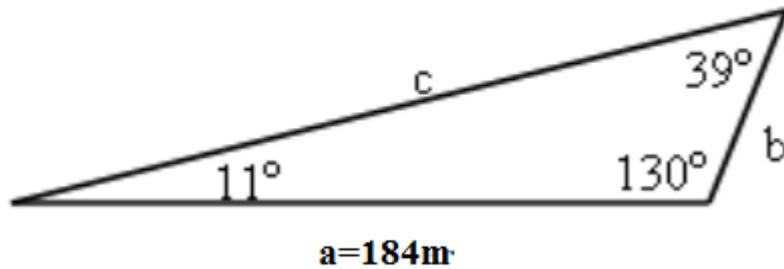
A.N : $Keconomic = \frac{30000-8000}{5000} = 4.4 \quad m^3/t$

2- calcul de la puissance m

L'angle complémentaire de α est : $180^\circ-50^\circ=130^\circ$

$\lambda=180^\circ-(11^\circ+130^\circ)=39^\circ$

Calcul de b et c par la relation



Sur ce triangle on applique la loi du sinus :

$$\frac{184}{\sin 39^\circ} = \frac{b}{\sin 11^\circ} \text{ donc } b = 57.7 \text{ m}$$

$$\frac{184}{\sin 39^\circ} = \frac{c}{\sin 130^\circ} \text{ donc } c = 225.5 \text{ m}$$

On calcule la surface de stérile :

$$A = \sqrt{s(s-a)(s-b)(s-c)} \text{ avec } s = \frac{1}{2}(a+b+c)$$

$$s = (184 + 57.7 + 225.5) / 2 = 233.6 \text{ m}$$

$$A = \sqrt{233.6(233.6 - 184)(233.6 - 57.7)(233.6 - 225.5)}$$

$$A = 4071.9 \text{ m}^2$$

$$\text{Volume stérile} = 4071.9 * 500 = 2035950 \text{ m}^3$$

$$\text{Quantité de minerai} = m * a * l * \gamma = m * 184 * 500 * 1.5 = 138000 * m$$

$$k = \frac{\text{sterile}}{\text{minerai}} = \frac{2035950}{138000 * m} = 4.4$$

$$m = 3.35\text{m}$$

$$3\text{-on reprend } k = \frac{\text{sterile}}{\text{minerai}} = \frac{2035950}{138000 * m} = 4.4 \text{ Donc } m = \frac{2035950}{138000 * k}$$

$$m = \frac{2035950}{138000 * k} = \frac{14.75}{k}$$

k(t/m ³)	m(m)
1	14,75
2	7,38
2,5	5,90
4	3,69
4,4	3,35
8	1,84
10	1,48

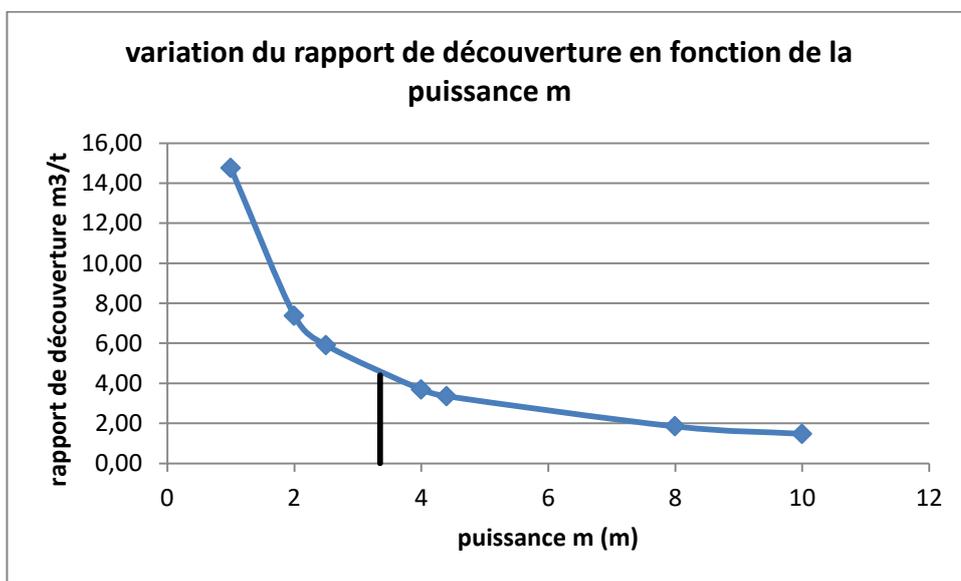


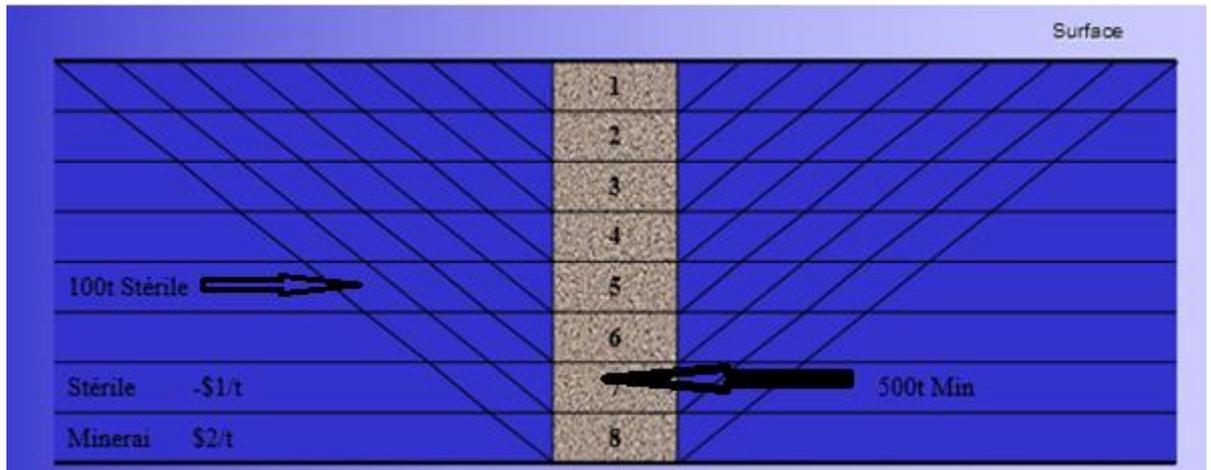
Fig.33.Variation du rapport de découverte en fonction de la puissance.

4-Dans la partie gauche l'exploitation souterraine est appropriée (rentable). Dans la partie droite l'exploitation à ciel ouvert est appropriée (rentable).

Chapitre II ————— Rapport De Découverte (Stripping Ratio)

Exercice 2 :

Soit la figure suivante :



1- Compléter le tableau 1

2- Sachant que le minerai vaut 2\$ par tonne après soustraction de toutes les dépenses et que l'enlèvement de stérile coûte 1\$ par tonne, interpréter les résultats.

Tab.2 .Tonnage for the pit Outlines (Contours de mine).

Pit	Ore (minerai)	Waste(stérile)	Total
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

Chapitre II ————— Rapport De Découverte (Stripping Ratio)

Solution de l'exercice2

1- Le tableau relatif aux données est présenté comme suit :

Tab.2.Tonnages for the possible Pit outlines. Tonnages pour les contours possibles de la fosse.

Pit	Ore (minerai)	Waste(stérile)	Total
1	500	100	600
2	1000	400	1400
3	1500	900	2400
4	2000	1600	3600
5	2500	2500	5000
6	3000	3600	6600
7	3500	4900	8400
8	4000	6400	10400

2- Interprétation des résultats.

Les résultats obtenus sur la base des valeurs attribuées à la tonne de minerai et de stériles sont représentés sur le tableau suivant.

Tab.3.Valeurs des fosses si le minerai vaut 2 \$ par tonne et si les stériles coûtent 1 \$ par tonne.

pit	valeur
1	900
2	1600
3	2100
4	2400
5	2500
6	2400
7	2100
8	1600

Le tableau 3 montre que le gain est maximum à 2500\$ lorsque l'exploitation atteindra la fosse numéro5.par la suite il diminuera (Fig.34).

Chapitre II ————— Rapport De Découverte (Stripping Ratio)

On remarque que pour une même quantité de minerai au niveau de chaque fosse la quantité de stérile augmentera.

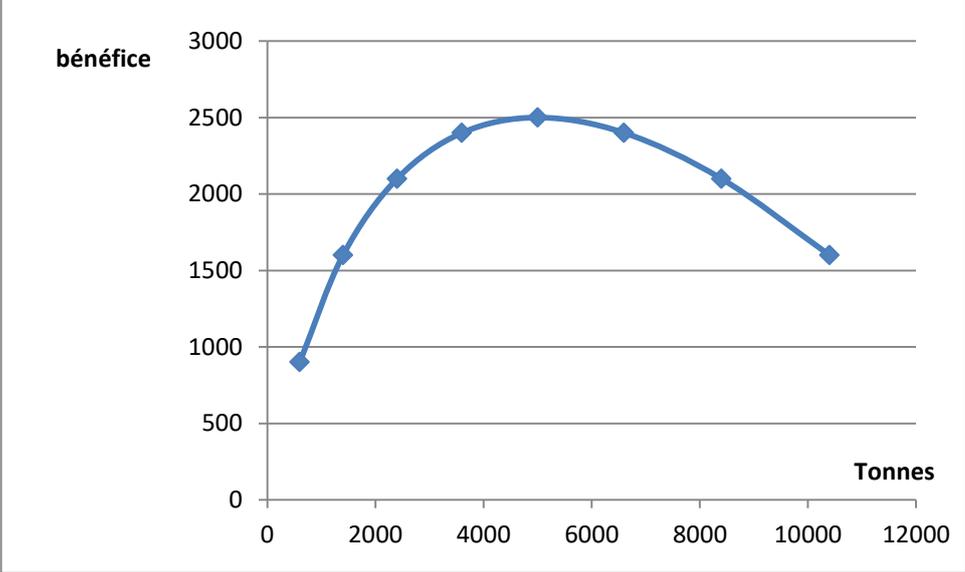


Fig.34.Relation entre le tonnage des fosses et le bénéfice.

Chapitre 03

Éléments de l'exploitation à ciel ouvert

Eléments de l'exploitation à ciel ouvert

On entend par exploitations à ciel ouvert celles dont le minerai est extrait à partir de la surface après avoir été dégagé, s'il y a lieu, des morts-terrains qui recouvraient le gisement. Ces exploitations portent le nom générique français de "minière" alors qu'elles sont désignées en anglais par l'expression surfaces mines [7].

Les principaux éléments de l'exploitation à ciel ouvert sont :

- a: plate-forme supérieure ; (top (roof))
- b : plate-forme inférieure ; (bottom (bench floor))
- c : talus ; (highwall (bench face))
- d:- arête supérieure ;(bench crest of edge)
- e : arête inférieure ;(toe of the highwall)
- α : angle de talus ;(bench slope)
- Hg - hauteur de gradin ;(bench height).

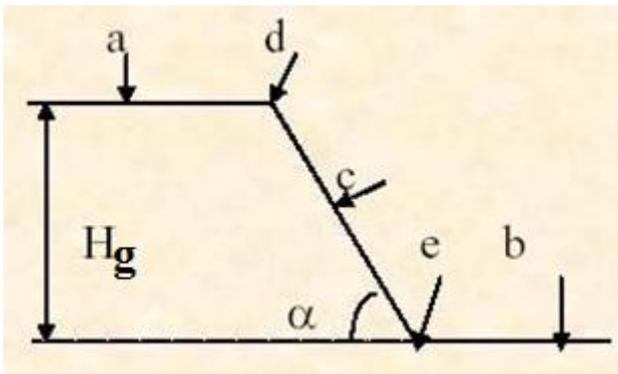


Fig.35 .Eléments d'un gradin dans une exploitation à ciel ouvert.

a- Le gradin(bench)est une tranche du minerai ou du stérile ayant la surface de travail sous forme d'une marche d'escalier (Fig. .35).

Les dimensions du gradin sont définies par 02 paramètres qui dépendent de :

- Type d'équipement ;
- Nature de terrain
- Conditions de travail.

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

Ces deux paramètres sont :

- Sa hauteur
- Angle de talus
- **La hauteur du gradin**

Elle dépend de :

- 1) Les caractéristiques physiques du minerai
- 2) Le degré de sélectivité exigée dans séparation du minerai et de la perte avec l'équipement de chargement ; le taux de production ;
- 3) La taille et le type d'équipement pour respecter les exigences de production ;
- 4) Les conditions climatiques.

La hauteur de gradin devrait être mise aussi haut que possible dans les limites de la taille et du type d'équipement choisi pour la production désirée.

Le gradin ne devrait pas être si haut qu'il présentera les problèmes de sécurité.

La hauteur du gradin dans des mines en fosse s'étendra normalement de 15m dans de grandes mines de cuivre a ainsi peu comme 1 m dans des mines d'uranium.

La relation correcte entre la hauteur de gradin et les dimensions marchantes de l'excavateur assure le plus souvent :

- Efficacité
- Opération sûre de l'équipement
- économie

D'après la nature des roches la hauteur des gradins dépend de la hauteur de creusement des excavateurs (H_{cr}) :

- Roches tendres : $H_g \leq H_{cr}^{Max}$
- Roches dures : $H_g \leq 1,5 \times H_{cr}^{Max}$

H_{cr}^{Max} : est la hauteur de creusement maximale de l'excavateur (m).

En Pratique:Hauteur du gradin: = 3à20 m (**selon les travaux miniers à ciel ouvert**)

- Pour le stérile de 10 à 15m

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

- Pour le minerai de 8 à 12 m selon la pelle.

➤ **L'angle du talus du gradin** (benchslope angle)

Il dépend de la nature des roches tel que mentionné sur le tableau ci-dessous :

Tab.4 : variation de l'angle du talus du gradin en fonction de la nature des roches.

<u>Nature des roches</u>	<u>Angle de talus α (degrés)</u>
- Les roches tendres et friables	
- Roches ignées très durs et métamorphiques	70 - 80
- Roches sédimentaires	50 - 60
- Roches altérées & terrains de sables secs	40 - 50
- Roches argileuses	35 - 45

La stabilité des talus dépend de la composition pétrographique des défauts structurels et des eaux souterraines.

b- Berme : rebord horizontal construit dans (un remblai) ou un mur en pente d'une exploitation à ciel ouvert ou d'une carrière pour casser la continuité d'une pente autrement afin de renforcer et d'augmenter la stabilité de la pente.

Une berme peut également être employée comme route ou servir de transport de banc pour l'excavation [7].

On a ainsi les bermes de sécurité et les bermes de transport.

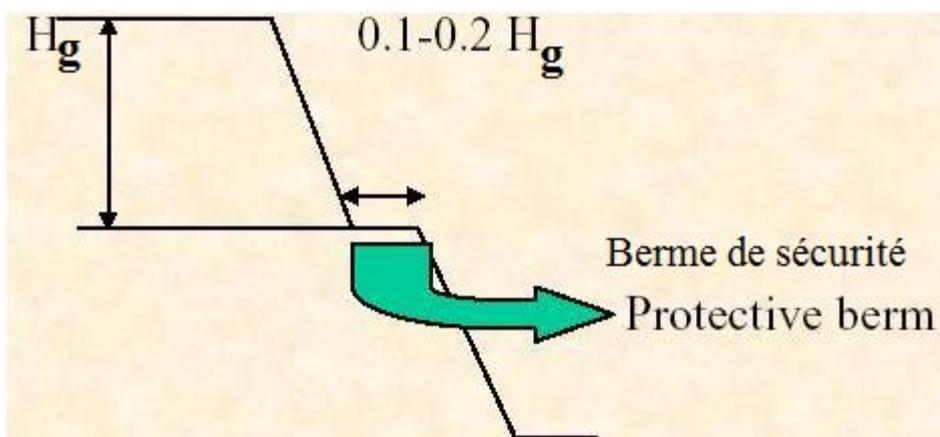


Fig.36. Berme de sécurité.

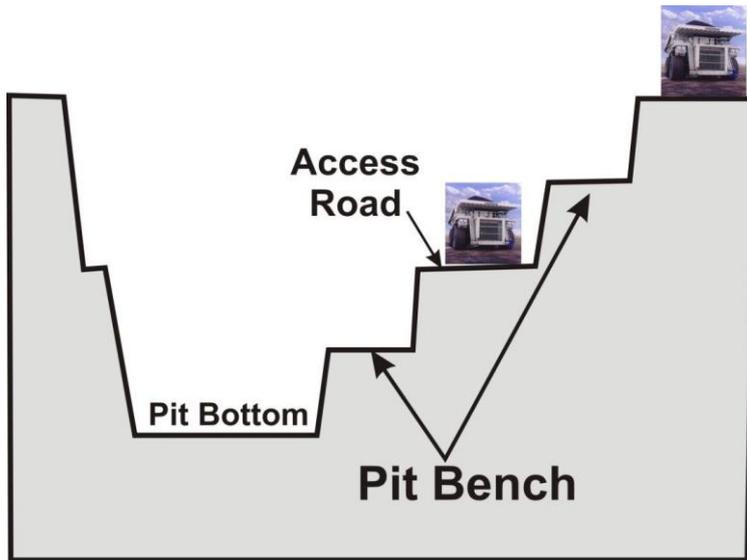


Fig37. Berme de transport.

III-1 CONTOUR DE LA MINE

Le dimensionnement d'un talus consiste tout d'abord à définir l'angle général pour la profondeur finale de la fosse H. Une fois cet angle défini, les autres paramètres du talus (gradins, banquettes, rampe d'accès) seront choisis de manière à respecter l'angle général [6].

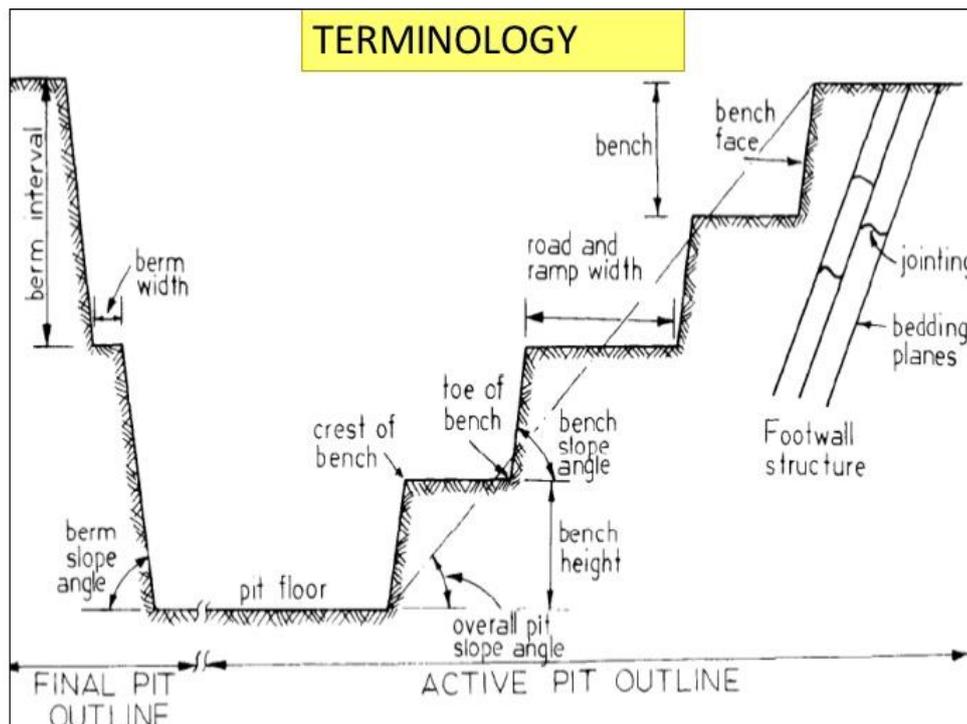


Fig.38.Terminologie relative à l'exploitation à ciel ouvert.

Angle moyen de fosse (averagepitslope)

Valeur moyenne de l'angle de fosse sur une partie ou la totalité de l'excavation.

Pente de travail (workingslope)[14]

Pente –enveloppe des gradins en exploitation.

Pente -enveloppe (overallpitslope)

Désigne l'angle de pente de la surface imaginaire qui joint les sommets (ou les pieds) de tous les gradins successifs (utilisée pour des calculs de stabilité).

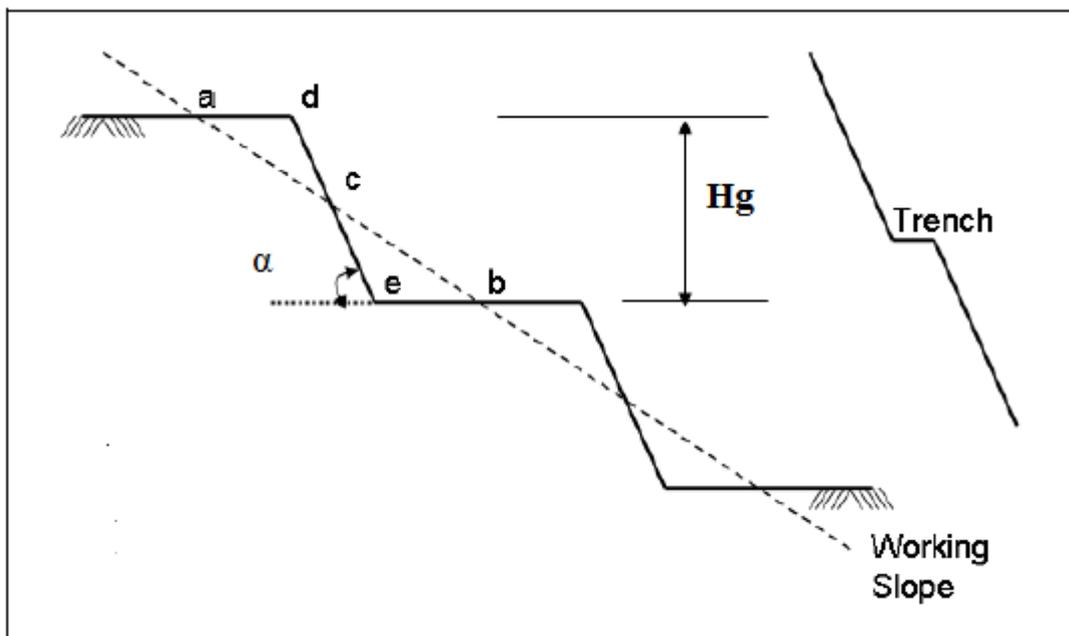


Fig.39.Pente de travail.

III-1-1- Détermination des angles des bords de la mine à ciel ouvert

Pour délimiter le contour du fond de la carrière, il est nécessaire de déterminer l'angle du bord inexploitable selon la profondeur finale (H) et les propriétés du massif[5].

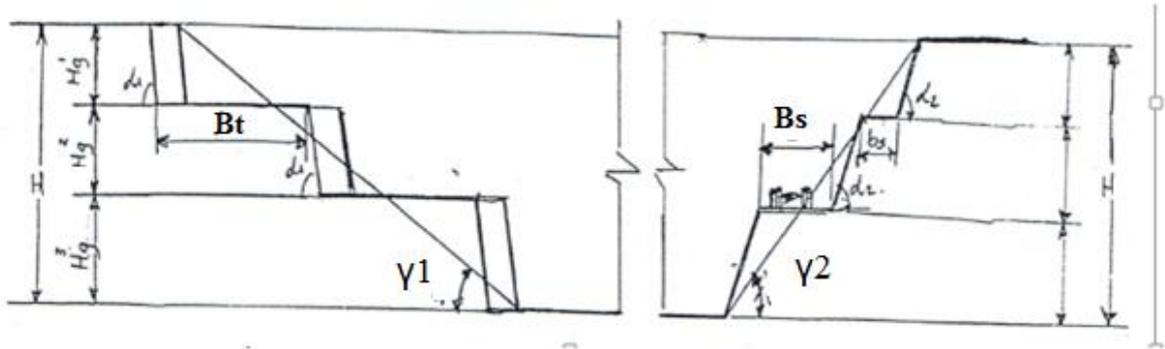


Fig.40. Angles des bords de la mine à ciel ouvert.

➤ **Bord exploitable**

$$tg\gamma_1 = \frac{H}{\sum Bt + \sum Hgctg\alpha}$$

➤ **Bord inexploitable**

$$tg\gamma_2 = \frac{H}{\sum Bs + \sum Bt + \sum Hgctg\alpha}$$

Bs :largeur de la berme de sécurité ;(m)

Bt : largeur de la berme de transport ;(m)

Hg :hauteur du gradin ;(m)

α : angle du talus du gradin ;(degrés) .

Pour la détermination du contour du fond de la carrière, il est nécessaire de déterminer l'angle de talus du bord inexploitable γ_2 selon la profondeur finale H et les propriétés du massif.

Selon la pratique de l'exploitation à ciel ouvert et l'analyse statistique des différentes carrières dans le monde montrent que l'angle du talus du gradin et celui du bord inexploitable peuvent rendre les valeurs mentionnées dans le tableau suivant :

Tab.5.Angle du talus du gradin et du bord inexploitable[5].

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

Caractéristiques Des roches	Coefficient de dureté selon Protodiakonov	Angle du talus du gradin (degrés)	l'angle de talus du bord inexploitable γ_2 (en degrés) selon la profondeur finale H (en mètres)			
			90m	180m	240m	300m
Extrêmement dure	15-20	75-85	60-68	57-65	53-60	48-54
Dure	8-14	65-75	50-60	48-57	45-53	42-48
Dureté moyenne	3-7	55-65	43-50	41-48	39-45	36-43
Tendre	1-2	40-55	30-43	28-41	26-39	-
Meuble et végétale	0.6-0.8	25-40	21-30	20-28	-	-

III-2 ETAPES DE L'EXPLOITATION A CIEL OUVERT

Les étapes de l'exploitation à ciel ouvert sont [1,9] :

- Préparation de la surface à l'emplacement du gisement qui comprend le défrichage, l'assèchement des marécages, le détournement des cours d'eau en dehors du champ de la mine à ciel ouvert ou la carrière ;
- Assèchement du champ de la mine et prise de mesure contre les afflux d'eau qui consiste à protéger la mine contre l'inondation provoquée par les eaux de pluies ou les eaux souterraines (cela se fait par creusement des fossés d'évacuation ou d'un réseau et voies de drainage souterrain ou encore par sondage équipés de pompes).
- Ouverture du champ de la mine qui a pour but de réaliser l'accès aux moyens de transport à partir de la surface jusqu'au niveau de travail (cela se fait généralement par les tranchées).
- Enlèvement des stériles de recouvrement dans le but de dégager la substance à exploiter.
- Enlèvement de la substance utile en conformité avec la production prévue de la mine et des exigences émises à la qualité des produits extraits.

Les principales opérations de l'exploitation à ciel ouvert (exploitation proprement dite) sont :

- Abattage ;
- Chargement ;

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

- Transport et transfert ;
- Mise à terril.

L'exploitation à ciel ouvert présente du point de vue sécurité, des avantages certains sur l'exploitation souterraine. Par contre, il peut poser de gros problèmes d'environnement.

L'environnement a une grande importance pour les exploitations à ciel ouvert et entraîne un certain nombre de contraintes qui peuvent avoir des conséquences financières non négligeables : contraintes de remise en état des terrains après exploitation. Ceci suppose donc que l'on sépare soigneusement la terre végétale que l'on remettra à la fin sur le terrain et que l'on rebouche les fosses avec les stériles de recouvrement dès que l'on a enlevé le minerai. Ceci conduit à manipuler plusieurs fois certains matériaux et coûte cher ; dont le volume (foisonné) augmente de 20 à 50% par rapport au volume en place. Sans tenir compte des coûts de l'opération de revégétalisation des sites après réhabilitation.

A- TRAVAUX D'ABATTAGE

a. Objectifs

La méthode **d'abattage à l'explosif** est en général utilisée dans les mines de roches massives et dures. L'abattage à l'explosif présente l'avantage de fragmenter des volumes de roche importants[3].

A partir d'une succession d'opérations simples :

- Implantation et foration de trous,
- Chargement et amorçage des explosifs.

L'abattage à l'explosif a différents objectifs :

- assurer la sécurité, c'est à dire pas de projections et pas de tirs bloqués ou ratés.
- abattre un grand volume de roche, avec une granulométrie adaptée aux installations, avec une proportion de blocs et de fines la plus réduite possible ;
- un épanchement du tas et un foisonnement adapté aux engins de reprise du tas ;
- assurer une bonne géométrie des fronts sur la mine ou la carrière avec :
 - une bonne sortie du pied ;
 - un bon alignement des fronts et de la plateforme ;
 - des effets arrière réduits.

b. Eléments théoriques sur l'opération d'abattage

b.1. Mécanisme de l'explosion

Les explosifs sont utilisés depuis des siècles pour abattre la roche. Le principe de l'explosion repose sur la transformation d'une énergie chimique potentielle en énergie mécanique communiquée au milieu extérieur.

Un explosif est un mélange de substances chimiques peu stables, qui, par un apport d'énergie est susceptible de se décomposer rapidement.

La détonation est le régime de décomposition le plus rapide : la puissance transmise au moment de la détonation sera donc la plus importante. C'est le mécanisme qui va ainsi générer les effets mécaniques les plus importants, c'est donc ce qui est le plus souvent recherché dans l'utilisation des explosifs[3].

L'énergie dégagée par un explosif au cours d'une détonation se manifeste sous deux formes :

- **une énergie de choc** véhiculée par une onde de choc (c'est-à-dire une onde mécanique de contrainte).
- **une énergie de gaz** qui s'exprime sous la forme d'un gaz dans des conditions de très hautes température et pression.

b.2. Abattage de la roche

Le processus de la fracturation à l'explosif repose sur l'action combinée de l'onde de choc et des gaz d'explosion sous deux phases :

- une phase dynamique

- Création d'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 zone appelée **zone transitoire** (entre 20 et 50 r_c).

- Au-delà de cette zone, apparaît la zone sismique. L'onde contribue à affaiblir le massif, sans pour autant mettre en cause sa structure globale par des pré-fissurations ;

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

- 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** sur lesquelles elles vont se scinder en une onde transmise et une onde réfléchie..,

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** : 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 [3].

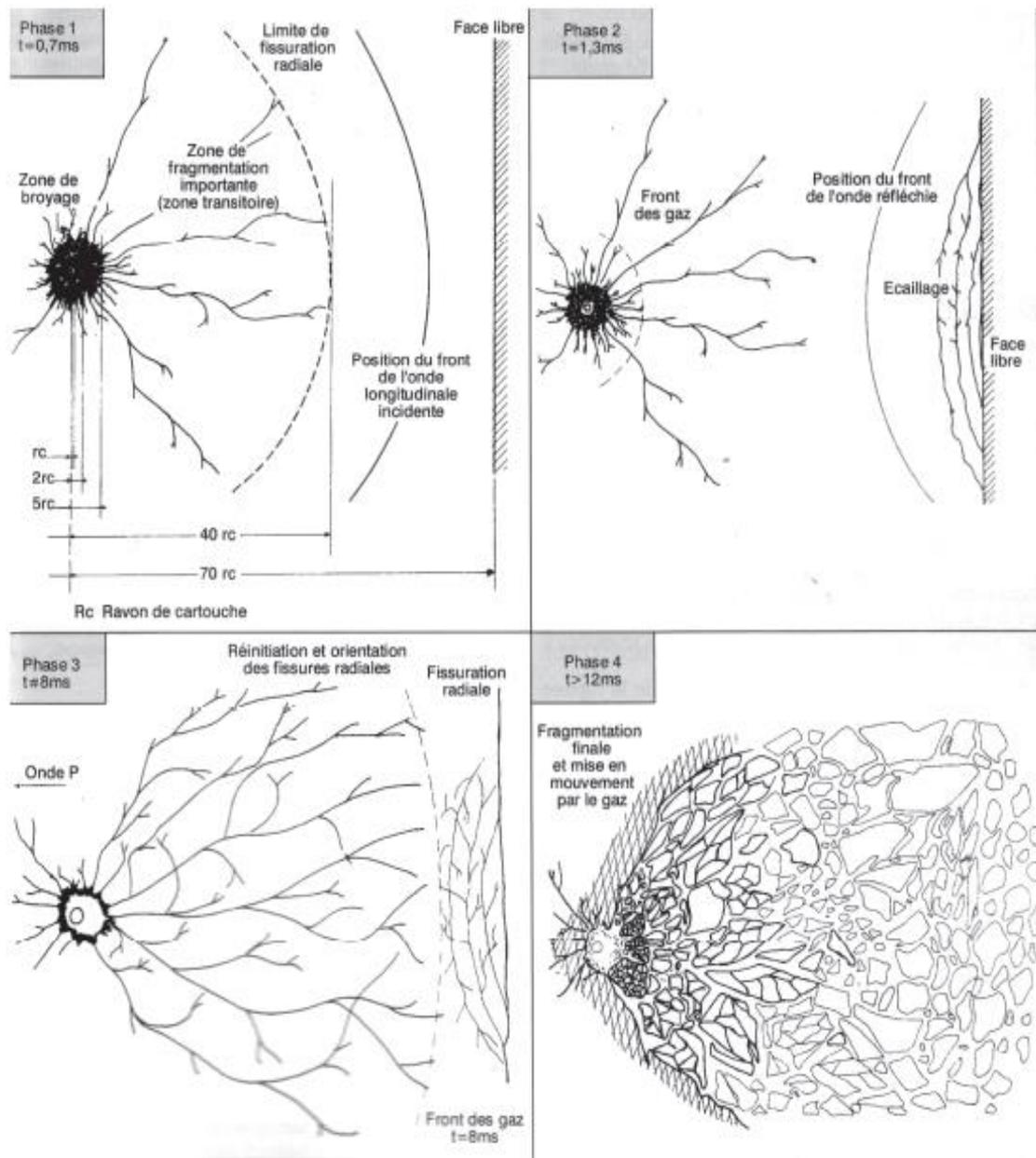


Fig.41. Développement de la fissuration dans l'abattage du massif rocheux[3].

c- Exigences technologiques des travaux de forage et de tir

c-1 Les travaux de forage et de tir doivent garantir

- Une bonne fragmentation des roches (diminution de la quantité des hors gabarit) ;
- Assurer une bonne homogénéisation (éviter la dilution du minerai avec les stériles) ;
- La forme et les dimensions des blocs obtenus, après le tir, doivent correspondre aux paramètres de chargement, de transport et de concasseur utilisés dans la mine ;

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

- Action sismique minimale pour les installations au jour et l'environnement.
- Prix de reviens minimale et grande sécurité du travail.

c-2 Les dimensions maximales des blocs doivent être obtenues comme suit :

La granulométrie des produits abattus pouvant être considérée acceptable devant les impératifs des opérations technologiques postérieures. Ainsi la grandeur maximale « a » des blocs abattus doit répondre aux conditions suivantes :

- Selon la capacité du godet de l'excavateur ou de la chargeuse :

$$a \leq 0.8\sqrt[3]{Cg} ; (m) \dots \dots \dots (1)$$

Cg : La capacité du godet en m³

- Selon la largeur de la bande transporteuse

$$a \leq \frac{b - 0.2}{2} ; (m) \dots \dots \dots (2)$$

b : la largeur de la bande transporteuse (m)

- Suivant les mailles d'entrée du concasseur.

$$a \leq 0.85.A ; (m) \dots \dots \dots (3)$$

A : dimension de la maille d'entrée du concasseur

B- CHARGEMENT

Le fonctionnement d'une mine à ciel ouvert est conçu et organisé autour des engins choisis pour le chargement des matériaux. Parmi les engins de chargement utilisés dans les mines à ciel ouvert, on distingue deux types fondamentaux selon leur mode de fonctionnement ou de travail.

- *Excavateur à godet unique* : dans ce cas la prise et le déplacement de la roche se font par un seul godet. Pour ces engins le fonctionnement s'effectue d'une manière *cyclique*, c'est-à-dire les opérations élémentaires d'un cycle complet d'excavation et de chargement se réalisent successivement. Ce sont des excavateurs à godet unique (pelle mécanique ou hydraulique, chargeuse frontale, dragline,...).

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

➤ *Les engins dont le fonctionnement s'effectue d'une manière **continue**, c'est-à-dire les opérations élémentaires d'un cycle complet d'excavation et de chargement y compris le déplacement se réalisent simultanément. Ce sont des excavateurs à godets multiples (roue-pelle (Excavator Wheel), excavateurs à chaîne à godets) .*

Les excavateurs et les chargeuses sont des engins destinés à l'excavation et au chargement des roches dans les chantiers vers le lieu de déchargement (dans les moyens de transports ou dans les terrils).

L'efficacité des travaux de chargement des roches dépend en grande partie des résultats des travaux de forage et de tir.

Les engins d'excavation et chargement employés dans les exploitations à ciel ouvert sont principalement des excavateurs à godet unique, des excavateurs à godet multiple, les chargeuses lourdes et les scrapers.

Les principaux mécanismes des excavateurs à godet unique sont le mécanisme d'attaque, le mécanisme de levage du godet, le mécanisme d'orientation, le mécanisme de déplacement.

Les excavateurs à godet multiple sont des engins à action continue c'est-à-dire toutes les opérations du cycle de travail sont exécutées simultanément.

Le choix du type des engins de chargement dans la carrière ou mine à ciel ouvert se base sur les facteurs suivants :

- Nature des roches.
- Propriétés physico-mécaniques des roches.
- Méthode d'exploitation.
- Production envisagée (planifiée)
- Mesures de sécurité pour : le personnel, l'usage des engins, la stabilité du talus de gradin, la stabilité des bords de talus des gradins, etc.

B-1 Les engins de chargement

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

Les exploitations à ciel ouvert utilisent divers types d'engins d'extraction, les plus courants étant [2] :

- ✓ Les roues-pelles ;
- ✓ Les excavateurs à godet ;
- ✓ Les draglines ;
- ✓ Les scrapers ;
- ✓ Les chargeuses ;
- ✓ Les pelles mécaniques ou hydrauliques ;

Les quatre premiers sont surtout réservés aux gisements stratiformes horizontaux (lignite, charbon, phosphate, etc.)

Avantages des chargeuses [2] :

- ✓ Très mobile
- ✓ Assez peu sensible à l'état du matériau lorsqu'associées à un engin auxiliaire
- ✓ Peuvent servir à des travaux auxiliaires (entretien pistes, reprise stock,...)
- ✓ Coût d'achat relativement modéré
- ✓ Peuvent maintenir propre l'aire de chargement
- ✓ Qualification de l'opérateur moyenne
- ✓ Peuvent charger les gros blocs.

Inconvénients

- ✓ Temps cycle long
- ✓ Nécessitent matériau plus ou moins meuble
- ✓ Nécessitent parfois un engin auxiliaire
- ✓ Hauteur de chargement limitée
- ✓ Très sensible à l'état du sol
- ✓ Fatigant pour le personnel
- ✓ Coût opératoire élevé (pneu, gaz oil,...)
- ✓ Faible durée de vie
- ✓ Nécessitent un grand espace de travail
- ✓ Visibilité relativement mauvaise en marche arrière.



Fig. 42. Chargeuse CATERPILLAR type 988B, mine de Boukhadra 2015.

Pelles mécaniques :

Elles présentent les avantages suivants :

- ✓ Temps cycle court
- ✓ Forte productivité
- ✓ Peuvent travailler dans des conditions très difficiles
- ✓ Force de pénétration très élevée
- ✓ Insensible à l'état du sol
- ✓ Coût opératoire faible
- ✓ Très grande robustesse
- ✓ Grande durée de vie
- ✓ Bonne stabilité
- ✓ Bonne visibilité et sécurité pour l'opérateur.

Inconvénients

- ✓ Très peu mobile
- ✓ Très chère à l'achat
- ✓ Déchargement sévère
- ✓ Nécessite un opérateur qualifié
- ✓ Possibilité de creuser sous le niveau du sol limité.

C- TRANSPORT

Le transport dans une mine à ciel ouvert ou une carrière est une opération technologique adoptée pour le déplacement de la matière abattue du chantier vers le point de déchargement.

Le transport des minéraux utiles et des stériles est l'un des principaux processus lors de l'exploitation des mines à ciel ouvert, qui influe sur le prix de revient des minéraux utiles de 30% à 70 %.

Le transport dans une mine à ciel ouvert prédétermine le mode d'ouverture et la méthode d'exploitation du gisement. Le calcul du processus dépend de :

- La distance de transport.
- La productivité.
- Les caractéristiques des roches à transporter.
- Le type d'engin de chargement.
- Les conditions géologiques du gisement.
- Le profil des pistes.
- L'état des pistes.

En fonction de ces éléments, on choisit la meilleure solution à adopter pour chaque cas particulier, il faut tenir compte aussi des conditions topographiques du site choisi.

Les modes de transports utilisés dans les mines à ciel ouvert sont :

- Par camion.
- Par voie ferrée.
- Par convoyeur.
- Par skip.
- Par couloir à chute (gravité).

- Combiné.



Fig.43. Camion CATERPILLAR 775F, mine de Boukhadra 2015.

D- MISE A TERRIL

Dès que les travaux miniers sont entrepris dans une mine à ciel ouvert, les problèmes de constitution des terrils et des remblais à minerai s'imposent de plus en plus à cause de l'augmentation progressive du volume de stérile et l'approfondissement des travaux d'exploitation.

L'aménagement des terrils doit répondre aux impératifs suivants :

- ✓ La capacité suffisante ;

- ✓ Le choix de l'emplacement convenable situé en dehors des terrains productifs et proche de la mine à ciel ouvert ;
- ✓ La sécurité du travail

D-1 DISTINCTION DES TERRILS

Selon l'emplacement des terrils par rapport au champ d'exploitation, on distingue des terrils intérieurs et des terrils extérieurs. Dans le premier cas, les terrils sont constitués dans l'espace vide créé par l'enlèvement des morts terrains et des minerais. Dans le second cas, on les place en dehors de la configuration finale de la mine à des endroits spécialement réservés à cet usage [9].

1. Terrils intérieurs

Ils sont généralement constitués lors de l'exploitation des gisements en plateaux ou en couches horizontales de grande étendue.

Dans le cas simple, la mise en terril se réalise directement par des excavateurs utilisés à l'enlèvement des morts terrains. S'il s'agit des roches dont l'abattage à l'explosif est une nécessité absolue, on utilise des excavateurs de découverte à godet unique dont l'organe de travail doit avoir une grande longueur ainsi qu'une grande capacité du godet. Par contre dans les terrains tendres, arrachés par des excavateurs à godets multiples, la mise en terril s'effectue au moyen des engins de transfert (sauterelle et pont de transfert).

2. Terrils extérieurs

Ils sont habituellement utilisés dans l'exploitation des gisements dressant et semi dressant exploités par la méthode des fosses emboîtées. La mise en terril se fait par des engins indépendants tels que la charrue de terril, le bulldozer, la chargeuse frontale, la remblayeuse...

Dans ce cas, la première étape des travaux consiste à constituer un remblai primitif qui servira comme point de départ pour l'extension postérieure du terril. Par ailleurs, on peut se forcer d'utiliser le relief de la région : ravin, dépression, flancs de coteau...

Remarque

Les méthodes modernes de concentration des minerais permettent d'envisager l'exploitation des gisements et des rejets (après concentration) à faible teneur mais à fort tonnage.

C'est ainsi que certains gisements et rejets des usines de concentration considérés jusque-là comme stériles (c'est-à-dire la teneur de coupure faible par rapport à celle exigée par les installations de concentration) peuvent être considérés aujourd'hui très rentables compte tenu des progrès de la méthode de concentration.

D-2 EXEMPLES DE TERRILS

Exemple 1 :les terrils des usines de la Gécamines Lubumbashi

Lubumbashi dans la partie sud - est de la République démocratique du Congo , est la deuxième plus grande ville du pays, après la capitale Kinshasa . Lubumbashi est la capitale minière de la République démocratique du Congo.

Ceci signifie également que la notion de gisement ou de stérile est une notion relative qui évolue dans le temps et dans l'espace compte tenu des progrès technique et scientifique.



LE TERRIL DE LA GECAMINE/LUBUMBASHI

Fig. 44. Terril de la GECAMINE, Lumumbashi.

- Le projet de la Société pour le Traitement du Terril de Lubumbashi (STL) naît en 1995-96 dans l'esprit de l'homme d'affaires belge George Forrest, dont le groupe est le premier employeur privé de la RDC.
- Objectif : investir 150 millions de dollars pour construire le plus gros four métallurgique d'Afrique et recycler 4,5 millions de tonnes de scories du terril pendant vingt ans.
- L'usine STL transforme des résidus contenant environ 2,2% de cobalt en un « alliage blanc » composé à 18% de cobalt, 11% de cuivre, le reste étant essentiellement du fer.

Exemple2 : Terril de Monte Kali

Monte Kali (« Kali » étant le nom usuel de la potasse en allemand) est un terril de sel, composé pour 96 % de chlorure de sodium, situé à Philippstahl, dans le Land de Hesse en Allemagne. C'est le plus grand et plus haut terril issu de l'exploitation de la potasse.

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

Ses dimensions atteignent 250 mètres de hauteur 1100 mètres de longueur et 700 mètres de largeur pour une surface de 55 hectares, représentant une masse estimée à 180 millions de tonnes, à laquelle s'ajoutent quotidiennement 20 000 tonnes de déchets de l'exploitation.



Fig.45 .Terril de Monte Kali.

Chapitre III ————— Eléments De L'exploitation A Ciel Ouvert

A 96%, le terril est composé de chlorure de sodium. Du sel donc. Autant dire que la pollution de l'environnement est un réel problème. Tout ce sel rentre dans le sol, les rivières, et les eaux souterraines. Peu d'espèces peuvent y pousser, et la rivière Werra à proximité est devenue inhabitable pour des organismes d'eau douce.

La potasse est encore très utilisée comme engrais, le sel proprement dit, qui représente les trois-quarts du total, a trop peu de valeur pour être commercialisé. Il est donc entassé aux abords des grandes mines, comme à Heringen-Werra (Hesse) où 22 000 tonnes de sel viennent chaque jour s'ajouter aux 188 millions déjà extraites. Un désastre écologique, car la pluie entraîne le sel et des substances toxiques dans les rivières et les nappes phréatiques environnantes. La Werra est d'ailleurs réputée pour être le cours d'eau le plus pollué d'Europe

Monte Kali est également une attraction touristique qui draine plus de 10.000 visiteurs chaque année.



Fig.46. Monte Kali, attraction touristique.

Références bibliographiques :

- [1] B.Boky ; Exploitation des mines ; éditions MIR, 812p ;1968 ;
- [2] Bernard Bourguine ; Modélisation de la politique d'exploitation et dimensionnement des équipements miniers dans le cadre de simulations d'exploitations minières à ciel ouvert ;thèse docteur-ingénieur en sciences et techniques minières-option géostatistique ; Ecole nationale supérieure des mines de Paris ; 1986.
- [3] Cécile Coulombes ; analyse et optimisation des pratiques d'abattage a l'explosif dans une carrière de granulats, rapport d'option, option sol et sous-sol ; ref : 070704CCOU,2007.
- [4]D.Artignan,F.Cottard ;Éléments à prendre en compte pour l'évaluation des impacts environnementaux dans l'élaboration d'un Plan de Prévention des risques miniers (PPRM) BRGM/RP-52049-FR ; avril2003.
- [5] Dj.Merabet.Dj,Stepanov.V.,Principes de l'élaboration des mines à ciel ouvert ; 1^{ère} partie, Office des publications universitaires (OPU) ; 1989.
- [6] Hassan.Z.Harras; Mining Methods- Part II, Surface Mining – Planning and design of Open Pit Mining;2010.
- [7] Mehmet Ali Hindistan., MAD455 – Surface Mining, course programme; academic year fall semester,..2015-2016.
- [8] Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie Direction de l'Action Régionale, de la Qualité et de la Sécurité Industrielle (DARQSI) , F. POULARD , V. MARTINET ; rapport d'étude ;Contribution au développement d'outils d'aide à l'évaluation des aléas dans le cadre des PPRM,Aléa « mouvements de terrain » pour les gisements pentés et filoniens Partie 1 : Inventaire et principales caractéristiques des gisements pentés et filoniens en France,2005.
- [9]N.Chibka ; Exploitation des gisements métallifères ; Office des publications universitaires (OPU).
- [10] Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokryska Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.-J ; SaveM. Exploitation minière et traitementdes minerais. Collection « La mine en France».Tome 06.fevrier2017.
- [11] Poulard, F., Kister, P., Charles N. ; Lexique, Collection « Mine de France » ; Tome 13 ; 2017.
- [12] Teuka .A.R.Putra,Chapter8,Stripping Ratios,Pits Limits &Cutoff Grade Optimization,USM 2014.
- [13] Tshibangu. J.P, Ressources minérales par chambres et piliers, Polytech MONS Journée SBGIMR 5 mai 2008.
- [14] Vocabulaire de l'exploitation à ciel ouvert ; allemand/anglais/espagnol/français ; ISSN 0766.1207...www.techbooksoft.blogspot.com