



République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessa – Tébessa

معهد المناجم

Institut des mines



Filière : Génie minier

Option : Exploitation minière

Niveau : 2ème année Master

Thème du mémoire

**APPROCHE DE DIMENSIONNEMENT DES PILIERS DE
PROTECTION DANS LES CONDITIONS DE TRAVAIL DANS
LA MINE DE BOUKHADRA**

Présenté par :

 **GHEZZAZ ABIR**
 **BOUKERNOUS OMAR**

Devant le jury :

	Grade	Etablissement
Président : Derbal Chamseddine	M.A.A	Université Larbi Tébessi - Tébessa
Encadreur : Saadaoui Salah	M.A.A	Université Larbi Tébessi - Tébessa
Examinatrice : BOUTERFIF Leila	M.A.A	Université Larbi Tébessi - Tébessa

Année universitaire : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ

فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ

وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ "

... A la mémoire de ma mère

BOUKERNOUS OMAR

Je dédie cette thèse à :

Ma femme LELLA

Mon fils : AHMED SADJED

Mes filles : AJNADINE & ANDALOUS

A ma famille :

Mon père الله يطول ويبارك في عمره

Mes sœurs et mon frère et leurs enfants

A mes amies et collègues ...



BOUKERNOUS OMAR

Je dédie cette thèse.



A ma très chère mère :

"BEICHA SALHA "

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

CHEZZAZ ABIR

Remerciement :

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de notre stage et qui nous ont aidées lors de la rédaction de ce mémoire.

Nous voudrions dans un premier temps remercier, notre encadreur de mémoire M.SAADAOUIS, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

- A notre maître et président de jury de thèse, Monsieur Derbal chamseddine*
- A notre maître et examinateur de thèse madame bouterfif leïla*

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de l'université de TEBESSA,

Nous tenons à témoigner toute notre reconnaissance à L'ingénieur Mekahlia et tous les équipes de la mine de Boukhadra qui nous a beaucoup appris sur les défis à relever sur terrain et pour son aide dans la réalisation de ce mémoire.

Résumé :

Intitulé . Approche De Dimensionnement Des Piliers De Protection Dans Les Conditions De Travail Dans La Mine De Boukhadra

Présenté par ,

- *GHEZZAZ ABIR*
- *BOUKERNOUS OMAR*

La stabilité d'une mine repose essentiellement sur la capacité des piliers à soutenir le poids des terrains sus-jacents, La rupture des piliers peut entraîner un affaissement de la surface topographique. Ce qui entraîne en revanche, d'importantes pertes humaines, matérielles et financières

Après mis en évidence une recherche bibliographique relativement exhaustive qui a été consacré aux Mouvements des terrains (Description, classification, typologie) ayant des conséquences vertigineuses tant pour les personnes que pour les ouvrages miniers

Nous avons opté pour le concept de l'aire tributaire pour dimensionner les piliers, et nous avons appliqué les aspects théoriques de la méthode susmentionnée par l'application des paramètres numériques des conditions de la mine de fer Boukhadra.

الخلاصة

مقارنة تحميم أعمدة الحماية في ظروف العمل في منجم بوخضرة

مقدمة من طرف:

- خزاز عبيد
- بوكرنوس عمر

يعتمد استقرار المنجم في المقام الأول على قدرة الأعمدة على تحمل وزن طبقات الأرض التي تعلوها ، ويمكن أن يتسبب كسر الأعمدة في هبوط /تغيير السطح الطبوغرافي. هو ما قد يؤدي إلى خسائر بشرية ومادية ومالية كبيرة.

بعد تسليط الضوء على بحث جيولوجي شامل نسبيًا تم تخصيصه للحركات الأرضية (الوضوح ، التصنيف ، ...) التي لها عواقب مدمرة على كل من الأشخاص والأعمال و المكونات المنجمية التعدين

اخترنا مفهوم منطقة الرافد l'aire tributaire لحساب و تحميم الأعمدة ، و طبقنا الجوانب النظرية للطريقة المذكورة أعلاه من خلال التطبيق العددي للظروف الخاصة بمنجم الحديد-بوخضرة

Abstract:

Title: Sizing Approach for Protective Pillars in Working Conditions in the Boukhadra Mine

Presented by :

- *GHEZZAZ ABIR*
- *BOUKERNOUS OMAR*

The stability of a mine depends primarily on the ability of the pillars to support the weight of the overlying land. Breaking of the pillars can lead to subsidence of the topographic surface. However, this leads to significant human, material and financial losses

After highlighting a relatively exhaustive bibliographic research which was devoted to Land movements (Description, classification, typology) having dizzying consequences both for people and for mining works

We opted for the concept of the tributary area to dimension the pillars, and we applied the theoretical aspects of the above-mentioned method by applying the numerical parameters of the conditions of the Bukhara mine

Table des Matières

Table des Matières	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
ABSTRACT.....	01
INTRODUCTION	02
Cadre géologique de la mine de Boukhadra	04
▪ Situation géographique	05
▪ Géologie du site	06
▪ Stratigraphie	06
▪ Tectonique	07
▪ Géomorphologie	11
▪ Hydrogéologie.....	11
♦ Description de gisement de Boukhadra.....	12
▪ Nature du minerai exploité	12
▪ Composition minéralogique.....	13
▪ Eléments constituant la substance.....	14
▪ L'exploitation du minerai de Boukhadra	15
♦ Technologie d'exploitation de la Mine de Boukhadra	
-Quartier souterrain- : (Modes, méthodes & paramètres).....	16
▪ Mode d'ouverture	17
▪ Les avantages de l'ouverture par galerie au jour.....	17
▪ L'inconvénient de ce mode d'ouverture.....	17
▪ Méthode d'exploitation	17
▪ Facteurs de choix.....	17
▪ Description de la méthode d'exploitation appliquée	18
▪ Les avantages de la méthode.....	20
▪ Les Inconvénients de la méthode.....	21
▪ Réserves Géologiques De La Mine.....	21
▪ Réserves Exploitable Souterraines.....	22
▪ Réserves Géologiques Et Exploitable De La Mine.....	22
▪ Homogénéisation.....	23

◆	Caractérisation et Classification	
	Géomécaniques du massif de Boukhadra	24
	▪ La Résistance à la compression.....	24
	▪ La Résistance à la traction.....	27
	Mouvements des terrains (Description, classification, typologie)	
	-Recherche bibliographique-	29
	▪ Introduction :	29
	▪ Rappel et généralités.....	30
	▪ Définitions :	31
◆	Classification des mouvements de terrains :	32
	▪ Selon la vitesse	33
	▪ Selon la nature	41
	▪ Selon l'état	45
◆	Types de mouvements de terrains (typologie)	47
◆	Évaluation des risques liés au mouvement de terrain	51
◆	Les affaissements & l'activité minière	51
	▪ Conditions d'apparition d'un affaissement.....	52
	▪ Affaissements du type fontis.....	53
	Dimensionnement des Piliers	55
	• Introduction.....	55
	• Principes de base de la conception (dimensionnement) des piliers.....	56
	• Principes des charges.....	56
◆	Concept de l'aire tributaire	56
	• Description de la Théorie de l'Aire Tributaire	56
	• Détermination de la charge de pilier & Pression sur pilier	59
	• Taux d'extraction :	61
	• Détermination de la résistance du pilier.....	61
	• Facteur de sécurité.....	65
◆	Taille des piliers	67
◆	Autres méthodes d'estimation des charges	68
◆	Application numérique	68
◆	Interprétation des calculs	73
◆	Conclusion	76
	Bibliographies	79
	Annexes	

Liste des figures

N°	Désignations	Pages
CHAPITRE I		
FIG I-1	Situation géographique de la Mine de Boukhadra	05
FIG I-2	Carte géologique détaillée de BOUKHADRA 1/50000 ^é	09
FIG I-3	Interprétation Géologique & Colonne Stratigraphique Du Dj. Boukhara	10
FIG I-4	Plan de Masse Mine BOUKHADRA	11
FIG I-5	modélisation en 3D du gisement de Boukhadra	13
FIG I-6	<i>Gradins d'exploitation à C.O – quartier AIN ZAZIA -Mine Boukhadra</i>	15
FIG I-7	Projection verticale Mine Boukhadra	16
FIG I-8	Galerie de niveau 1105, BOUKHADRA,	16
FIG I-9	Illustration de quelques méthodes d'exploitation utilisées à la Mine de Boukhadra	18
FIG I-10	Représente la méthode d'exploitation par sous niveau abattue- niveau 1105	20
CHAPITRE II		
FIG II-1	Echelle des vitesses de mouvements de versant utilisé en Amérique du nord – et dans classification CRUDEN & VARNE 1996	33
FIG II-2 a	Image illustrant un affaissement après le foudroyage d'un gisement exploité	34
FIG II-2 b	Illustration retrait-gonflement des argiles	35
FIG II-3	Illustration glissement lent	36
FIG II-4	Image illustrant un Effondrement après le foudroyage d'un gisement exploité	37
FIG II-5	Principales phases de l'évolution d'un fontis	38
FIG II-6	Coulées de boues	39
FIG II-7	Images représente : coulées boueuses	40
FIG II-8	Mécanismes de mouvements de versants	41
FIG II-9	Eléments morphologiques principaux d'un glissement de terrains (d'après CRUDEN & VARNE 1996, FLAGEOLLET 1989)	42
FIG II-10	Illustration : glissement plan & rotationnel	43
FIG II-11	Illustration & image : basculement	43
FIG II-12	Illustration : éboulement	44
FIG II-13	Illustration : mouvements selon l'état	46

FIG II-14	Morphologie d'un glissement	48
FIG II-15	Affaissements de type Fontis	53
CHAPITRE III		
FIG III-1 a	Le concept de charge de l'aire tribulaire	58
FIG III-1 b	Schéma de principe de la théorie de l'aire tribulaire tiré de Hauquin et al. (2016).	58
CONCLUSION		
FIG N°IV-1	Classification des piliers en fonction de leur niveau d'endommagement (Thomas Hauquin., 2016.)	77

Liste des tableaux

TABLEAU N°	Désignations	Page
CHAPITRE I		
Tableau N° I-1	Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en souterrain	15
Tableau N° I-2	Les dimensions de la galerie du niveau 1105	17
Tableau N° I-3	Régime de travail à la Mine Boukhadra	21
Tableau N° I-4	Réserves géologiques et exploitables de la mine Boukhadra	22-23
Tableau N° I-5	Les propriétés physico-mécaniques du Djebel de Boukhadra	24
Tableau N° I-6	Résistance à la compression de la marne grise	25
Tableau N° I-7	. Résistance à la compression de la marne jaune.	25
Tableau N° I-8	Résistance à la compression de la marne minéralisée	25
Tableau N° I-9	Résistance à la compression de minerai de Fer.	26
Tableau N° I-10	Résistance à la compression du Calcaire	26
Tableau N° I-11	Classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra en fonction de la résistance à la compression	26

Abstract

La stabilité d'une mine repose essentiellement sur la capacité des piliers à soutenir le poids des terrains sus-jacents, ainsi que sur la capacité du recouvrement à conserver son intégrité. La rupture des piliers (suite diminution de leur résistance) peut entraîner un affaissement de la surface topographique. Ce qui entraîne en revanche, d'importantes pertes humaines, matérielles et financières

Il est essentiel, pour répondre à la problématique de la présente étude, d'exposer l'état des connaissances actuelles relatives au comportement mécanique des piliers de mine dans leur environnement.

La première section de notre mémoire sera consacrée à la description de géologie, modes et méthodes d'exploitation utilisés et adoptés en souterraine de la Mine de Boukhadra ,

Dans le deuxième chapitre, Nous mettrons en évidence une recherche bibliographique relativement exhaustive qui a été consacré aux Mouvements des terrains (Description, classification, typologie) ayant des conséquences vertigineuses tant pour les personnes que pour les ouvrages susceptibles d'être le résultat d'une modification du sol ou sous-sol par des phénomènes naturels ou anthropiques (extraction, terrassements, mise en œuvre de : remblais et terrils, constructions...) et leurs relations avec l'activité minière,

Pour le troisième chapitre : Nous présenterons le concept ou la méthode de l'aire tribulaire qui est utilisées pour définir la stabilité potentielle d'un pilier consiste à comparer la contrainte verticale qu'il supporte potentiellement, en raison du poids du recouvrement et de la géométrie de la mine et notamment la hauteur du pilier puis nous identifierons une grandeur qui est couramment utilisée pour dimensionner les piliers et qui est le facteur de sécurité.

En fin de chapitre, nous avons appliqué les aspects théoriques de la méthode susmentionnée par l'application des paramètres numériques des conditions de la mine de Boukhara.

Nous concluons en définissant, conformément à ce qui aura été mis en évidence dans les chapitres, les points qui nécessitent des améliorations quant au dimensionnement et à l'évaluation de la stabilité des piliers en particulier et de la mine en général.

Introduction

Le choix de la méthode d'exploitation va dépendre des dimensions et de la configuration du gisement, de la valeur des minéraux qu'il renferme, de la composition, de la stabilité et de la résistance du massif rocheux et des impératifs de production et de sécurité, les piliers sont les éléments de base de l'exploitation minière souterraine par des différentes méthodes :

- L'exploitation par chambres et piliers pour des gisements horizontaux ou quasi horizontaux
- L'exploitation par chambres et piliers pour des gisements pentus
- L'exploitation par chambres-magasins
- L'exploitation par tranches montantes remblayées.

Plusieurs mines métalliques et non-métalliques sont exploitées par l'une de ces méthodes, et nécessitent une bonne connaissance et des bonnes pratiques pour le dimensionnement des ouvrages miniers et notamment les chambres et les piliers.

Une surestimation des dimensions pourrait conduire à une perte de temps, perte en récupération minière, etc. qui ne seraient guère acceptable en ce temps où la civilisation a besoin des ressources. Une sous-estimation conduirait à une perte de la mine, perte par rupture des piliers et effondrement des toits, qui ne sont d'aucunement acceptables.

La perte d'un seul pilier peut conduire à des conditions dangereuses des panneaux des piliers, aux instabilités des toits dans les couches, étages et chambres adjacentes, et au blocage des voies d'accès, de roulage et transport et chargement. La redistribution des charges causés par la perte d'un seul pilier peut surcharger les piliers adjacents, résultant en une perte d'une zone large, qui peut conduire en un éboulement catastrophique ou une fermeture graduelle ou un écrasement au fil du temps. Il peut y avoir une convergence excessive des galeries, une subsidence en surface, une disruption des couches surincombantes et peut causer un souffle d'air dangereux.

Des évidences empiriques et des études théoriques suggèrent qu'avec la réduction du ratio largeur sur hauteur des piliers, le potentiel pour une perte catastrophique augmente comme résultat d'une diminution rapide en résistance du pilier mince après avoir atteint son apogée en capacité de portance.



CHAPITRE I

Partie Générale : Géologie & Exploitation
Mine BOUKHADRA



Cadre géologique de la mine de Boukhadra

Les conditions géologiques et hydrogéologiques sont des facteurs déterminants du degré de difficulté et du coût de réalisation d'un ouvrage souterrain et elles ont une grande influence sur le choix des méthodes d'excavation et de soutènement. L'étude de ces conditions nous informe des problèmes potentiels, ce qui nous aidera à proposer des solutions qui permettront d'adapter ou pas le soutènement, le drainage et/ou les traitements spéciaux aux conditions rencontrées.

Ces conditions géologiques et hydrogéologiques sont donc des outils très importants pour le géotechnicien pour qu'il obtienne une image aussi complète que possible des caractéristiques du massif rocheux traversé.



Situation géographique

Le djebel de Boukhadra est situé à l'Est de l'Algérie à 45Km au Nord du chef-lieu de la wilaya de Tébessa, à 47Km de la mine de l'Ouenza, à 13Km des frontières Algéro-Tunisiennes et à 190Km au sud du complexe sidérurgique d'El Hadjar (W. Annaba). Le djebel de Boukhadra constitue un massif isolé qui s'élève au-dessus de la vallée de Morsott de 700 à 800m d'altitude. Avec un point culminant de 1463m.

Le gisement est entre les méridiens 8°-01' et 8°-04' Est et les parallèles 35°-40' et 35°-50' Nord.

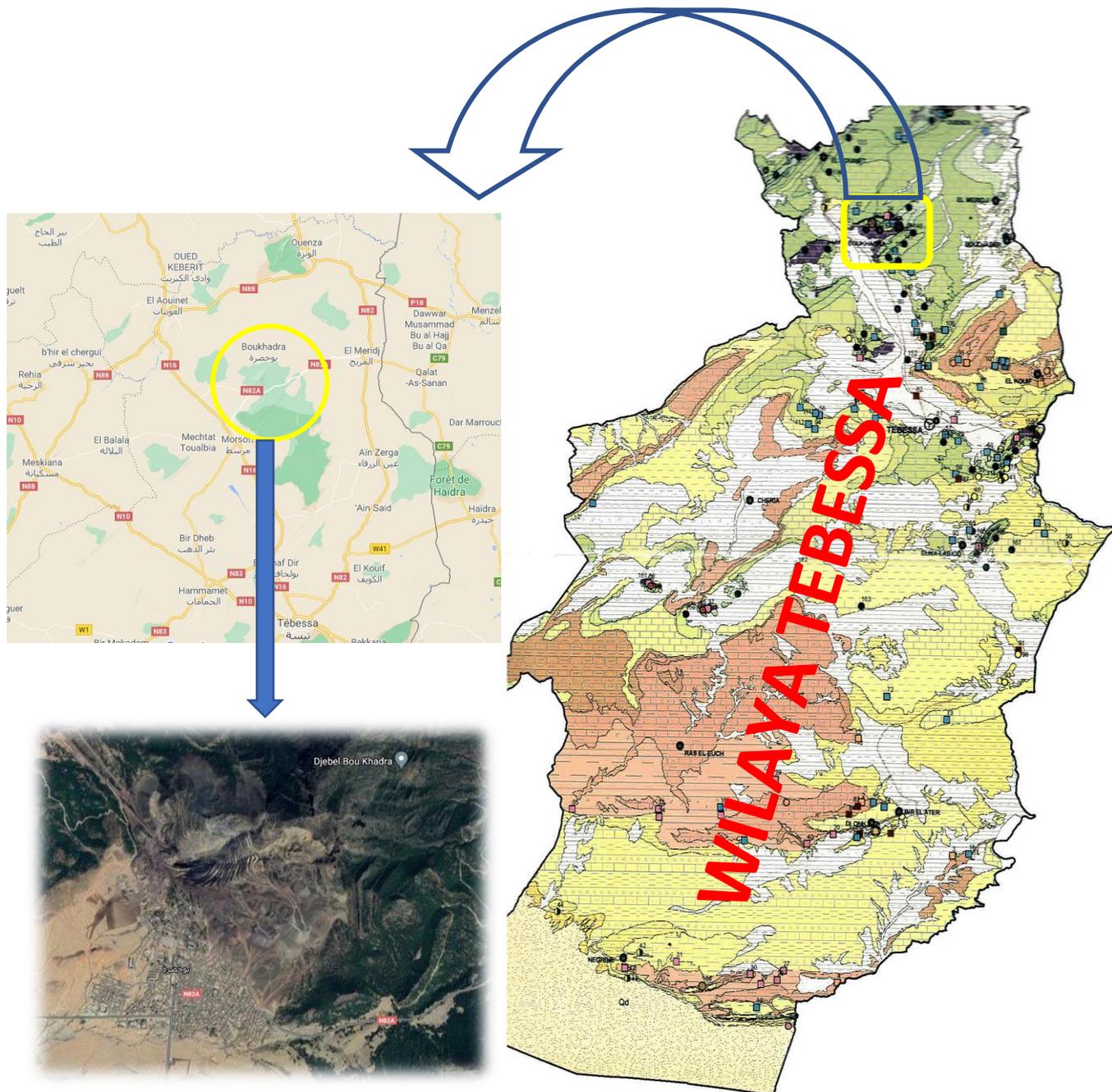


FIG I-1 : Situation géographique de la Mine de Boukhadra

Géologie du site

Stratigraphie

Les terrains du secteur de Boukhadra sont formés par des sédiments du Mésozoïque et une partie du Tertiaire et du Quaternaire pour le Mésozoïque, les formations sont formées par les sédiments du Trias et du Crétacé :

Le Trias : Les dépôts Triasiques rencontrés dans la région de Boukhadra sont représentés par les marnes bariolées, gypses, dolomies, débris de calcaires et degrés. Les roches du Trias se développent dans les parties Ouest, Sud et Sud Est et en contact anormal avec les &pas aptiens du crétacé (Diapirisme).

Le Cretace : Dans le profil du crétacé, nous retrouvons le Cénomaniens, l'Aptien, l'Albien, le Coniacien, et le Cénomaniens on a la série Aptienne, porteuse de la minéralisation est caractérisée par des marnes et des calcaires constituant la partie inférieure qui encaisse le Bite Sud, des calcaires récifaux construits, a organismes fossiles (rudistes) qui constituent le niveau porteur de la minéralisation principale et des grès et calcaires de la partie supérieure de l'Aptien non productif et on a :

-**L'Aptien** : Les dépôts ou les sédiments aptiens de la région Boukhadra occupent des vastes surfaces. L'aptien se présente sous forme de deux faciès bien distincts : -Faciès carbonate (calcaire) -Faciès terrigènes (marno-greso-calcaireux).

-**L'Albien** : La base et le sommet de l'albien sont surtout représentés par des marnes, la partie moyenne étant constituée dans une large mesure par des calcaires sublitographiques

-**Vraconien** . : La séquence est composée de minces lits de marnes avec intercalation d'argile marneuse noires et de calcaires marno-argileux. La puissance maximale est de (470m).

-**Le Cénomaniens** s'agit d'une série de marnes gris ou verdâtres grises, avec par endroits des intercalations de calcaires.

-**Turonien** : Les dépôts de cet âge s'observent dans la partie Ouest et Sud du domaine trait& Il s'agit surtout de calcaires épais et massif pelitique marneux dans la partie basale, avec de rares minces intercalations de marnes. La puissance est variable, décimétrique jusqu'aux quelques centaines de mètres.

- **Coniacien** : contient les marnes argileuses avec intercalation d'argile marneuse et par endroit de calcaire marneux

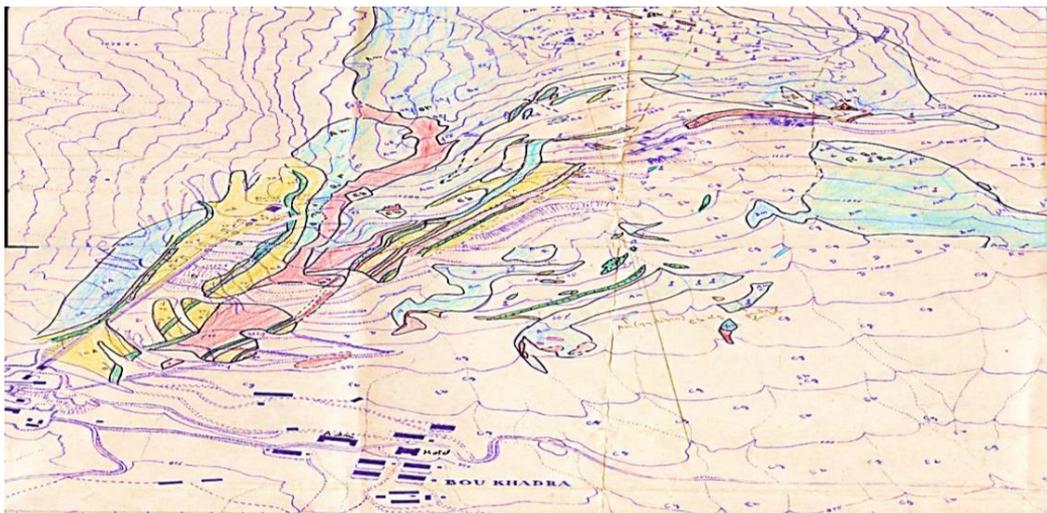
Le Tertiaire : Les dépôts classés comme Tertiaire (miocène) sont observés seulement dans la partie occidentale du domaine étudié et sont représentés par des conglomérats à éléments variés, cimentés par une matrice carbonatée et des intercalations de roches gréseuses.

Le Quaternaire : Les dépôts récents du Quaternaire sont formés par un matériel caillouteux, blocs de calcaires, grés, débris de minerai et de conglomérats. Ils sont répandus aux flancs de la montagne et dans les parties basses du relief.

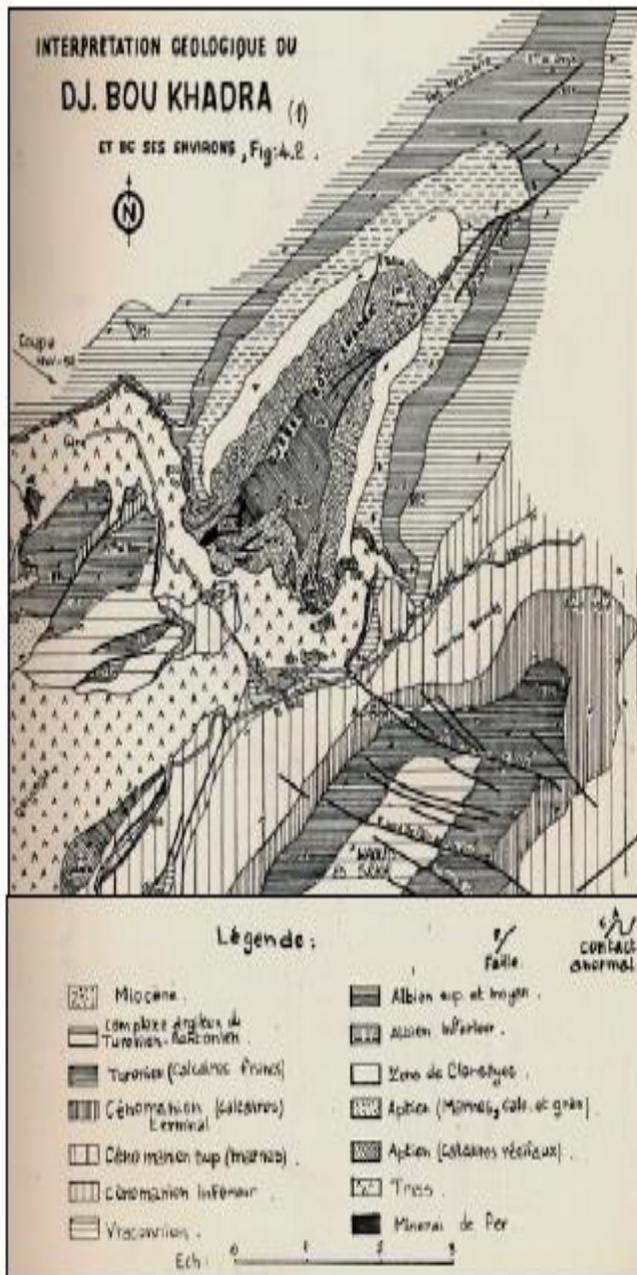
Tectonique

La région de Boukhadra est marquée par deux phases tectoniques ; la phase de plissement et la phase de tectonique cassante. Dans la structure anticlinale de Boukhadra, on observe deux grandes dislocations tectoniques :

- ✓ -La 1^{ère} se prolonge presque parallèlement à l'axe de l'anticlinal à partir du pic vers la terminaison périclinale.
- ✓ -La 2^{ème} zone de dislocation tectonique de direction WNW-ESE coupe la structure dans sa partie centrale en deux parts, l'amplitude de cette dislocation peut arriver jusqu'à 1000 mètres.
- ✓ -D'autres failles, sans importance majeure sont à signaler. Le Diapirisme : Le Triasique avait une contribution principale dans la formation de la structure du Djebel Boukhadra.



Extrait de la carte géologique de gisement de Boukhadra



Ages géologiques		Libologie	Observations
ALBIEN INF	FORMATION SUPERIEURE	II	Horizontes à polypten Alternance argilo-gréseuse Microbriches Calcaires massifs Grès fins rouges Marnes grises
		I	Calcaires Grès fins à matrice carbonatée Biopellicules à orthoïdes et biohermes Grès Microconglomérats Calcaires bioclastiques Marnes sablonneuses Calcaires gréseux, silt et grès
APTIEN	FORMATION MEDIANE	III	Marno-calc. Grès Biopellicules à formidibles Fe > 30m Biopellicules à formidibles Calcaires à radures Fe Calcaires à massifs Microbriches Biopellicules Marnes grises ou jaunes Grès ocreux
		II	Calcaires collitiques (ou bioclastiques) Calcaires bioclastiques Marnes jaunes ou grises à nodules carbonatés Fe
		I	Calcaires collitiques (ou bioclastiques) Calcaires bioclastiques Marnes jaunes ou grises à nodules carbonatés Fe
FORMATION INF		Fe (Bière minérale (brazotto-gothin) 1.5m) Grès quartzites rouges Argiles siliceuses vertes Marnes noires à la base M Marnes varicolores à gypse	

FIG N° I-3 : INTERPRETATION GEOLOGIQUE & Colonne stratigraphique DU DJ. BOUKHADRA

Géomorphologie

Le gisement ferrugineux de Boukhadra, appartenant au domaine de l'Atlas saharien est localisé dans le massif montagneux de Djebel Boukhadra, caractérisé par une structure anticlinale très simple de direction NE-SO avec une terminaison périclinale au NE. Le Djebel Boukhadra s'étend sur une longueur de 7 à 8 Km et une largeur variant de 3 à 5 Km, suivant une direction NE-SO. Les côtes absolues dans les limites de la concession minière variant de

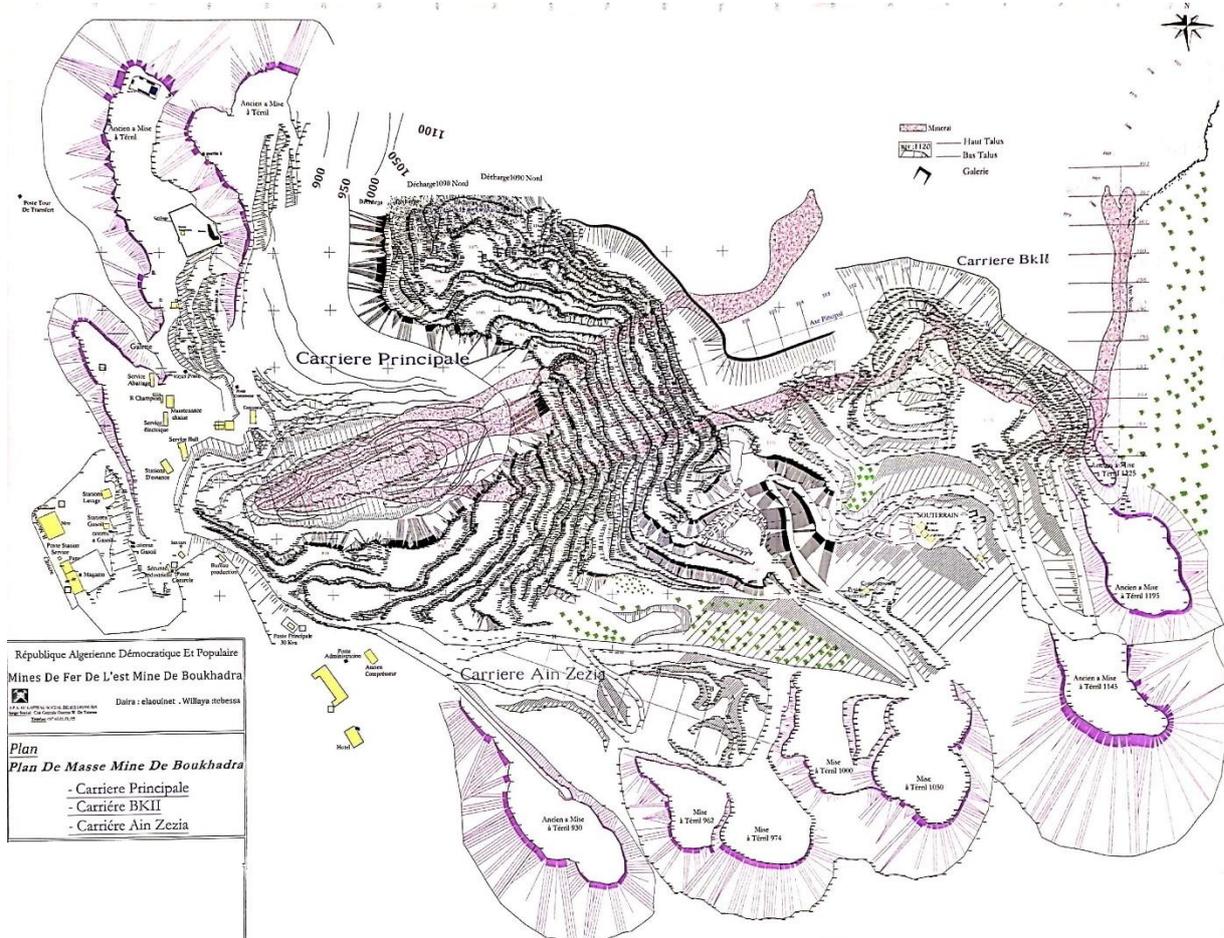


Fig N° :I-4 Plan de Masse Mine BOUKHADRA

Hydrogéologie

D'après les études hydrogéologiques le niveau hydrostatique est à 818m. Dans le niveau amont 926m, un mince filet d'eau apparaît entre les marnes. Le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible, à l'exception des multiples petits chéneaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsème de Djebel Boukhadra

Le réseau hydrographique dans la région de la mine de Boukhadra est faible, à l'exception des multiples petits chéneaux d'écoulement pluviaux sans importance majeure qui parsème de Djebel Boukhadra

Description de gisement de Boukhadra

Nature du minerai exploité :

Le minerai exploité est du fer sous forme d'oxyde de fer montré par l'hématite rouge (Fe_2O_3) présente en abondance dans ce gisement avec une teneur moyenne de 54% de fer. Le gisement est de forme ventriculaire, dont la genèse est hydrothermale ou sédimentaire, d'une longueur de 900 à 2200m et d'une puissance variant de 10 à 15m.

Globalement, le gisement de BOUKHADRA est composé de quatre (04) corps minéralisés principaux :

- Corps principal ;
- Corps Nord ;
- Corps Médian ;
- Corps Sud ; et les petites veines de moindre importance.

I. **Le corps principal** est localisée dans la partie profonde de la carrière (816 – 868). Il est caractérisé par une longueur de 300m en direction, une profondeur de 30m (Jusqu'au niveau sidérolitique) et une puissance moyenne de 70m environ. Ce corps représente la racine (tronc commun) des autres corps miniers.

II. **Le corps Nord** est caractérisé par une longueur de 800m (jusqu'au PIC), une profondeur de 180m et une puissance moyenne de l'ordre de 30m.

III. **Le corps Médian** , de dimension sensiblement supérieure par rapport aux corps Nord et Sud a une longueur de 500m, une profondeur de 200m en aval pendage et une épaisseur moyenne de 35m.

IV. **Le corps Sud** : qui s'est développé dans trois directions différentes et qui renferme 64% des réserves globales du gisement.

- ✓ La direction N-E / S-O qui est la direction de l'axe principal entre la coupe 125(ouest) et la coupe 100 (Est) où les réserves sont estimées à environ 24 millions de tonnes.
- ✓ La direction N.O/S. E dont les réserves est de l'ordre de 6 millions de tonnes.
- ✓ Enfin, la direction S/N (axe Nord) où les réserves est évaluée à 6 millions de tonnes.

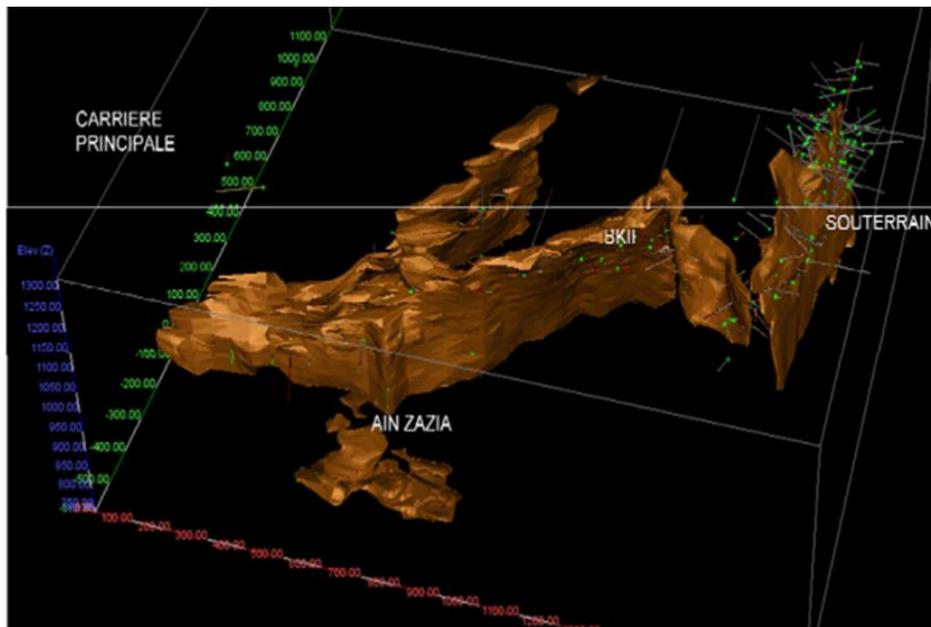


FIG N° I-5 : modélisation en 3D du gisement de Boukhadra

Les corps miniers Nord, médian, petite veine et une partie du corps Sud ont déjà fait l'objet d'évaluation dans le projet de la carrière principale dont le tonnage s'élève à 25 millions de tonnes. La morphologie des corps minéralisés est plus ou moins simple, elle est de type filonien, leur puissance varie entre 30 à 40m.

Le filon N-O/S-E à un pendage plus raide (80 à 85°) Nord-est est affecté par une tectonique cassante plus ou moins intense. Les roches encaissantes pour les deux filons sont représentées par des marnes sableuses (gréseuses) de couleur jaune et grise à intercalation de bancs calcaire de 5 à 10m au mur et par des calcaires ou calcaire marneux avec une intercalation de lentilles marneuses au toit.

Quant au filon Nord, comparativement aux autres filons, il est caractérisé par des dimensions plus réduites (épaisseur moyenne = 15à 20m) et un pendage de 50 à 60% vers l'Est. Les roches encaissantes sont de type carbonaté, parfois dans la partie Sud du filon, le minerai est encaissé dans une lentille marneuse intercalée dans de grandes masses de calcaire Aptien.

Composition minéralogique

Le minerai exploité est constitué principalement d'hématite, le constituant majeur du minerai, goethite et autres ocres limonitiques. Il est issu de l'oxydation de la sidérose située au-dessous de niveau hydrostatique.

- a) *L'hématite (Fe_2O_3)* : l'hématite se présente sous plusieurs formes. Elle est pulvérulente de couleur bleu noire rougeâtre, il s'agit d'un minerai riche, dur et homogène laissant souvent apparaître une trame rhomboédrique héritée du minerai carbonaté.

- b) La *goethite* ($FeOOH$) : La goethite forme des encroûtements à surface mamelonnée, brillante. Elle accompagne souvent l'hématite et elle est très fréquente dans les géodes.
- c) La *limonite* [Terme englobant un ensemble d'hydroxydes de fer (type $FeO-OH, NH_2O$)]: Les ocres limonitiques correspondent à des argiles imprégnées de limonites presque toujours associés à la goethite en encroûtement. En plus de ces produits oxydés, on trouve aussi dans le minerai exploité de la calcite blanche en grands cristaux spathiques de 1 à 5 cm le niveau hydrostatique.
- d) La *sidérite* ($FeCO_3$) : Elle caractérise le minerai primaire sous le niveau hydrostatique.
- e) Les *minéraux du « cuivre gris »* aux sulfures où Cu accompagne As ou Sb] : L'examen des données chimiques montre deux populations :
- Une population représentée par des tétraédrites, il forme des disséminations au sein de l'encaissant silicifié. Il peut être associé à la calcite dans les fissures. Au microscope, ce minéral forme des cristaux automorphes se plaçant entre les grains de quartz qu'ils corrodent.

Une population représentée par des tétraédrites avec des teneurs en As de 4 à 7 % et une population nettement plus riche en As contenant 9 à 11 % d'As.

Éléments constituant la substance :

- SiO_2 : 6 à 9
- CaO : 3.5 à 8 %
- MN : 2.0 à 3 %
- MgO : 0.2 à 0.40 %
- S : 0.04 à 0.10 %
- Cu : Trace
- P : 0.002 à 0.01 %
- Pb : 0.005 à 0.02 %
- Zn : <ou égale 0.01 %
- H_2O : 2 à 6 %
- Na_2O+K_2O : 0.05 à 0.3 %
- Al_2O_3 : 0.5 à 0.8 %
- $P.F$: 6 à 10

L'exploitation du minerai de Boukhadra

Le minerai est exploité par deux méthodes d'exploitation :

- Exploitation à ciel ouvert.
- Exploitation souterraine.

Exploitation à ciel ouvert : Le djebel Boukhadra étant un relief montagneux exploité par des demi-tranchées.



Fig N° I-6 : **Gradins d'exploitation à C.O – quartier AIN ZAZIA -Mine Boukhadra**

niveau abattu dont l'ouverture est faite par des galeries au jour. L'exploitation souterraine est effectuée suivant trois axes : Axe Nord, Axe Principal et 1 Axe Sud Est ;

On a cinq phases d'exploitation qui contiennent plusieurs types d'ouvrages souterrains verticaux (cheminées), inclinés (montages, descenderies), horizontaux (galeries).

Le tableau donne les profondeurs moyennes et angle de pendage du gîte exploité en souterraine :

	Profondeur (m)	Angle de pendage(°)
Axe principal	215	54
Axe Nord	391	60
Axe Sud-Est	320	54

Tableau N° :I-01 **Profondeurs moyennes et angles de pendages du gîte exploité en souterrain**

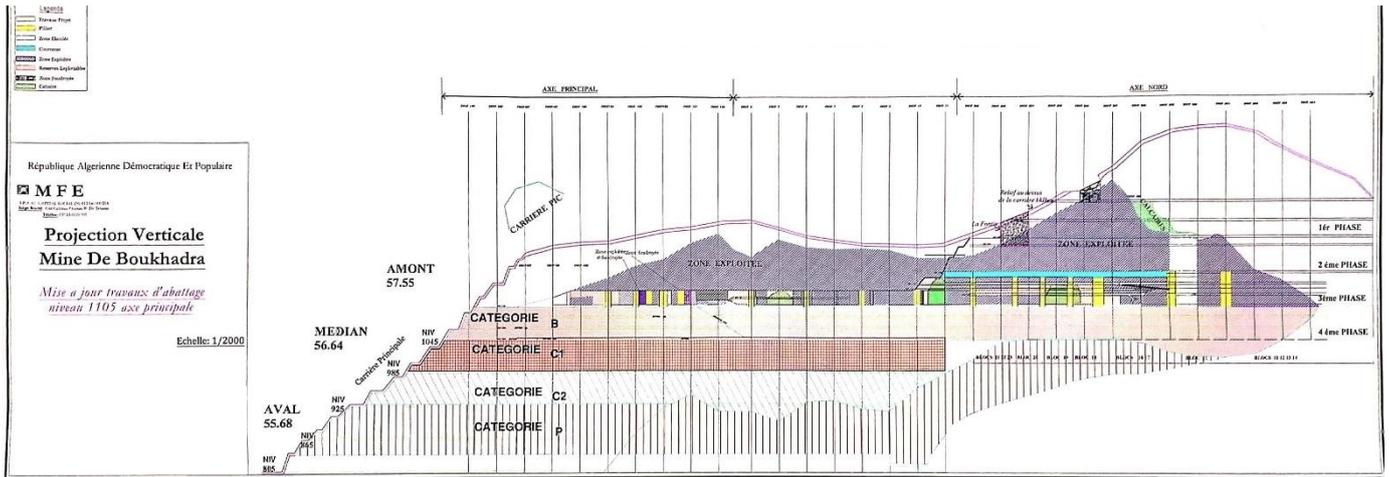


Fig N°I-7 : Projection verticale Mine Boukhadra

Technologie d'exploitation de la Mine de Boukhadra

- Quartier souterrain - :

(Modes, méthodes & paramètres)

Mode d'ouverture :

Le gisement de Boukhadra est situé dans un relief montagneux et considéré comme un gisement dressant de type filonien avec un pendage supérieur à 54° et de puissance moyenne par conséquent l'ouverture est réalisée par galerie au jour creusée au stérile (mur de gîte) jusqu'à atteindre le corps minéralisé, cette galerie est située au niveau 1105m et elle constitue le niveau de base de la 3ème phase et le niveau de tête de la 4ème phase. Elle est utilisée pour le roulage (le transport du minerai exploité), l'aérage, la circulation des ouvriers et du matériel nécessaire pour les différents travaux de mine



FIG N°I-8 : Galerie de niveau 1105, BOUKHADRA,

Les dimensions de la galerie sont représentées par le tableau suivant :

Paramètre	Valeur	Unité
Hauteur moyenne	4	M
Largeur moyenne	3	M
Section	12	M
Longueur	800	M

Tableau N° I-02 : Les dimensions de la galerie du niveau 1105

Les avantages de l'ouverture par galerie au jour :

Le grand avantage de ce mode d'ouverture par rapport aux autres modes qu'il convient aux reliefs montagneux pour :

- Les travaux d'ouvertures sont simplifiés étant donnée la facilité de leurs organisations ;
- Assure un aérage naturel ;
- Le transport se déroule dans des bonnes conditions ;
- Possibilité d'emploi du transport sur pneus (camion) ou sur rails ;

L'inconvénient de ce mode d'ouverture :

Les galeries au jour ne permettent pas l'accès aux étages des différents niveaux (plus profonds) .

Méthode d'exploitation :

Le choix de la méthode d'exploitation dépend des dimensions et de la configuration du gisement, de la valeur des minéraux qu'il renferme, de la composition, de la stabilité et de la résistance du massif rocheux et des impératifs de production et de sécurité (parfois conflictuels)

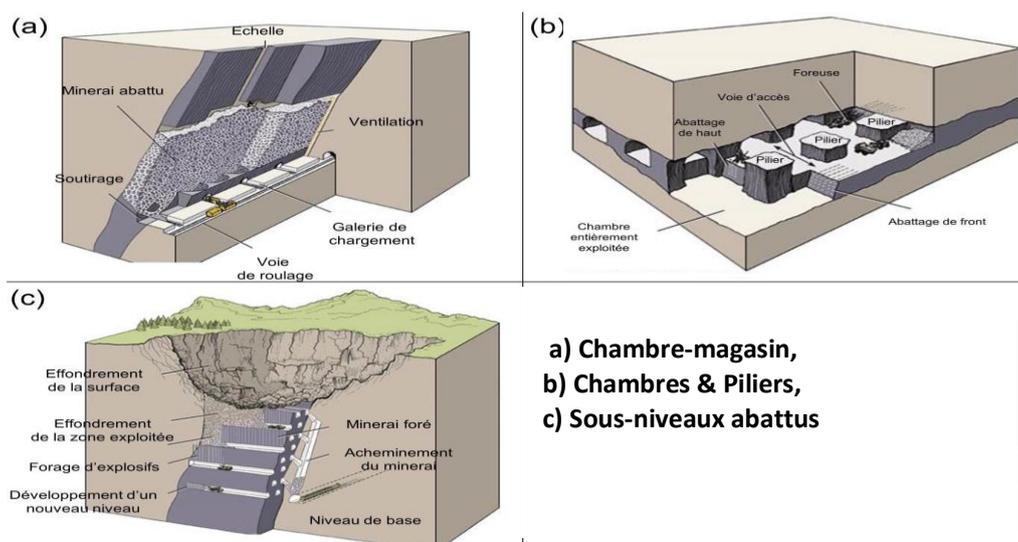
Facteurs de choix :

Chaque mine est un cas particulier, mais toutes les méthodes d'exploitation ont des objectifs communs : la rentabilité et la sécurité. Le choix de la méthode d'exploitation se fait de manière à obtenir un débit maximal d'extraction à un coût minimal, avec le moins de risque possible pour les mineurs. Le choix de la méthode d'exploitation dépend de plusieurs facteurs à savoir :

- Les caractéristiques géologiques du gisement : sa forme, ses dimensions, sa continuité, la position du gisement par rapport au relief;

- Les caractéristiques minéralogiques et physiques du minerai et celles des roches encaissantes ;
- Le pendage et la puissance de la couche minéralisée ;
- La valeur des minéraux, et leur composition ;
- La stabilité et la résistance du massif rocheux et des impératifs de production et de sécurité ;

Au niveau de la mine de Boukhadra (quartier souterrain), plusieurs méthodes ont été expérimentées (chambre magasin, sous niveaux foudroyés et sous niveaux abattus). Après, il a été retenu que la méthode d'exploitation par sous niveaux abattus est la méthode la plus adaptée dans la veine Sud de Boukhadra, car celle-ci présente un fort pendage et une puissance notable. Cette méthode se pratique en chantiers ouverts. Le remblayage consolidé des vides permet de récupérer ultérieurement des piliers laissés en place, de sorte que l'on obtient un taux très élevé de récupération du minerai.



a) Chambre-magasin,
b) Chambres & Piliers,
c) Sous-niveaux abattus

FIG N°1-9 Illustration de quelques méthodes d'exploitation utilisées à la Mine de Boukhadra : Description de la méthode d'exploitation appliquée : méthode par sous-niveaux abattus

Elle est L'une des différents types d'abattage, de la méthode dite : " *L'exploitation par tranches montantes remblayées*" utilisée dans l'exploitation de gisements fortement pentus inclus dans un massif rocheux relativement stable. Le minerai est abattu et déblayé par tranches horizontales prises en montant, et le remblai mis en place au fur et à mesure. Cela permet d'extraire les minéralisations les plus intéressantes, laissant en place celles qui le sont moins. Ensuite, les vides sont remblayés

de manière à former un plancher de travail comme pour la méthode précédente,

Pour sa part *la méthode par sous-niveaux abattus* : Le remblayage consolidé des vides permet la récupération ultérieure des piliers laissés en place, de sorte que l'on obtient un taux très élevé de récupération du minerai. Le gisement est découpé en panneaux dans lesquels sont tracés des sous-niveaux reliés par un plan incliné. Ces panneaux sont ensuite subdivisés en chambres et piliers alternants, et une voie de desserte est tracée à la base du gisement que l'on équipe de points de soutirage, la partie inférieure de la chambre étant aménagée en entonnoir, de manière que les matériaux abattus glissent vers ces derniers. Des galeries sont creusées dans les niveaux supérieurs pour le passage de l'engin de foration. L'abattage par sous-niveaux est une méthode productive, en grande partie parce que la foration peut être entièrement mécanisée et que l'appareil de foration peut travailler sans interruption. La méthode est aussi relativement sûre, du fait que la foration se fait en galeries, et l'évacuation des matériaux à partir de points de soutirage

Pour le cas de la Mine de Boukhadra :

- Le champ minier est divisé en étages de 60 m de hauteur, Hauteur de sous niveau de 20 m ;
- La foration est réalisée par trous profonds en éventail et s'effectue par chariots de foration, travaillant à l'air comprimé.
- Le chargement des trous profond effectue par une machine de chargement (compresseur de la matière explosive)
- L'abattage s'effectue à l'explosif par tir électrique, Le chargement et le transport de minerai aux blocs d'exploitation sont assurés par une chargeuse transporteuse pneumatique de capacité (3.8 m³ de godet).
- La charge du minerai transporté est culbutée dans une cheminée principale jusqu'au niveau de roulage, d'une section dépassant 3 m², creusé dans les encaissants.
- Le transport du minerai au jour est assuré par des camions navettes de capacité de 20 Tonnes. Jusqu'à "*le couloir de chute*" a une pente de 70°.

NB : Dans cette méthode il y a des réserves importantes abandonnées lors de l'exploitation comme celles abandonnées à la 1ère et 2ème phase en couronnes et les piliers des cheminées en 3ème phase.

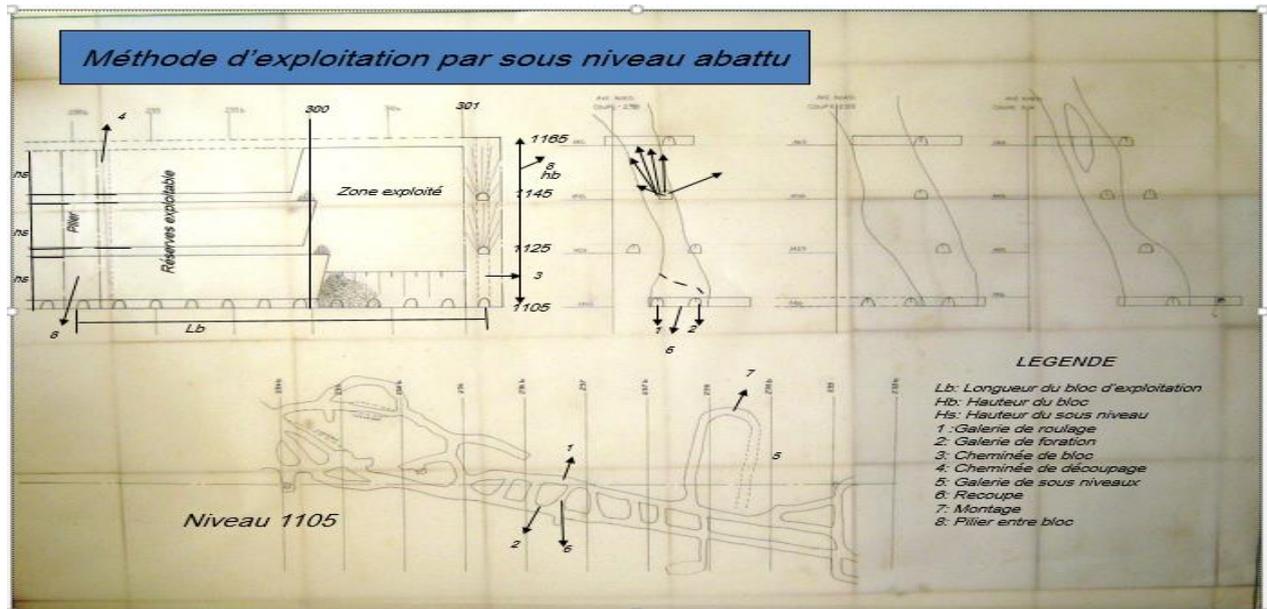


FIG N° I-10 : Représente la méthode d'exploitation par sous niveau abattue- niveau 1105

Paramètres techniques d'un bloc d'exploitation (méthode sous niveau abattue):

- Hauteur du bloc : 60m ;
- Longueur du bloc : 50 à 75 m ;
- Largeur du bloc : 10 à 50 m ;
- Largeur du pilier : 10 à 20 m ;
- Hauteur du pilier : 60m ;
- Hauteur du sous niveau : 20m.

Les avantages de la méthode

- L'airage de l'étage est assuré sans difficulté ;
- L'absence du soutènement d'espèces vides ce qui diminue les dépenses totales de production ;
- Bonne circulation des engins ;
- Rendement optimal de la chargeuse ;
- Meilleure sécurité pour les ouvriers ;
- Soutirage facile du minerai abattu, grâce à des cheminées prés-creusés dans les sous-niveaux.
- Rendement considérable et un prix de revient bas.

Les Inconvénients de la méthode

- Grand volume de travaux préparatoires, d'où le coût élevé de la récupération de ces dépenses augmente le prix de revient de la tonne de minerai extrait ;

- Difficulté de récupérer le tas abandonné dans la chambre vide par mesure de sécurité ;
- Pertes considérables du minerai à cause des piliers laissés ;
- Moins de sécurité ;
- La difficulté de l'abattage sélectif et l'impossibilité de l'abandon dans la chambre des intercalations rocheuses ou du minerai à teneur trop faible.

Régime de travail. Sachant que le régime de travail est variable au niveau de la mine entre le ciel ouvert et le souterrain qui va présenter dans le tableau suivant :

	Ciel ouvert	Souterrain	Unité
- Nombre de jour ouvrables par ans	255	220	jours
Nombre des jours ouvrable par semai	5-6	5	jours
Durée d'un poste	8	7	heures
Nombre de poste par jour	2-3	2	postes
- Nombre des postes par semaine	10	10	postes

- Tableau N° I-03 Régime de travail à la Mine Boukhadra

RESERVES GEOLOGIQUES DE LA MINE :

Les réserves géologiques constituant le gisement ferrugineux de BOUKHADRA sont évaluées à 50 937 929 Tonnes, toutes catégories confondues B,C1,C2 ,dont 15 009 845 Tonnes sont récupérables à ciel ouvert et 32 387 510 Tonnes en exploitation souterraine. 29% de ces réserves sont classées en catégories B & 46% en C1 et C2.

Les réserves prévisionnelles sont estimées à environ 9 Millions de Tonnes localisées au-dessus du niveau 925 sur les axes principaux et SUD-EST et en dessous du niveau 985 sur l'axe Nord. Le volume des travaux de recherche et d'exploitation projeté pour la transformation des réserves et la prospection des réserves prévisionnelles est de l'ordre de 6705 ml en sondage et 6920 ml en travaux miniers (travaux de recherche et préparatoires) Galerie & Recoupe.

RESERVES EXPLOITABLES SOUTERRAINNES

La réserve exploitable au 31/03/2006 du 3^{ème} et 4^{ème} étages sont respectivement de 2 738 286 Tonnes avec une teneur en Fer de 51 % et 6 023 100 Tonnes avec une teneur en Fer de 54.72%, soit un total de 8 762 000 de Tonnes avec une teneur en Fer égale à 53.55 %.

Les réserves préparées sont directement liées à l'avancement des travaux préparatoires ainsi, pour préparer les réserves du de 3ème et 4ème étage, il faudra 21 000 ml d'avancement horizontale et 2 600 ml de cheminée.

Au cours des travaux de préparation et d'exploitation du 3^{ème} étage et 4^{ème} phase, on est appelé à préparer 11 201 700 Tonnes de minerai de la seconde tranche entre les niveaux 1045 et 820.

RESERVES GEOLOGIQUES ET EXPLOITABLES DE LA MINE

SITES ET QUARTIERS	RESERVES GEO (T)		RESERVES EXP (T)		OBSERVATIONS
	TONNAGE	Fe %	TONNAGE	Fe %	
CIEL-OUVERT					
CARRIERE PRINCIPALE	11,191,500	57.15	9,974,780	55.9	Site Amont en développement
CARRIERE PIC	-	-	-	-	Epuisement des réserves
CARRIERE BK II	1,695,703	55.54	1,645,665	54.52	Partiesupérieur en développement
CARRIERE AIN ZAZIA	3,518,316	43.05	3,342,400	42.55	En projet
TOTAL CIEL-OUVERT	16,405,519	53.96	14,962,845	52.77	En projet
SOUTERRAIN					
3^{ème} PHASE	3,514,286	54.00	2,738,286	51.00	Sur les trois axes en développement
1105 /1165					avec Axe Nord en exploitation
4^{ème} PHASE	6,440,000	54.77	6,023,100	54.72	Sur les trois axes en projet

1105 /1045					En projet
Au dessous de 1045	11,201,700	54.34	11,201,700	54.34	En projet
Total réserves carr-prin non expl à ciel ouvert	13,000,000	55.86	12,395,000	55.86	En projet
TOTAL SOUTERRAIN	34,155,986	54.96	32,358,086	54.79	
TOTAL MINE	50,561,505	54.64	47,320,931	54.15	En catégories B+C1+C2
TOTAL MINE	59,811,805	54.64	56,571,231	54.15	En catégories B+C1+C2+P
NB : 9 251 300 T DE RESERVES EN CATEGORIE P.					

Tableau N° I-04 . Réserves géologiques et exploitables de la mine Boukhadra

HOMOGEINESATION :

Etant donné que le minerai des blocs Sud est pauvre en Fer tandis que l'axe Sud-est et l'axe principale sont riches en Fer, lors d'exploitation des blocs suivant l'axe nord, on est appelé à homogénéiser le minerai en exploitant simultanément les réserves Nord et Sud selon un rapport de trois pour un.

Caractérisation et Classification

Géomécaniques du massif de Boukhadra

Les propriétés physico-mécaniques du Djebel de Boukhadra sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Propriétés Unités de	Unités de mesure	Marne grise	Marne Jaune	Marne Minéralisée	Minerai de fer	Calcaire
Masse volumique saturée (ρ_{sat})	g/cm ³	2,7	2,6	2,5	2,9	2,65
Masse volumique insaturée (ρ_{unsat})	g/cm ³	2,3	2,2	2,4	2,7	2,6
Cohésion (c)	Bar	2,7	0,33	2,6	3,2	3,5
Angle de frottement interne (ϕ)	Degré (°)	35	23	40	45	50
Module de Young E	GPa	4,47	4,47	4,47	21	19,84
Coefficient de poisson (ν)	/	0,35	0,33	0,3	0,25	0,22
Dureté	/	0,35	0,33	0,3	0,25	0,22

Tableau N° I-05. Les propriétés physico-mécaniques du Djebel de Boukhadra

La Résistance à la compression

En vue de la détermination de la résistance à la compression des différentes formations rocheuses principales rencontrées dans le massif rocheux de Boukhadra, des échantillons ont été testés aux laboratoires dont les résultats sont présentés dans les tableaux ci-dessous :

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Marne Grise	Echantillon N°01	52	104	2	25	11,77	14,13
	Echantillon N°02	52	104	2	35	16,48	
	Echantillon N°03	52	104	2	30	14,13	

Tableau N° I-06. Résistance à la compression de la marne grise.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Marne jaune	Echantillon N°01	52	104	2	25	11,77	16,67
	Echantillon N°02	51	102	2	30	14,69	
	Echantillon N°03	52	104	2	50	23,54	

Tableau N° I-07. Résistance à la compression de la marne jaune.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Marne minéralisée	Echantillon N°01	52	104	2	45	21,19	20
	Echantillon N°02	52	104	2	46	21,69	
	Echantillon N°03	51	102	2	35	17,13	

Tableau N° I-08. Résistance à la compression de la marne minéralisée.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
Minerai de fer	Echantillon N°01	52	104	2	112,15	52,90	53,73
	Echantillon N°02	52	104	2	100	47,09	
	Echantillon N°03	52	104	2	130	61,21	

Tableau N° I-09. Résistance à la compression de minerai de Fer.

Roche	L'échantillon	Dimension (mm)		Elancement	Resistance		Resistance moyenne RC(MPa)
		D	H		H/D	Charge(KN)	
calcaire	Echantillon N°01	51	102	2	100	48,95	46,83
	Echantillon N°02	51	102	2	90	44,06	
	Echantillon N°03	52	104	2	97	47,48	

Tableau N° I-10. Résistance à la compression du Calcaire

Roches	R _c (MPa)	Qualité de la roche
Marne grise	14	Moyenne
Marne jaune	17	Moyenne
Marne minéralisée	20	Moyenne
Minerai de fer	54	Résistante
Calcaire	47	Résistante

Tableau N° I-11. Classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra en fonction de la résistance à la compression.

La Résistance à la traction

La résistance à la traction (essais brésilien) n'a pas pu être déterminée au laboratoire par manque d'appareil de mesure. la relation empirique entre la résistance à la traction et à la compression est utilisée pour la déterminer ..

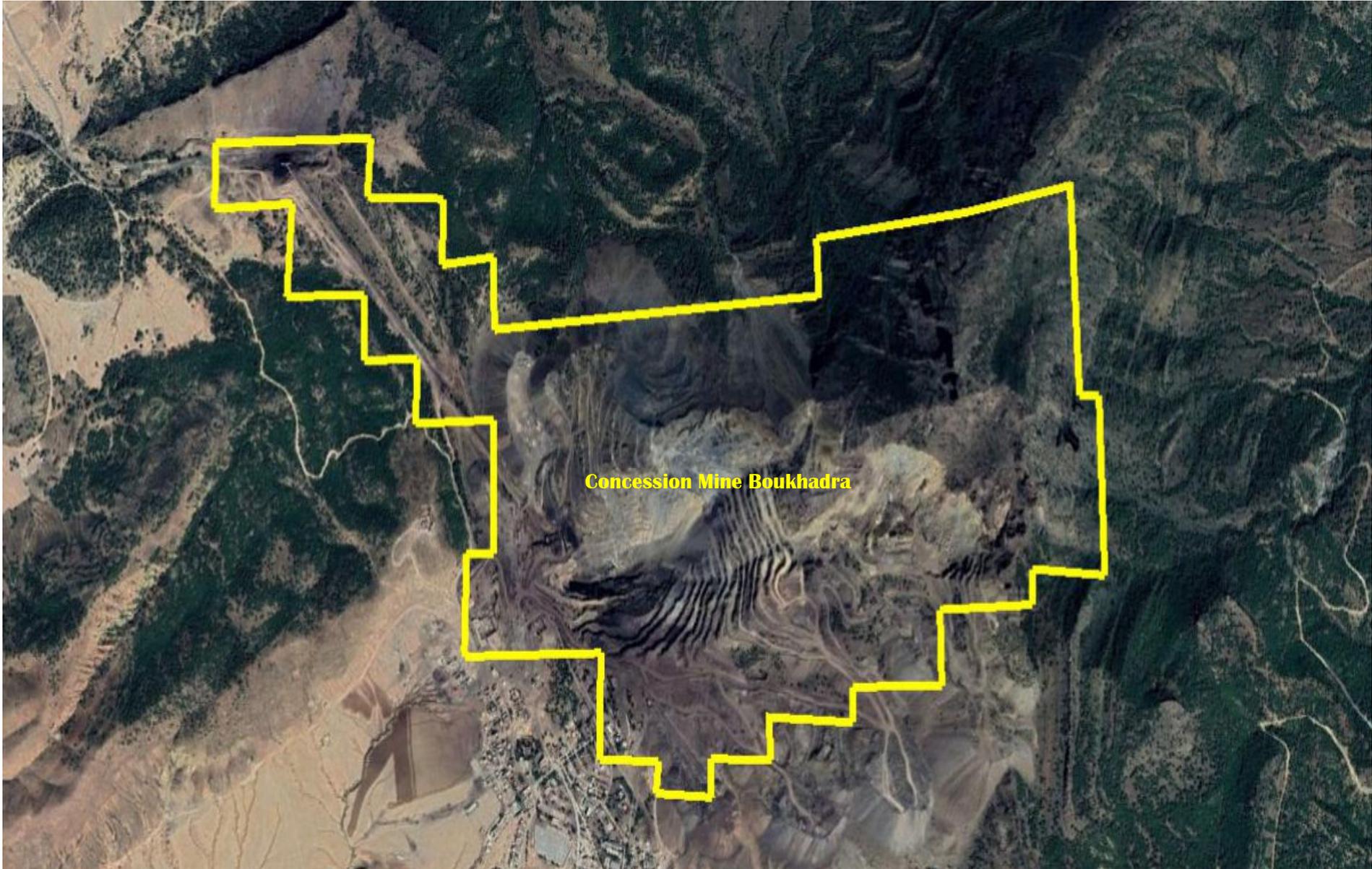
$$R_t = (0,08 \pm 0,12) \cdot R_c$$

On prend $R_t = 0,1 \cdot R_c$

Avec :

- R_t : la résistance à la traction (MPa) ;
- R_c : la résistance à la compression moyenne (MPa).





Concession Mine Boukhadra

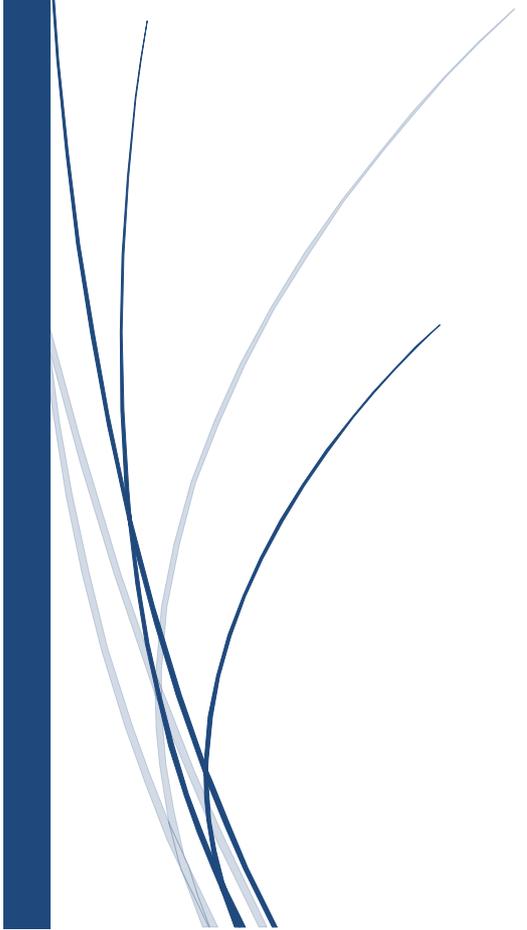


CHAPITRE II

MOUVEMENTS DES TERRAINS

DESCRIPTION, CLASSIFICATION, TYPOLOGIE

-RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE-



Mouvements des terrains

(Description, classification, typologie)

-Recherche bibliographique-

Introduction :

Le choix de la méthode d'exploitation d'un gisement de ressources minérales (substances minières utiles) est déterminé par de multiples facteurs : topographie des lieux, configuration du gisement, caractéristiques géologiques des terrains encaissant (encaissantes), tous en respectant les exigences ou contraintes relatives à l'environnement et la sécurité des ouvrages et des vies humaines, sans omettre les facteurs prédominants qui sont d'ordre économique. Enfin, il faut également tenir compte du coût de remise en état des lieux en phase finale de l'exploitation (fin de la durée de vie de la mine).

De ce fait L'activité extractive (l'exploitation minière) quel que soit la méthode et/ou le mode d'exploitation -considérée comme une des activités qui marquent le plus les paysages- engendre pendant et après le cycle de la vie de la mine un nombre très important d'impacts positifs et/ou négatifs , et parmi eux la dégradation du site et la modification topographique et morphologique du périmètre d'exploitation et ses alentours immédiats (à ciel ouvert par exemple : l'enlèvement préalable des stériles qui recouvrent le gisement ,en souterrains : le creusement de puits et de galeries d'accès au gisement)et l'emploi de machines ou d'explosifs pour l'extraction ce qui favorise l'apparition de plusieurs phénomènes naturels gravitaires d'origine géologiques et hydrométéorologiques provoquent chaque année des dégâts matériels, économiques ou humains.

Les exploitations minières sont des lieux de travail dangereux, avec une tâche pénible. Elles sont exposées à toutes sortes de risques : éboulements, inondations, explosions, incendies, exposition aux poussières, au bruit, à la chaleur et à d'autres facteurs ambiants néfastes, sans compter les risques d'accidents mécaniques ou électriques.,

La sécurité et la protection de la santé des mineurs qui font partie intégrante d'une saine pratique minière et constituent une obligation légale dans la plupart des pays, feront appel à plusieurs disciplines scientifiques afin de préserver les vies humaines et les ouvrages miniers construits, et pour comprendre comment est né un paysage minier dans une région, quelles sont les mutations qui se sont produites et comment celles-ci ont structuré un nouveau

paysage. D'autre part, on s'interrogera sur les actions menées, réserver et protéger un paysage détruit par les exploitations minières, on fait appel à la discipline qui traite les mouvements de terrains appelés : "**La stabilité des pentes**" qui est une branche très importante de la mécanique des sols, elle s'intéresse à des phénomènes dangereux ayant des conséquences vertigineuses tant pour les personnes que pour les ouvrages. Aussi la stabilité des pentes est une discipline très complexe au vu de l'irrégularité des phénomènes en question, et la nature de la matière qu'elle traite qu'est le sol, ce dernier est non soumis aux lois de comportements connus, et est soumis à plusieurs facteurs aggravants et déclencheurs.

Par rapport à d'autres risques naturels, le risque lié aux mouvements de terrain se caractérise par une répartition spatiale et temporelle assez diffuse :

- aspect spatial : régions montagneuses certes, mais aussi régions à relief plus modéré où une formation géologique défavorable est présente, régions à érosion côtière, régions de dissolution karstique, etc. Cette dispersion a deux conséquences : l'information statistique sur les événements est très difficile à collecter ; les dépenses de prévention sont nécessairement à "saupoudrer".

- aspect temporel : périodes de fortes pluies certes, mais également périodes de fonte de neige, contrecoup de séismes, conséquences d'interventions humaines, etc."

Rappel et généralités

Comme déjà évoqué La branche "**stabilité des pentes**" étudie l'équilibre mécanique des masses de sol ou de roches (talus ou pentes naturelles) pouvant être mises en mouvement par des phénomènes naturels (érosion des versants montagneux, tremblement de terre) ou anthropiques^(*) (extraction, terrassements, mise en œuvre de : remblais et terrils, constructions...)

"Le terme de Mouvement de Terrain regroupe plusieurs types des phénomènes très variés et très différents les uns par rapport aux autres de : par leur **nature** (affaissements et effondrements dus aux cavités souterraines ; instabilités de versants : glissements, écroulements, coulées, ...), par **leur dimension** (phénomènes significatifs à partir de quelques m³, et pouvant atteindre quelques centaines de millions de m³, voire plus) et par leur

(*) Sont qualifiés d'anthropiques tous les phénomènes qui peuvent être conséquents de la présence ou de l'action de l'être humain (<https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr>)

comportement, aussi leurs *conséquences* pour l'homme. On inclut parfois également les déformations des sols dues à la sécheresse : retrait-gonflement

Qu'il s'agisse de glissement de terrain, d'éboulements, d'affaissements ou de coulées boueuses, on est toujours en présence du déplacement gravitaire d'un volume de roche ou de sol déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (forte pluie, cycle gel/dégel, séisme, pente raide,...) ou anthropique (extraction ,terrassment, chargement important...).

Les glissements de terrains évoluent irrégulièrement dans le temps, passant de phases d'évolution lentes à des phases d'accélération parfois brutale, à l'origine de différents désordres au niveau du sol et des constructions (affaissement des terrains, dégradation des chaussées, fissuration des constructions...etc.)

Définitions :

Les mouvements de terrain sont des phénomènes naturels d'origines très diverses et sont des manifestations du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles ou anthropiques (exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, ... etc.), En pratique ce terme est réservé aux mouvements gravitaires (dus à la gravité), il ne s'applique pas aux mouvements tectoniques (dus aux séismes, mouvement des plaques, etc...).

De par leur répartition spatiale formée par la topographie et par la géologie (nature et fracturation des formations affleurantes, hydrogéologie). On distingue deux familles de mouvements gravitaires :

- Les mouvements dus aux vides sous terrains : effondrement, affaissement, tassement.
- Les mouvements dus aux pentes (versants) : glissement, basculement, écoulement, éboulement, dits mouvement de pente ou bien mouvements de versants.

Les mouvements des terrains naturelles (dans la plupart des cas) et/ou anthropologiques présentent un risque dû principalement à la dégradation progressive de la stabilité du massif rocheux ou le sol et le sous-sol dont les processus sont mal connus ou bien d'un évènement naturel imprévisible à long terme (pluie ou séisme), ils apparaissent donc comme aléatoires dans l'espace et dans le temps et leur prévision est nécessairement probabiliste.

D'après l'encyclopédie française publiée sur internet, L'Encyclopædia Universalis, Le processus physique des mouvements de terrains :

"Les modalités des déformations et des déplacements le long des pentes, et parfois loin au-delà de leur pied, sont très diverses ; aussi préfère-t-on utiliser l'expression plus générale de mouvements de terrain. Celle-ci inclut les coulées de boue le long des vallées, mais pas le transport dans les eaux courantes de débris rocheux finement divisés. Elle couvre aussi les affaissements, dus au comblement de vides souterrains, dont nous ne parlerons pas ici.

Au sens strict, le glissement de terrain est un phénomène localisé, qui produit des changements visibles le long des pentes : au sommet, on observe des surfaces d'arrachement, à forte pente et sans végétation, et, plus bas, des boursouflures irrégulières, des crevasses, des marches d'escalier, souvent avec des contre-pentes, des mares et des arbres inclinés vers l'amont. Le phénomène, une fois déclenché, n'est pas sans analogie avec l'écoulement d'un glacier ; on peut constater des vitesses plus faibles que le millimètre par jour, et des accélérations locales de l'ordre de plusieurs décimètres par jour ou davantage".

Classification des mouvements de terrains :

Le domaine de la stabilité des pentes est vaste et difficile à traiter et les mouvements de terrains qui affectent les versants sont extrêmement variés par leur dimension, leur morphologie et leur évolution cinématique

Il existe divers types de mouvements gravitaires : glissements de terrain, chutes de blocs, effondrements, coulées de boue, laves torrentielles etc... Les déstabilisations gravitaires affectent tous les types de matériaux géologiques, et sont influencées par des paramètres aussi divers que la structure géologique du massif, la topographie, l'état de contraintes tectoniques, ou encore les conditions climatiques locales.

Plusieurs classifications ont été proposées pour nommer et regrouper ces différents mouvements de terrain. Parmi ces classifications, celle de **Varnes (1978)** est communément utilisée par la communauté scientifique s'intéressant au comportement mécanique des mouvements gravitaires.

La classification des mouvements de terrains va nous renvoyer à plusieurs critères, en effet les mouvements de terrains sont classifiés selon leurs vitesses, leur nature, leur probabilité d'occurrence, leur état intrinsèque...etc.

Selon la vitesse :

Un mouvement de terrain est un déplacement, plus ou moins brutal, du sol ou du sous-sol. Selon la vitesse de déplacement, D'un point de vue Opérationnel on peut distinguer :

		Vitesse [mm/sec]	Vitesse Typiques
7	Danger pour la vie Extrêmement rapide	6×10^3	6 m/sec
6	Très rapide	6×10^1	3 m/min
5	Rapide	6×10^{-1}	1.8 m/hr
4	Modéré	6×10^{-3}	13 m/mois
3	Lent	6×10^{-5}	1.6 m/an
2	Très lent	6×10^{-7}	16 mm/an
1	Extrêmement lent Domages limité au bâti		

FIG N° II-1 : Échelle des vitesses de mouvement de versant utilisée en Amérique du nord et dans la classification de Cruden et Varnes (1996).

Qui entraînent une déformation progressive des terrains sans accélération brutale, pas toujours perceptible par l'humain. Ils regroupent principalement les affaissements, les tassements, les glissements, le retrait-gonflement. Ils peuvent être précurseurs d'un mouvement rapide.

Parmi les mouvements lents on peut distinguer :

i. Les tassements et les affaissements :

Un affaissement est une déformation souple, sans rupture et progressive de la surface du sol. Elle se traduit par une dépression topographique en forme de cuvette généralement à fond plat et bords fléchis.

Certains sols compressibles peuvent se tasser sous l'effet de surcharges (constructions, remblais, circulation d'engins) ou en cas d'assèchement (drainage, pompage).

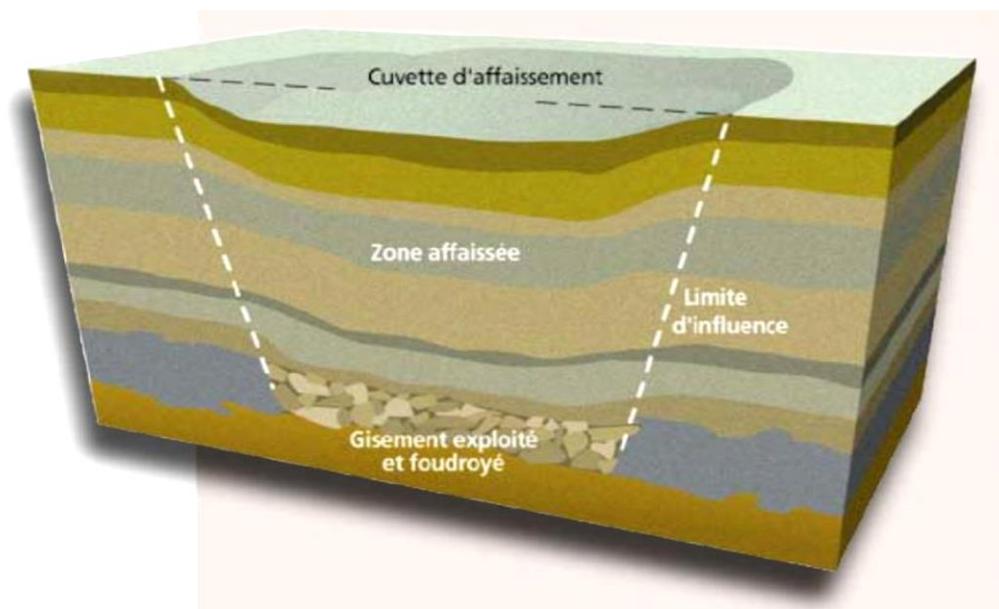


FIG N° II-2 : image illustrant un affaissement après le foudroyage d'un gisement exploité

- ii. **Le retrait-gonflement des argiles** : les variations de la quantité d'eau dans certains terrains argileux produisent des gonflements (période humide) et des tassements (période sèche).

Les sols argileux possèdent la propriété de voir leur consistance se modifier en fonction de leur teneur en eau. Ainsi, en contexte humide, un sol argileux se présente comme souple et malléable, tandis que ce même sol desséché sera dur et cassant.

Des variations de volume plus ou moins conséquentes accompagnent ces modifications de consistance. Ainsi, lorsque la teneur en eau augmente dans un sol argileux, on assiste à une augmentation du volume de ce sol, ce phénomène est appelé « *gonflement des argiles* ». Au contraire, une baisse de la teneur en eau provoquera un phénomène inverse de rétractation ou « *retrait des argiles* »

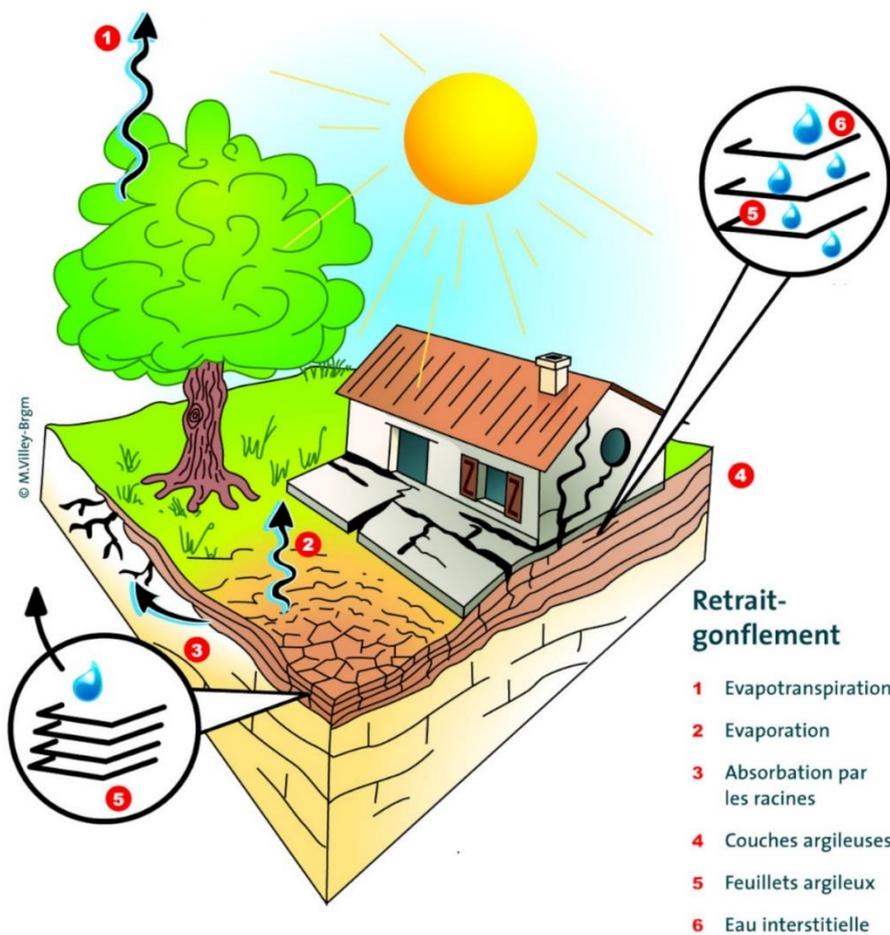
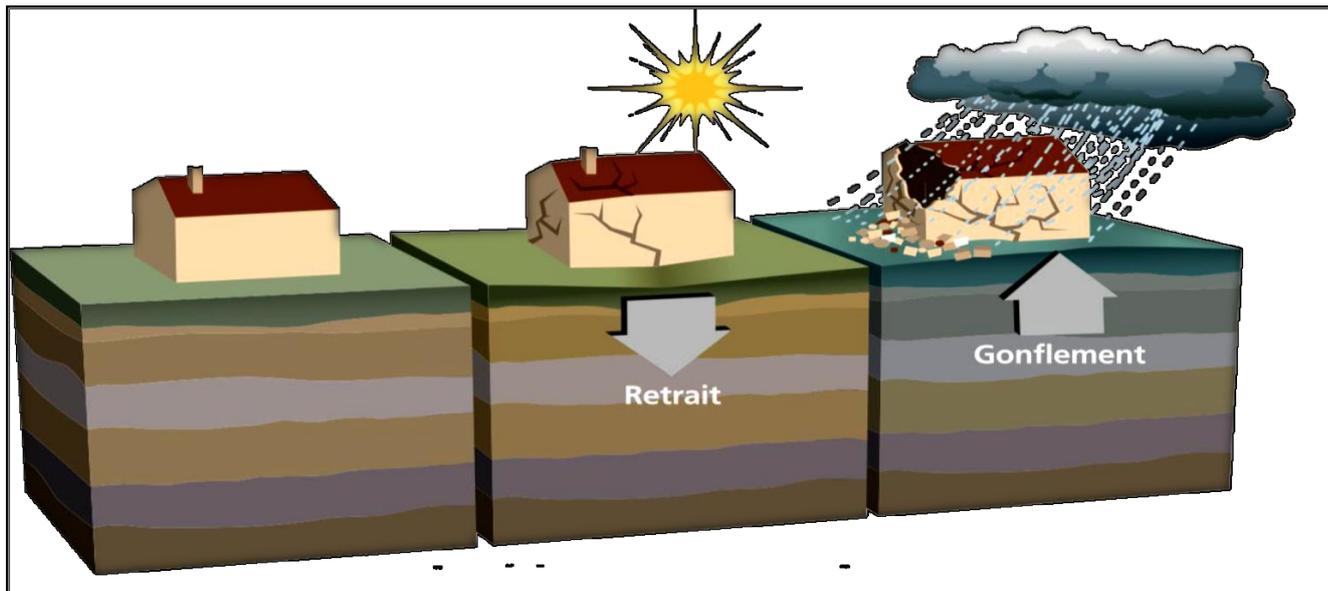


FIG N° II-2 : illustration retrait-gonflement des argiles
 Mécanisme de fonctionnement du phénomène de retrait-gonflement des sols argileux.

© BRGM - M. Villey

- iii. **Les glissements de terrain** , ils se produisent généralement en situation de forte saturation des sols en eau. Ils peuvent mobiliser des volumes considérables de terre, qui se déplacent le long d'une pente.

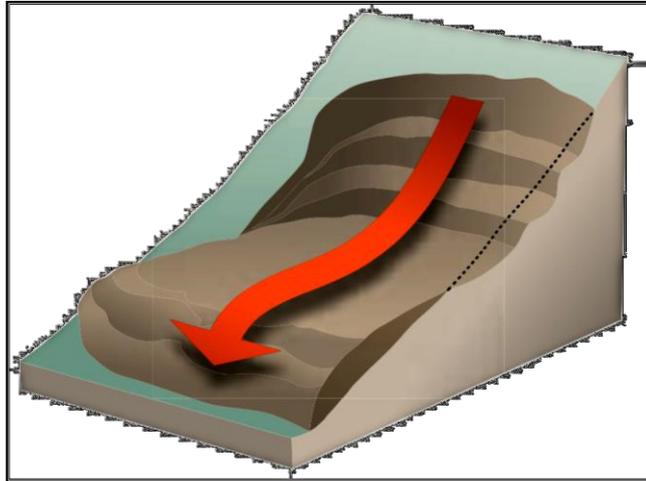


FIG N° II-3 : illustration glissement lent

Les mouvements rapides,

Qui se propagent de manière brutale et soudaine. Ils regroupent les effondrements, les chutes de pierres et de blocs, les éboulements, les coulées boueuses et les laves torrentielles

Parmi les mouvements rapides on peut distinguer :

- ✓ *Effondrements dus à la rupture de cavités souterraines sans atténuation par les terrains de surface.* :

Un effondrement est un abaissement à la fois violent et spontané de la surface sur parfois plusieurs hectares et plusieurs mètres de profondeur, tout le terrain au-dessus de la cavité s'effondrant d'un coup. La zone effondrée est limitée par des fractures sub-verticales

Les effondrements de cavités souterraines –souvent invisibles en surface– qu’elles soient d’origine anthropique (carrières, mines) ou naturelle (phénomènes de karstification) :

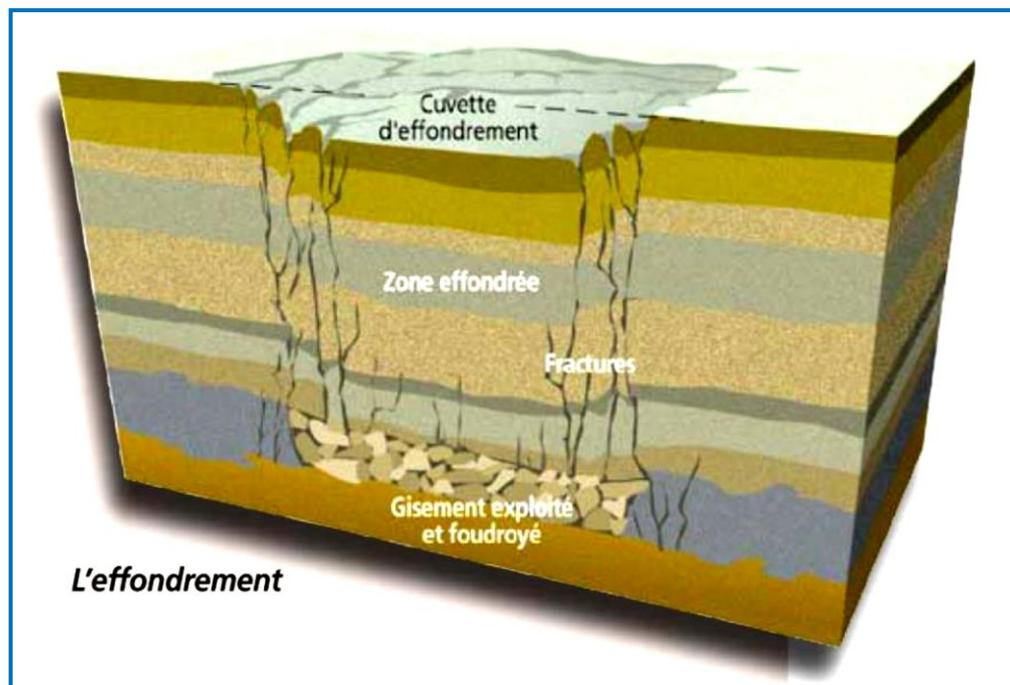
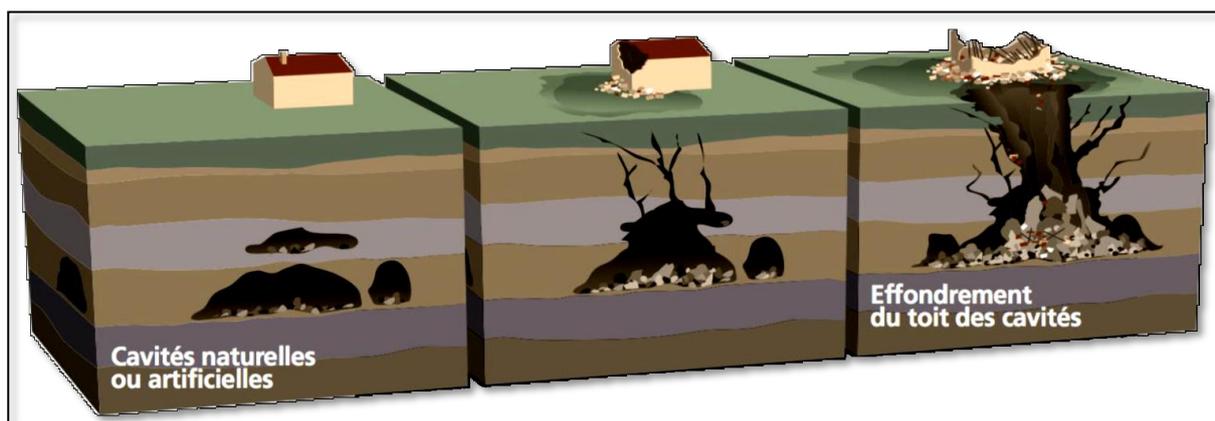


FIG N° II-4: image illustrant un Effondrement après le foudroyage d'un gisement exploité

L'évolution des cavités souterraines naturelles (dissolution de gypse) ou artificielles (carrières et ouvrages souterrains) peut entraîner l'effondrement du toit de la cavité et provoquer en surface une dépression généralement visible, le plus souvent comme un trou de forme circulaire.



. Les effondrements localisés donnent naissance à des fontis présentant une géométrie pseudo-circulaire dont le diamètre et la profondeur du cône peuvent aller de quelques mètres à quelques dizaines de mètres.

NB : Les affaissements et les effondrements surviennent au niveau de cavités souterraines, Ces cavités sont de tailles variables (du mètre à la dizaine de mètres) et peuvent être interconnectées ou isolées.

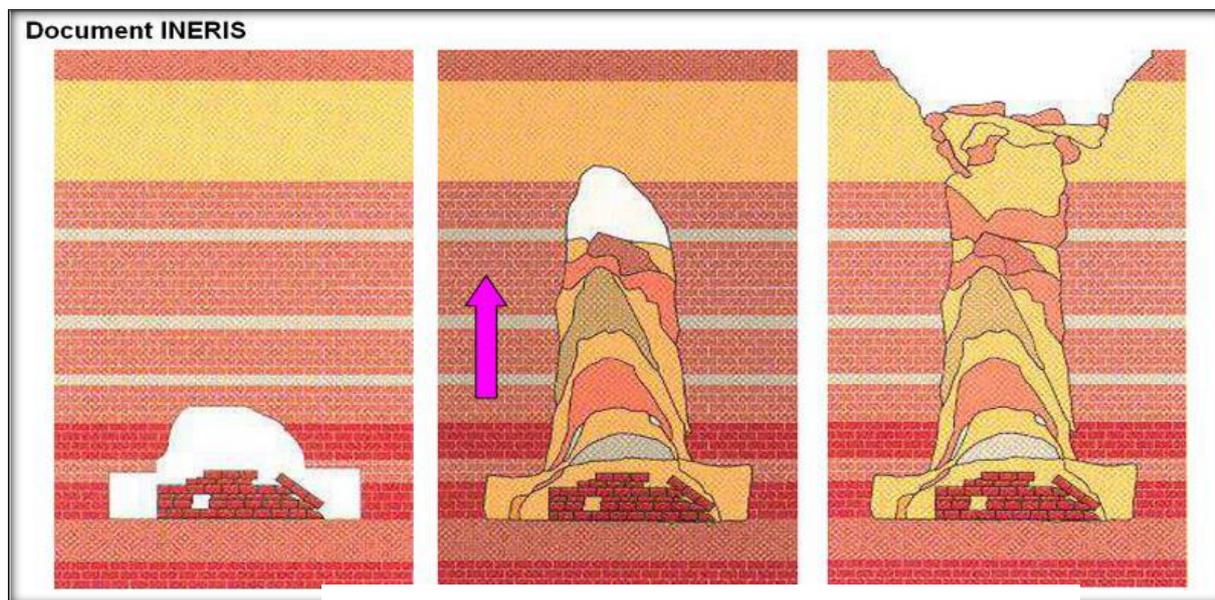


FIG N° II-5 : Principales phases de l'évolution d'un fontis

✓ *Chutes de pierres ou de blocs provenant de l'évolution mécanique des falaises :*

Les écroulements (ou éboulements) et les chutes de blocs : l'évolution des falaises et des versants rocheux engendre :

- ◆ Des chutes de pierres (volume inférieur à 1 dm³),
- ◆ Des chutes de blocs (volume supérieur à 1 dm³)
- ◆ Des écroulements en masse (volume de centaines de m³ et pouvant atteindre plusieurs millions de m³)

Les blocs isolés rebondissent ou roulent sur le versant, tandis que dans le cas des écroulements en masse, les matériaux "s'écoulent" à grande vitesse sur une très grande distance.

✓ *Eboulements ou écroulement de pans de falaise ou d'escarpements rocheux selon les plans de discontinuité pré existants :*

Ce type de mouvement est spécifique, en particulier dans les zones côtières où les conditions géologiques et hydrogéologiques sont disponibles, et avec l'aide de facteurs météorologiques et climatiques, ce qui crée un bon environnement pour un mouvement soudain qui conduit à la chute des bords de la falaise, mais cela n'empêche pas la même chose de se produire dans les zones intérieures éloignées des surfaces. Hydrologie, notamment avec

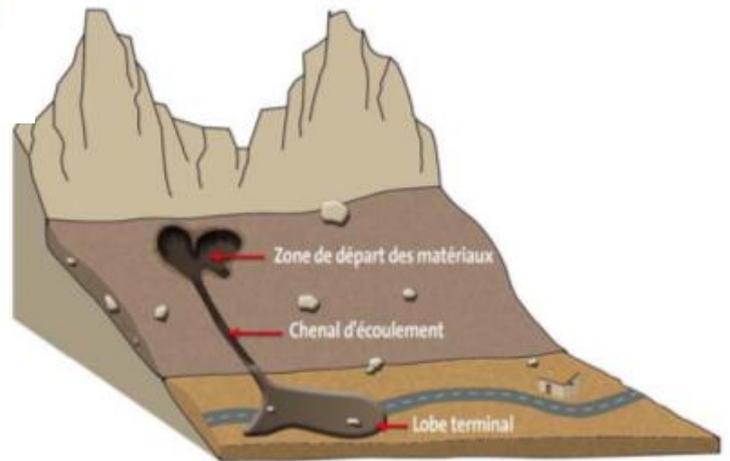
le développement des fissurations dans la massif rocheux et l'existence de la haute altitude de la falaise et les facteurs climatiques (pluie et chaleur avec une forte humidité)

- ✓ **Les coulées boueuses** .Les coulées boueuses sont des phénomènes très rapides affectant des masses de matériaux, soumis à de forte concentration en eau, sur de faibles épaisseurs généralement (0-5 m) qui sont caractérisées par un transport de matériaux sous forme plus ou moins fluide. Elles se produisent sur des pentes, par dégénérescence de certains glissements avec afflux d'eau.



FIG II-6 : Coulée de boue

Ce type de phénomène est caractérisé par un fort remaniement des Masses déplacées, une cinématique rapide et une propagation importante.



En tenant compte de la vitesse, la nature de matériaux déplacer, la coulée de boue est le plus rapide (jusqu'à 90 km/h) et le plus fluide des différents types de mouvements de terrain. Et de point de vue de son comportement qui est intermédiaire entre celui d'un solide et d'un liquide,



FIG II-7 : Images représente : coulées boueuses

et qui régit par les lois des domaines à la fois de l'hydraulique et de la mécanique des solides, ce qui en fait un phénomène particulier dans la famille des mouvements de terrain

Les laves torrentielle .

Ce sont des phénomènes se produisant dans les lits des torrents au moment des crues, sont caractérisées par une concentration en matériau solide très élevée ressemblant plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler. Les laves torrentielles composées de matériaux d'origine volcanique (cendres et fragments de roche principalement) sont appelées lahars.

Les mouvements de terrain, qu'ils soient lents ou rapides, peuvent entraîner un remodelage des paysages. Celui-ci peut se traduire par la destruction de zones boisées, la déstabilisation de versants ou la réorganisation de cours d'eau.

NB : Quand la vitesse est en dessous de 1m/s le mouvement est considéré sans risque potentiel sur les personnes,

III-2 Selon la nature :

On veut dire ici par nature, l'évolution de l'élément ou l'ensemble d'éléments formant les sols ou les roches en mouvement, on distingue quatre principaux types d'évolution comme suit :

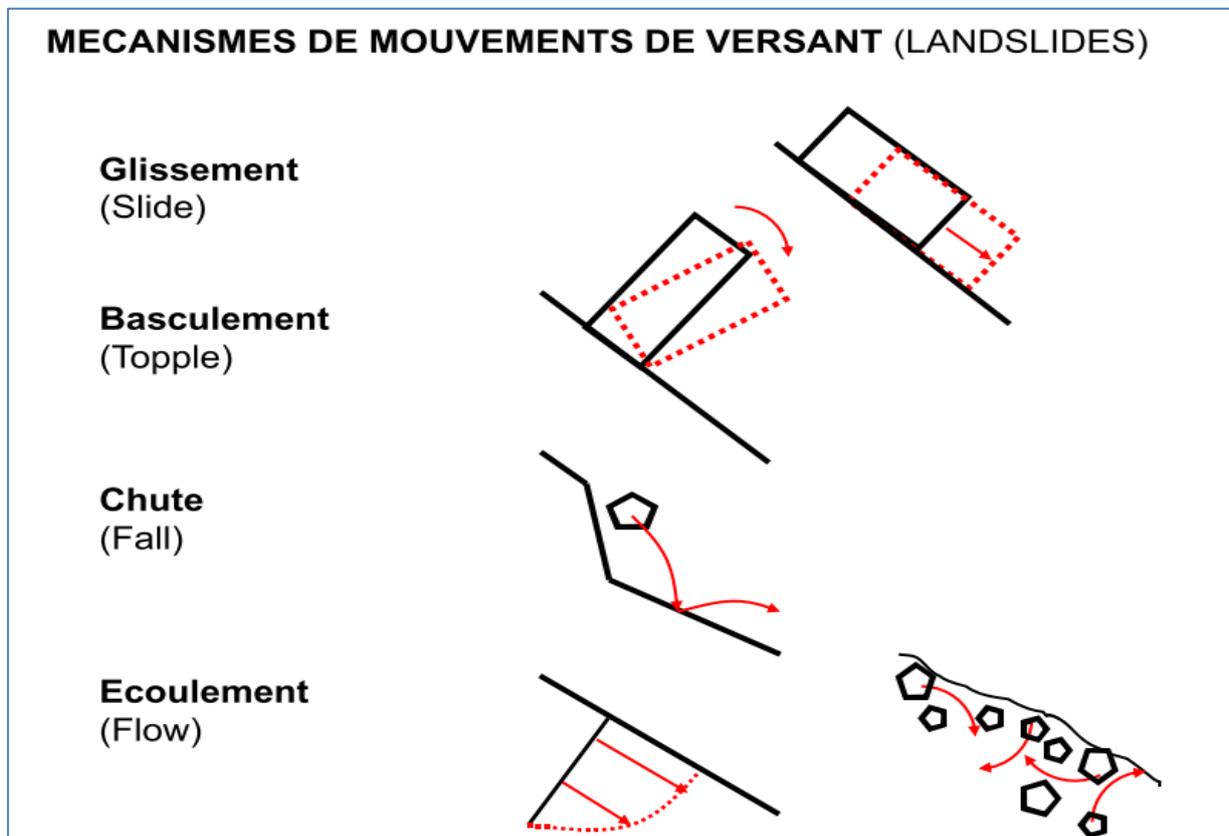


FIG II-8 : Mécanismes de mouvements de versants

Glissement

a-Description d'un glissement :

Définition & Synonyme : Action de glisser sur une surface ; mouvement de ce qui glisse. /Processus tectonique par lequel, le long de discontinuités lithologiques ou structurales, des unités tectoniques se mettent en place par gravité. /Déplacement de deux surfaces en contact consistant en une translation de l'une par rapport à l'autre. /Mouvement élémentaire de divers plans d'atomes dans la déformation plastique des solides

Géologiquement : le glissement est : Mouvement de masse rapide, vers le bas, d'une partie du matériel d'un versant. On peut en distinguer deux grandes catégories :

1. Celle où une partie d'un versant se détache en bloc, soit le long d'un plan de glissement déjà existant (diacalse, surface de stratification), soit avec formation d'une cassure souvent courbe ;
2. Celle que l'on nomme solifluxion où le glissement, en général moins rapide, est dû au fait que les terrains sont gorgés d'eau, et s'écoulent comme une masse boueuse à partir d'une niche de décollement ou niche de solifluxion (coulées boueuses ou coulées de solifluxion).

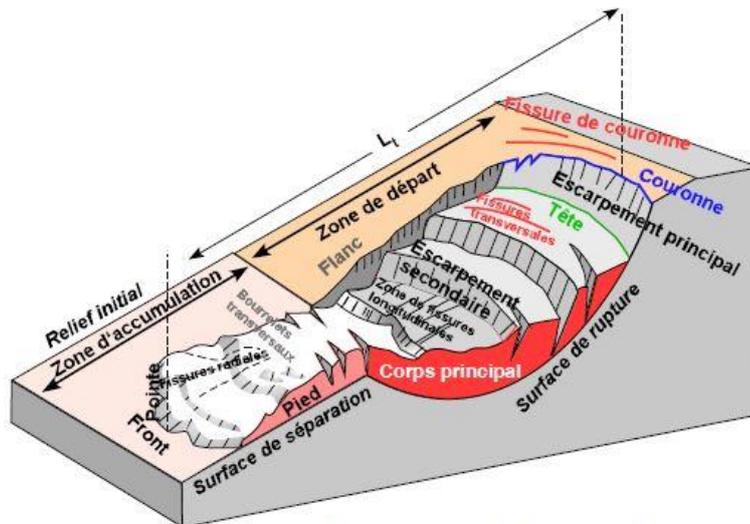


FIG N° II-9 : Eléments morphologiques principaux d'un glissement de terrain (d'après Cruden et Varnes, 1996 ; Flageollet, 1989).

D'après l'Observatoire Régional des Risques Majeurs en Provence-Alpes-Côte d'Azur (ORRM-PACA) : « Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant »¹.

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- ◆ Glissement plan ou translationnel, le long d'une surface plane ;
- ◆ Glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;

¹ <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/>

- ◆ *Glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.*

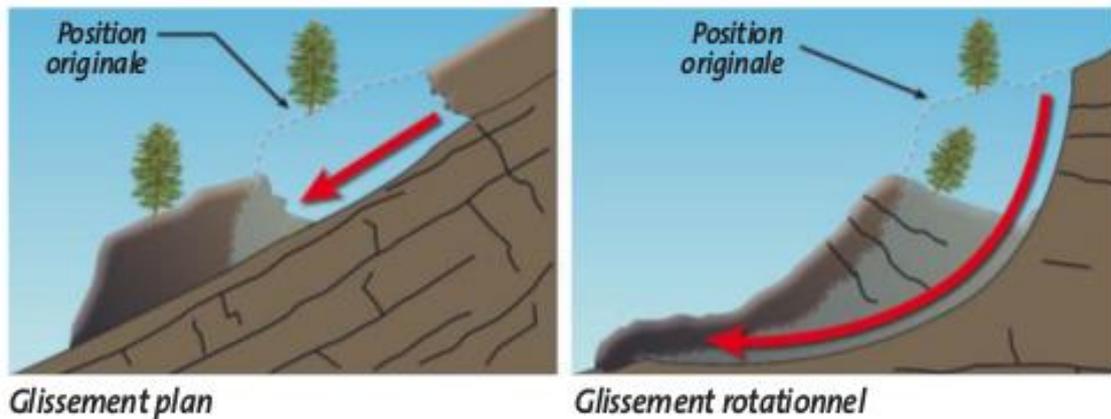


FIG N° II-10 : illustration : glissement plan & rotationnel

Basculement

Basculement : nom masculin : action de basculer quelque chose, action de changer d'orientation, du verbe : **Basculer** : verbe transitif : Renverser en faisant pivoter

Le basculement est un phénomène qui se produit lorsque le massif rocheux est découpé par des discontinuités très redressées et profondes le structurant en grandes écailles ou colonnes (schistosités, stratifications, diaclases, failles...). Ces colonnes présentent donc une géométrie très favorable au basculement.

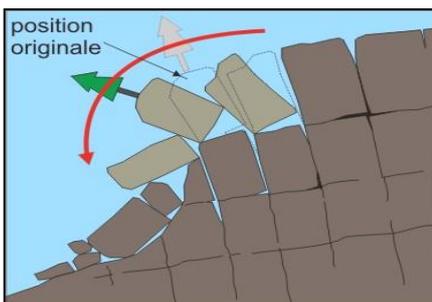
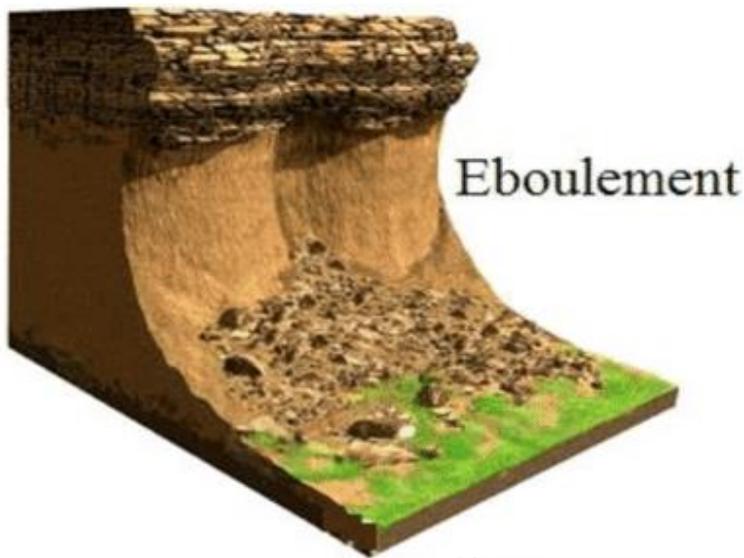


FIG N° II-11 : illustration & image : basculement

Chute de blocs ou éboulement

Ce sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturés tels que calcaires, grès, roches cristallines, etc. Ces chutes sont caractérisées par une zone de départ, une zone de propagation et une zone d'épandage. Les blocs décrochés suivent généralement la ligne

de plus grande pente. Les distances parcourues sont fonction de la position de la zone de départ dans le versant, de la pente du versant, de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la nature de la couverture superficielle, de la végétation...

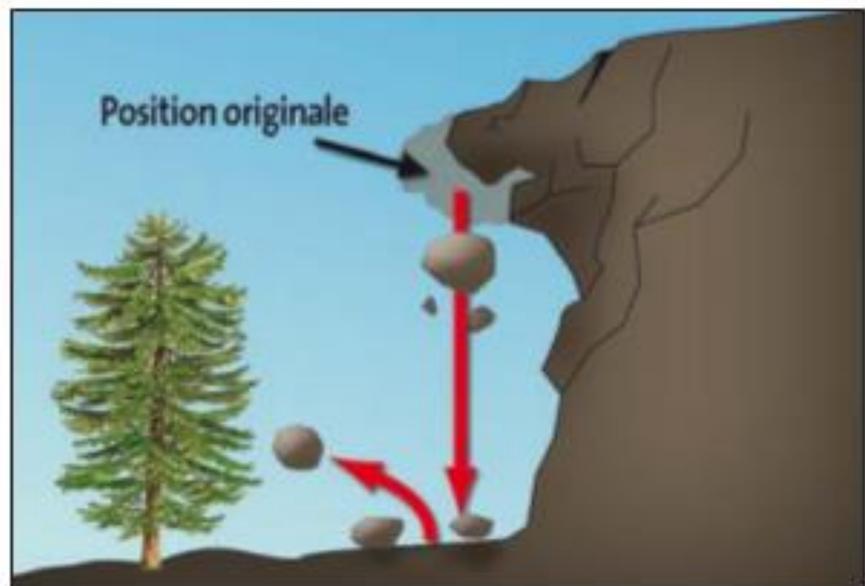


FIG N° II-12 : illustration : éboulement a & b

Écoulement

L'écoulement est un déplacement – semblablement à un liquide – d'une masse rocheuse saturée par l'eau qui joue un rôle important dans le déplacement. Cette masse est composée d'au minimum 30 % d'eau et 50 % de limons, vases et autres matériaux argileux. L'écoulement se distingue par la disparition des structures de la roche ou du sol, une vitesse de déplacement plus grande (jusqu'à 80 km/h), une consistance plus ou moins pâteuse des

matériaux mélangés et transportés, tantôt grossiers, plus souvent hétérogènes. ¹

Ce phénomène naît principalement sur des versants à la faveur de fortes précipitations qui remobilisent les matériaux en place ou après une éruption volcanique.

III-3 Selon l'état :

Par rapport à ce critère on peut distinguer :

- **Les mouvements potentiels** : mouvements futurs de masses rocheuses ou de sols non encore affecté par ce mouvement (pour détecter de type de mouvements, *on cherche les configurations potentiellement instables*, le tableau ci-dessous énumère quelques configurations possibles).
- **Les mouvements actifs** : masses de roches ou de sols déjà en mouvement (pour détecter ce type on cherche des indices de mouvements tels que *des fissures d'extension, gonflement du sol, bourrelets, arbres penchés ... etc*).
- **Les mouvements passifs (ou dormants)** : masses de roches ou de sols déjà mu par le passé, et susceptibles de mouvoir dans le futur.

¹ <http://www.reseau-canope.fr/risquesetsavoirs/quand-les-sols-perdent-pieds-les-mouvements-de-terrain.html>

Configuration	Mécanisme
	Glissement sur un plan
	Glissement sur 1 ou 2 plans
	Glissement rotationnel ou composé
	Rupture de banc
	Effondrement de colonne
	Basculement de colonne ou de blocs
<p data-bbox="379 1877 517 1921">D. Hantz</p>	Rupture de surplomb

FIG N° II-13 : illustration : mouvements selon l'état

Types de mouvements de terrains (typologie).

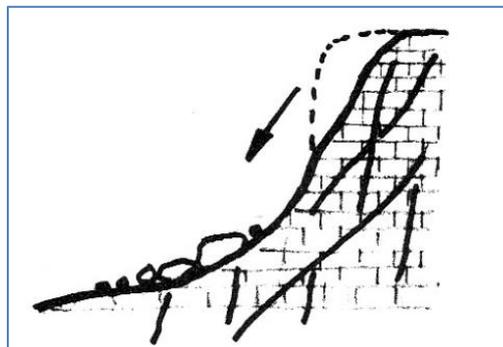
Plusieurs types de mouvement sont distingués (chute(fall), basculement (topple), glissement (slide), écoulement(flow). Ces types de mouvements peuvent parfois se combiner ou se succéder pour former un type de mouvements dit « complexes et composites » qui présentent des formes et des matériaux

. Ecoulements (chutes) :

Ce sont des chutes soudaines (de quelques secondes) de masses rocheuses importantes. Ils peuvent être dus à des causes internes au massif.

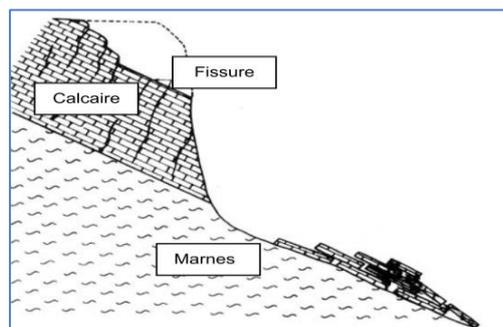
Dislocations d'une masse rocheuse diaclasée par altération interne ou augmentation des pressions interstitielles.

La formation rocheuse se dégrade intérieurement par augmentation des pressions interstitielles, ils apparaissent alors des fissures dans le corps de la formation, ces fissures donnent lieu à des décrochements (zones de faiblesse qui diminuent la surface de contact, et donc les forces de résistance au poids propre) ces décrochements se disloquent alors de la formation mère.



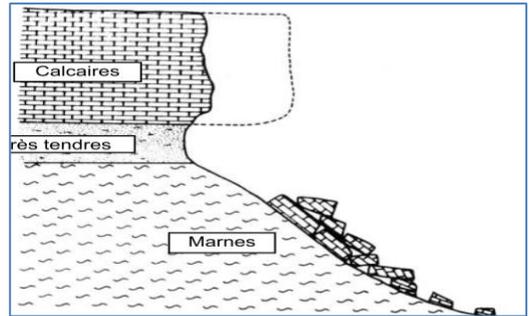
Glissements banc sur banc d'une masse rocheuse stratifiée.

Une formation rocheuse peut selon sa nature ou bien au vu des efforts auxquels elle est soumise présenter des zones de faiblesse qui se fissurent, en plus de l'effet de l'eau qui vient appliquer des pressions interstitielles supplémentaires entraînant le décrochement de blocs successifs qui glissent les uns contre les autres selon la pente du versant aval.

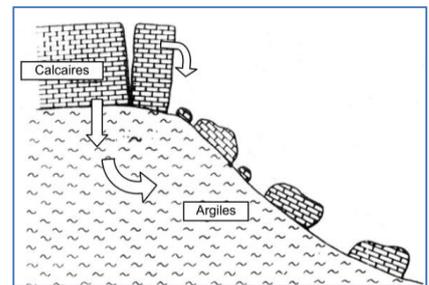


Écroulement de grande masse mises en surplomb par érosion ou dislocation de couches tendres sous-jacentes.

Une Pour ce type d'écroulement, une formation repose sur une couche sous-jacente susceptible à l'érosion, ou autre phénomène qui entraîne sa disparition, des parties successives de la formation supérieure restent alors en surplomb, puis s'effondrent sur l'aval du talus.



Écroulement par fluage ou glissement de couche sous-jacente. Une formation rocheuse posée sur une couche compressible applique des efforts sur cette dernière, la couche compressible tend alors à se déformer, induisant ainsi des efforts de traction sur la partie supérieure de la formation rocheuse, susceptible aux efforts de traction, la roche présentera alors des fissures verticales, et des blocs se décrocheront de la formation rocheuse et s'écrouleront sur le talus.



Glissements :

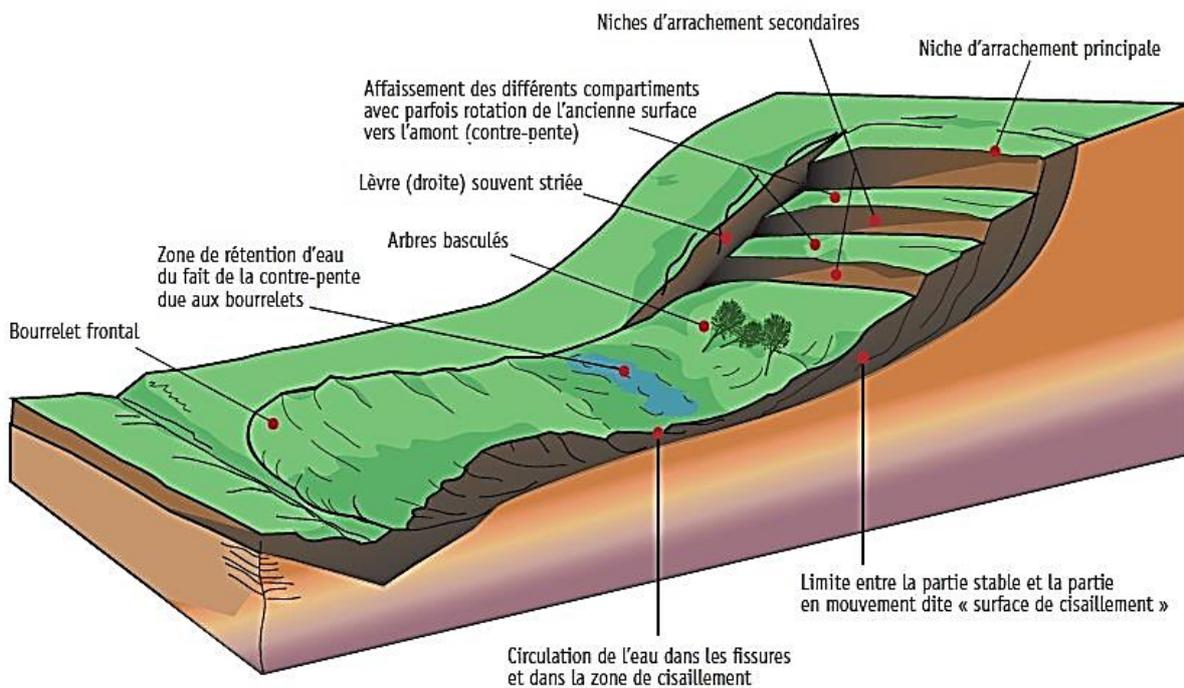


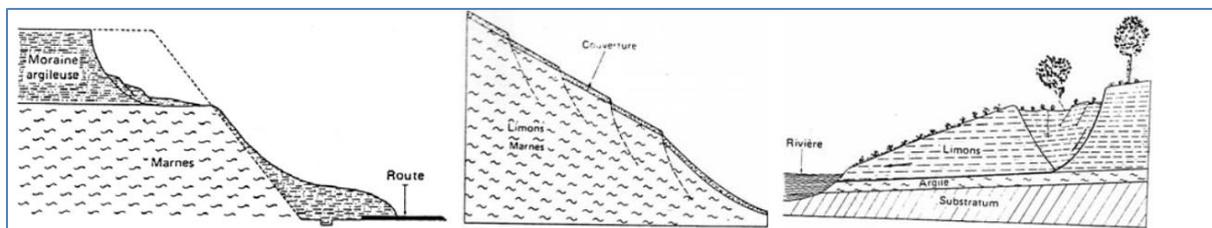
Fig N ° II-14. morphologie d'un glissement

Ils affectent les terrains meubles de type « Sols » et sont généralement plus lents que les écroulements (se manifestent en quelques heures)¹.

En général pour faciliter la problématique, on suppose que les surfaces de glissement sont rotationnelles ou planes selon le cas de glissement.

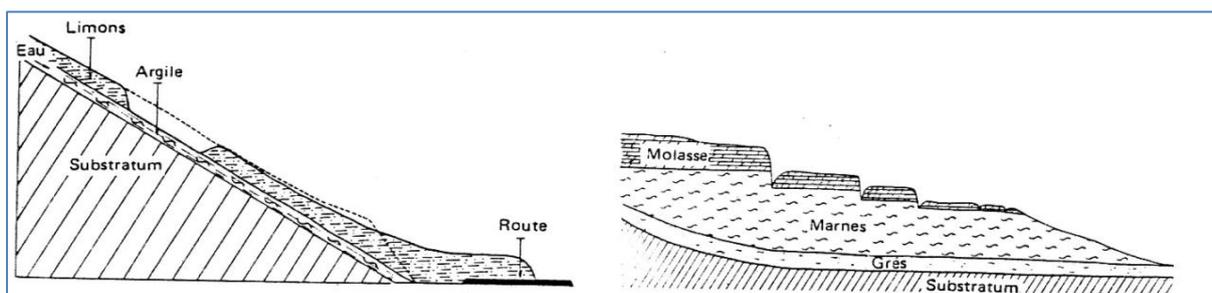
Glissements rotationnels :

Ils sont caractérisés par un basculement de la masse glissée le long d'une surface de rupture dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire, c'est le cas en particulier des ruptures de remblais sur sols mous et de déblais en sols homogènes.



Les glissements plans :

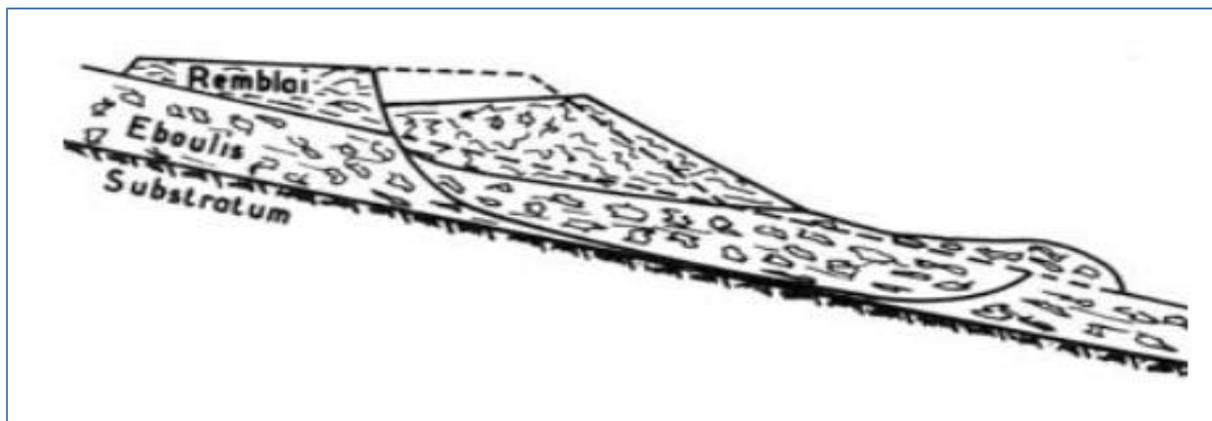
Ils se produisent lorsqu'il y a existence d'une surface topographique pouvant guider une rupture plane, couche de caractéristiques médiocres, contact manteau d'altération, substratum.



.Les glissements complexes :

Lorsque le sol est hétérogène, il peut y avoir formation de glissements « complexes », dont certaines parties correspondent à des glissements plans et d'autres à des glissements rotationnels.

¹ <https://paysgrandbrianconnais.fr/girn/les-risques-naturels-en-montagne/mouvements-de-terrain>



Coulées :

Elles sont dues à une mise en mouvement, généralement brutale de masses de sol à l'état liquide, qui dans leurs écoulements peuvent transporter un débit solide important (rocher, tronc d'arbres, débris de construction...etc.).

Mouvements de fluage :

Par définition Le fluage : déformation différée due à l'application d'une charge constante ; et la relaxation : relâchement des contraintes à déformation constante, qui sont liés aux propriétés viscoplastiques du matériau.

Par opposition à tous les mouvements précédents, localisés dans le temps et caractérisés par des zones de ruptures nettement définies, les mouvements de fluage - qui est un phénomène physique qui provoque la déformation irréversible différée (c'est-à-dire non-instantanée) - constituent la manifestation externe des déformations du sol dans la masse, ce sont des mouvements très lents, et de très faible amplitude qui se développent dans une zone dont les contours sont généralement très difficiles à cerner tant en extension qu'en profondeur

La déformation de la roche peut rester ductile mais s'accroître au cours du temps, bien que la valeur de la contrainte reste constante,

Évaluation des risques liés au mouvement de terrain.

Pour caractériser les risques liés à un mouvement de terrain donné, on utilise l'indicateur d'intensité, qui est un indicateur qualitatif. C'est un indicateur qui peut avoir plusieurs valeurs caractéristiques sur une échelle donnée, selon les types et spécificités des mouvements qui lui sont associés.

Intensité	Type de dommage attendu	Critère d'évaluation
Forte	Hommes et animaux en danger à l'intérieur des bâtiments ; dégâts considérables aux bâtiments allant jusqu'à leur destruction	Eboulement : $E > 300$ kJ Glissement : forts mouvements différentiels ou déplacement > 1 m par évènement Glissement superficiel : $V > 0,1$ m/j Coulée : épaisseur > 2 m
Moyenne	Hommes et animaux en danger à l'extérieur des bâtiments ; dégâts aux bâtiments	Eboulement : $30 < E < 300$ kJ Glissement : $V > 2$ cm/an Coulée : épaisseur de 0,5 à 2 m
Faible	Hommes et animaux peu menacés (sauf en cas de chute de blocs) ; dégâts aux bâtiments	Eboulement : $E < 30$ kJ Glissement : $V \leq 2$ cm/an Coulée : épaisseur $< 0,5$ m

TABLEAU II-01 : Évaluation des risques liés au mouvement

LES AFFAISSEMENTS & L'ACTIVITE MINIERE

Dès que l'on creuse une excavation souterraine, les terrains avoisinant cette excavation se détendent et cette détente se propage jusqu'à la surface. Elle se traduit par une descente des terrains de surface. Cependant, cette descente est, la plupart du temps, d'un ordre de grandeur non mesurable et ne peut être une gêne pour les utilisateurs de la surface.

En revanche, les affaissements auxquels nous nous intéressons sont ceux qui se traduisent par des mouvements notables en surface, des fissurations, des crevasses, tout phénomène pouvant nuire à la sécurité des personnes et des biens.

De tels mouvements peuvent avoir deux origines :

- ou bien ils font partie intégrante de la méthode d'exploitation : on cherche à combler les vides laissés par l'extraction du minerai en provoquant l'éboulement des terrains. Ce sont des affaissements qualifiés de "contrôlés". Les principales méthodes d'exploitation conduisant à des affaissements contrôlés sont :
 - les longues tailles foudroyées ou remblayées
 - les chambres et piliers foudroyés ou dépilés
 - les sous-niveaux foudroyés

Les deux premières méthodes sont mises en oeuvre pour exploiter des gisements stratiformes peu pentés où la puissance de la couche est relativement régulière. La troisième méthode est utilisée pour exploiter des couches ou des filons pentés.

Il existe également d'autres méthodes qui n'assurent pas la stabilité à long terme des terrains de surface. Citons, par exemple, la méthode des chambres magasins, mise en oeuvre pour exploiter des couches, des filons pentés ou des amas. Cette méthode peut conduire ou non à des affaissements de surface car, après extraction du minerai de la chambre d'exploitation, celle-ci peut s'effondrer immédiatement, s'effondrer à long terme ou rester stable, et cela en fonction des caractéristiques mécaniques des terrains. De plus, l'effondrement des chambres peut ne pas se propager jusqu'à la surface. Même si l'on sait que dans cette méthode, il peut se produire des affaissements, il peut être discutable de parler alors d'affaissements "contrôlés".

- Ou bien ils se produisent inopinément par suite d'instabilités des vides souterrains. Ce sont des affaissements non contrôlés qui peuvent survenir aussi bien en cours d'exploitation que très longtemps après l'abandon de la mine. La méthode des chambres et piliers abandonnés est la méthode qui conduit le plus fréquemment à ce type d'affaissement.

CONDITIONS D'APPARITION D'UN AFFAISSEMENT.

Il est évident qu'un affaissement apparaîtra en surface si un éboulement ou affaissement initial se produit au fond et se propage jusqu'à la surface. La propagation peut s'interrompre pour plusieurs raisons telles que

- Formation d'une voûte naturelle dont la forme permet d'être stable
- Présence d'un banc dur
- Remplissage des vides par les éboulis foisonnés

NB :

- La condition pour qu'un affaissement se manifeste en surface est que la zone concernée au fond par un éboulement ait une certaine extension horizontale.
- La largeur d'affaissement est essentiellement fonction des caractéristiques géotechniques du site, c'est à dire :
 - De la profondeur de l'exploitation
 - De la nature et des caractéristiques mécaniques des terrains de recouvrement
 - Des contraintes initiales naturelles
 - De la présence de nappes phréatiques

Cette largeur peut être extrêmement diverse selon les sites.

- Lorsqu'un affaissement ou éboulement au fond se propage jusqu'à la surface, il en résulte une descente des terrains qui prennent la forme d'une "cuvette", c'est à dire une forme caractérisée par une zone assez plate au milieu et par des bords où la dénivelée est plus ou moins accentuée.

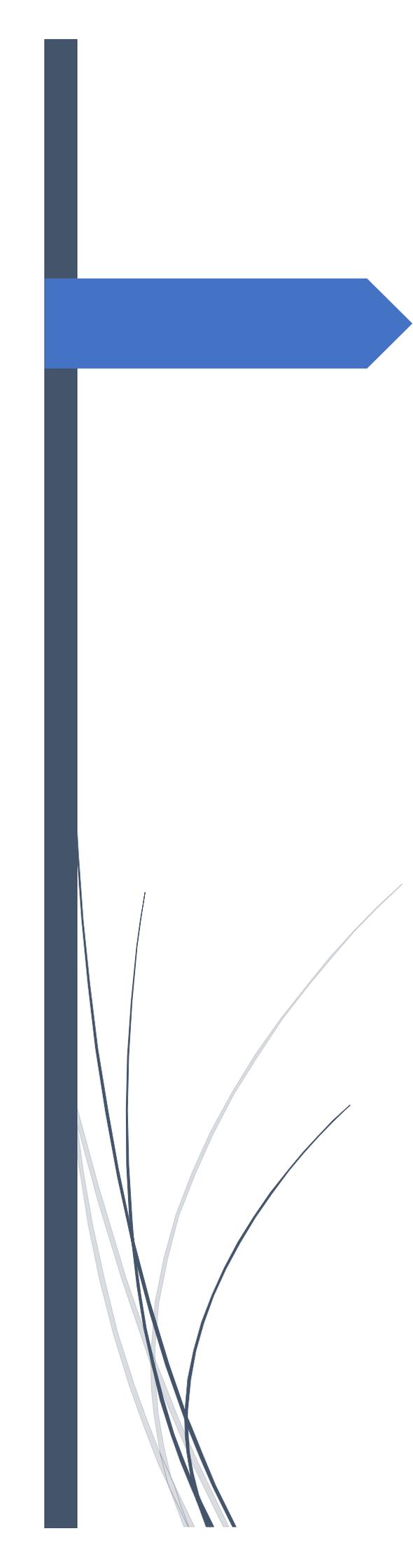
Affaissements du type fontis

Ces affaissements résultent de la propagation vers le haut d'une cloche d'effondrement d'extension réduite. Ils se produisent dans des terrains de qualité mécanique médiocre. Le document 10 propose un diagramme donnant la valeur de la résistance à la compression des terrains de recouvrement qui peut conduire à la formation d'un fontis.

L'affaissement en surface ne se produit évidemment que si la cloche d'éboulement perce en surface. Un auto-remblayage de la cheminée d'effondrement peut se faire si les vides souterrains ne sont pas trop importants. Pour cela, on notera le rôle notable du diamètre de la cheminée.



FIG N° II- 15 : Affaissements de type Fontis



CHAPITRE III

Dimensionnement des Piliers :

- Concept de l'aire tributaire
- Détermination de la charge de pilier & Pression sur pilier
- Détermination de la résistance du pilier
- Facteur de sécurité
- Application numérique dans les C^{dts} Mine Boukhadra

Dimensionnement des Piliers

Introduction

Les mines souterraines –qui ont toujours connu une activité soutenue depuis de nombreuses décennies – subsistent encore, s'étendent ou se créent et font désormais l'objet d'exigences strictes concernant la stratégie d'exploitation (plans d'exploitation rationaux et pluriannuels) et le dimensionnement des ouvrages dans le souci de garantir à la fois la production, la sécurité du personnel et leur stabilité à long terme.

Le dimensionnement des piliers qu'ils soient de mines ou de carrières (*) souterraines s'est fait initialement à partir de considérations essentiellement géométriques

En matière de stabilité, la plus grande difficulté concerne le dimensionnement des piliers de protection (abandonnés et/ou récupérables) et par conséquent les galeries (largeur ou « portée ») et l'analyse du comportement du toit, dont une approche analytique simple suffit à en évaluer la portance moyennant certaines précautions de calcul

En effet, les retours d'expérience montrent que les calculs de la résistance des bancs, piliers, couches... etc. Par des modèles analytiques classiques, donnent des résultats souvent très éloignés de la réalité (le toit résiste bien alors que le calcul montre qu'il devrait être tombé, ou l'inverse). La modélisation numérique donne une vision plus réaliste du comportement des structures, mais exige l'obtention (coûteuse) de données suffisantes et précises de caractérisation du milieu, le plus souvent incomplètes ou illusoire.

(*) La distinction entre **mine** et **carrière** n'a aucun lien avec le fait que l'exploitation soit souterraine ou à ciel ouvert, ce qui fait la différence c'est la substance extraite (d'après Loi n° 14-05 du 24 Rabie Ethani 1435 correspondant au 24 février 2014 portant loi minière.)

Pour éviter d'avoir recours à une modélisation numérique considérée : "lourde" et complexe de point de vue économique puisqu'elle nécessite : le temps, financements lourds et des investissements énorme, technologies et techniques profondes dans un "environnement abstrait", on s'appuie parfois sur des méthodes dites "simplifiées".

La première d'entre elles est la méthode dite de "l'aire tributaire", utilisée pour l'évaluation de la sollicitation moyenne s'exerçant sur les piliers. Simple d'utilisation et nécessitant peu de paramètres.

Principes de base de la conception (dimensionnement) des piliers

Principes des charges

Les charges sur les piliers sont de trois types :

1. Les charges préliminaires ou charges suivant immédiatement l'excavation des ouvertures ;
2. Les charges subséquentes ou les pressions des piliers due à l'extraction subséquente ;
3. Les charges après extraction selon la théorie de l'effondrement progressif.

Concept de l'aire tributaire

Description de la Théorie de l'Aire Tributaire

La Théorie de l'Aire Tributaire (TAT) est le modèle le plus fréquemment utilisé pour estimer la contrainte verticale moyenne agissant sur les piliers de mine verticaux. Salamon et Munro (1967) ont été les premiers à l'utiliser dans le cadre de la rétro-analyse d'effondrements de mines de charbon en Afrique du Sud. Il s'agit d'une méthode purement statique faisant l'hypothèse que chaque pilier supporte le poids de la colonne de terrain située au-dessus de sa section et au-dessus de la moitié de l'aire séparant le pilier en question de ceux qui lui sont adjacents. L'aire totale correspondante est l'aire tributaire du pilier. La contrainte verticale moyenne est alors obtenue en divisant le poids de la colonne de terrain sus-jacente à la section horizontale du pilier

- Dans le cas d'une mine très étendue et constituée de piliers aux dimensions uniformes, la contrainte verticale des piliers est plus généralement écrite en fonction de la contrainte verticale in situ et du taux de défrètement.
- Dans le cas d'une mine très étendue et constituée de piliers aux dimensions uniformes, la contrainte verticale des piliers est plus généralement écrite en fonction de la contrainte verticale in situ et du taux de défrètement.

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

Selon ce concept, un pilier supporte le poids des roches surincombantes jusqu'à une distance de la moitié de la largeur de l'excavation. Si nous désignons par L_{ex} et l_p respectivement les largeurs des excavations et de piliers, pendant que L_p est la longueur du pilier. Pour un pilier carré $l_p = L_p$

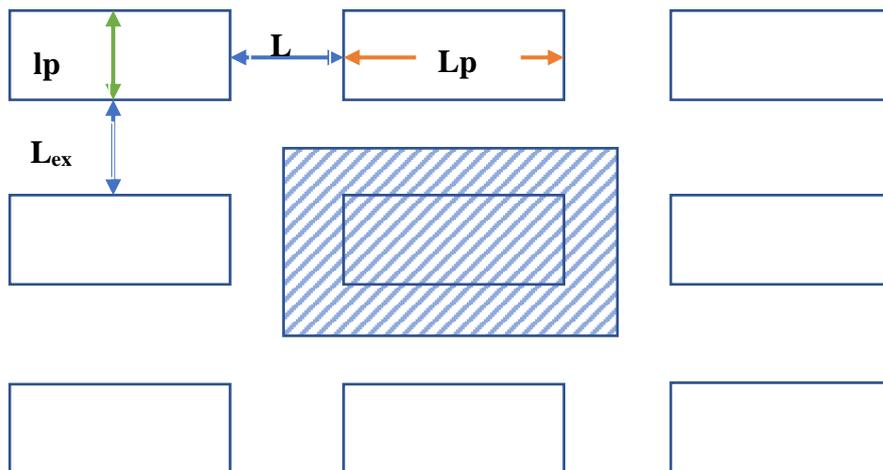


Fig N° III-1-a : Le concept de charge de l'aire tributaire

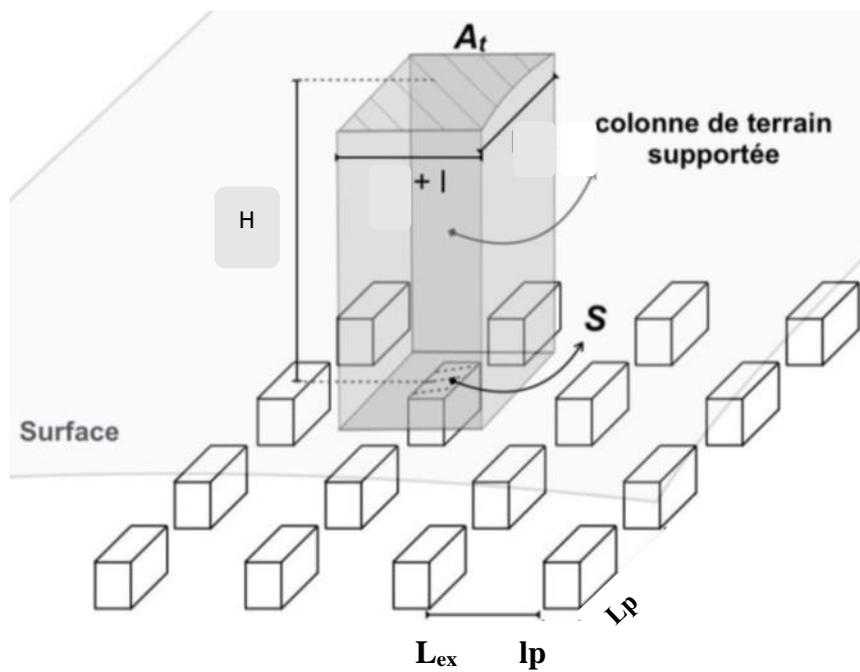


Fig N° III-1-b : Schéma de principe de la théorie de l'aire tributaire tiré de Hauquin et al. (2016).

Détermination de la charge de pilier & Pression sur pilier (*)

La théorie de l'aire tributaire accepte que la charge du pilier puisse être obtenue de l'équation suivante :

- La charge (poids) sur le pilier est donc

$$P = (L_p + L_{ex}) * (l_p + L_{ex}) * \rho * h$$

Avec ρ : le poids de roche par unité de volume (poids volumique), et h la hauteur de l'excavation

La pression sur le pilier σ est :

$$\bullet \sigma_p = \frac{P}{\text{Aire du pilier}} = \frac{(L_p + L_{ex}) * (l_p + L_{ex}) * \rho * h}{(L_p * l_p)}$$

$$\bullet \sigma_p = \frac{(L_p + L_{ex}) * (l_p + L_{ex}) * \sigma_v}{(L_p * l_p)}$$

Dans le cas des panneaux inclinés, la formule des charges sur le pilier est :

$$\sigma_p = \frac{(L_p + L_{ex}) * (l_p + L_{ex}) * \sigma_v}{(L_p * l_p)} \cos \theta + v \sin \theta$$

Avec :

- θ : angle d'inclinaison
- n ; le coefficient de Poisson

(*) (Les symboles utilisés dans les équations proposées par nos soins, traduction anglais - français assisté par google traduction)

- σ_v : la charge verticale = ρh

Des nombreuses approches sont disponibles pour estimer la charge aux piliers, ou plus correctement la moyenne de force au pilier. Les deux majeurs sont l'approche de l'aire tributaire et la théorie de déflexion élastique. L'approche simpliste pour déterminer la charge du pilier est l'aire tributaire :

$$Sp = \left[1.1H \frac{(lp + B)(Lp + B)}{lp \cdot Lp} \right]$$

Avec :

- Sp : La charge du pilier ou la force moyenne du pilier ;en psi
- H : est la profondeur en dessous de la surface ;en pied
- lp : la largeur du pilier ; en pied
- Lp : la longueur du pilier ;en pied
- B : la largeur de l'entrée ;en pied.

Le terme 1.1 H peut être remplacé par la pression vierge verticale Sv dérivé du poids de terrain de recouvrement au-dessus du filon gH, où g est l'unité de poids de recouvrement. La pression peut être considéré augmenter de 1.1 psi/ft de profondeur.

Pour des piliers carrés, lp=Lp, l'équation devient (on prend L):

$$Sp = 1.1H \left[\frac{(L + B)^2}{L^2} \right]$$

Pour les filons inclinés :

$$Sp = 1.1H \frac{(L + B)^2}{L^2} (\cos \theta + m \sin \theta)$$

Où θ est l'angle d'inclinaison du filon, m le coefficient de Poisson

Taux d'extraction :

Dans l'exploitation des gisements plateaux, le taux d'extraction "Tex" est introduit pour définir le rapport entre la surface au volume de minerai extrait et la surface au volume totale du minerai,

Si le terme extraction e est introduite (le pourcentage d'extraction) lequel est défini comme le ratio de l'aire miné sur l'aire totale, donc pour l'extraction avec des piliers rectangulaires:

$$e = 1 - \left[\frac{lp}{lp + B} \right] \left[\frac{L}{L + B} \right]$$

Ce qui peut aussi conduire à écrire :

$$S_p = 1.1 \frac{H}{(1 - e)}$$

Détermination de la résistance du pilier

La résistance d'un pilier est sa capacité maximale à supporter les charges par unité de surface. Elle dépend des différents paramètres tels que :

- La résistance in situ à la compression uni-axiale comprenant le pilier.
- La forme du pilier.
- Les propriétés mécaniques de la roche qui constitue le pilier, le toit et le mur.
- Les propriétés des discontinuités dans la roche

Après plusieurs études sur les données des piliers rompus dans différentes mines mondiales les chercheurs développent une série de formule pour les calculs de résistance du pilier minier. Les formules sont empiriques et la majorité a la même base empirique.

Les formules prennent la forme de puissance ou de forme linéaire mais ont un aspect commun de considérer le rapport largeur/hauteur (L/h) des piliers à l'étude et la résistance à la compression d'un spécimen de la roche intacte

Le concept de force de taille critique des masses rocheuses énoncé par *Bieniawski* en 1968 est très important pour la conception pratique. La taille critique est définie comme la taille de spécimen à laquelle une augmentation continue en largeur ne cause pas de diminution significative de la pression. D'autres auteurs tels que Jahns, Lama, Pratt (PATI, 2011) ont confirmé que le phénomène de taille critique existe dans des types variés de roches.

Pour le charbon

- *Bieniawski* conclut en 1968 que 1.5 mètre cube constitue la valeur de la taille critique.
- *Pariseau* en 1977 reportait que la taille critique pour le charbon de l'ouest des États-Unis est de 0.9 m (3 pieds).
- *Hustrulid* en 1976 pointait que la taille critique est de 0.9 m (soit 3 pieds) pourrait généralement être applicable pour les objectifs de pratique d'ingénierie pour le charbon.

La signification du phénomène de la taille critique, est bien sûr, les valeurs de la force à la taille critique sont directement applicables aux piliers à la taille complète.

L'effet de taille caractérise la différence en force entre les spécimens de petite taille testés au laboratoire et les piliers de grande tailles minés sur site. Les recherches ont montré que les interprétations des propriétés des données mesurées au laboratoire sur les valeurs du terrain peuvent être satisfaisante par les équations suivantes (particulièrement en unités anglaises) :

Applicable au pilier cubique ayant une hauteur $h > 0.9\text{m}$

$$\sigma_1 = \frac{K}{\sqrt{36}}$$

Applicable au pilier cubique ayant une hauteur moins de 0.9 m :

$$\sigma_1 = \frac{K}{\sqrt{h}}$$

Dans les formules précédentes, la constante k doit être déterminée pour le matériel actuel du pilier et est obtenu par la formule :

$$K = \sigma_c \sqrt{D}$$

Avec σ_c la force de compression uni axiale de spécimens de roche testé au laboratoire ayant un diamètre D ou un cube de taille D en pouces. Il pourrait être noté que bien qu'il y a une différence en résultats de laboratoire dépendant sur le fait que soient les spécimens étaient cylindriques ou cubiques, pour des objectifs d'ingénierie la différence n'est pas significative dans l'intervalle entre 50 et 100 mm .

C'est difficile de déterminer correctement la résistance d'un pilier sur terrain à cause du manque d'équipement de test à grande échelle. Mais il a été largement accepté que la taille des éprouvettes a un effet significatif sur la résistance des échantillons de roche. Une équation commune est utilisée pour les calculs des résistances S_p , laquelle peut être exprimée comme une fonction du ratio largeur-hauteur d'un pilier et une constante a :

$$S_p = k * L_p^\alpha * h^\beta$$

Où :

- L_p est la largeur de pilier,

- h la hauteur de pilier,
- α et β des constantes,
- k une constante représentant la résistance de la roche.

✚ Salomon et Munro ont établi une formule empirique de résistance des piliers utilisant la loi de probabilité maximale (En analysant deux bases de données des piliers rompus et stables,).

Dans cette méthode, il est assumé que le facteur de sécurité F_s des piliers qui ont échoués peuvent être soit grande ou soit petite que l'unité, lequel conduit à un groupement restreint des moyennes de F_s des cas des piliers rompus autour de l'unité. A travers un processus d'optimisation de probabilité d'estimation maximale, la formule est écrite :

$$Sp = 6.61 \frac{Lp^{0.5}}{0.7}$$

✚ Van der Merwe introduisit la technique de réduction de chevauchement comme une formule alternative du calcul de résistance du pilier. La formule de résistance de Merwe et Mathey est :

$$Sp = 6.61 \frac{Lp^{0.5}}{h}$$

✚ La formule de Bieniawski est :

$$Sp = S_i \left(0.64 + 0.36 \frac{Lp}{h} \right)$$

Facteur de sécurité

Le pilier minier est l'élément le plus important dans l'exploitation souterraine. Leur comportement mécanique contrôle le statut général de la mine. Pour évaluer leur comportement il faut calculer le facteur de sécurité (F_s). Si le facteur de sécurité est supérieur à un, on est dans le cas favorable (stabilité) et si le contraire le pilier risque de

ruiner (rupture). Le facteur de sécurité dépend de deux valeurs la résistance du pilier et les contraintes appliquées sur le pilier

Le facteur de sécurité est :

$$F_s = \frac{\sigma_P}{S_P}$$

Avec :

- σ_P : La résistance du pilier
- S_P : la charge du pilier

L'approche ci-dessus de conception de pilier incorpore les considérations suivantes ;

1. Le filon ou le joint est assujéti à la pression verticale seulement, lequel est constant au travers de la zone d'exploitation minière. Bien que, le transfert des charges arrive où la rigidité des piliers dans les travaux souterrains, ainsi donc la pression verticale peut être soulagé partiellement
2. Chaque pilier supporte le poids la colonne de la roche allant sur l'aire qui est la somme de la section transversale de l'aire du pilier plus une portion de l'aire de la chambre, cette dernière étant équitablement partagé par tous les piliers environnants. De toutes les façons, ceci n'est certainement pas valide si l'aire de développement est petits vu que les piliers au centre de l'excavation sont sous plus de charge que les piliers autour des abords. C'est généralement accepté comme valide seulement si l'aire excavé est grande que la profondeur au-dessus de la surface.
3. C'est assumé que la charge est uniformément distribuée sur la section-transversale du pilier.

D'autres recherches montrent que :

- a) La charge n'est pas uniformément distribuée sur la section transversale d'un individuel pilier, la charge maximum apparaît aux coins formés par l'intersection des trois plans orthogonaux, nommément, les deux murs du pilier et le toit ou le plancher
- b) La charge aux piliers augmente avec le pourcentage d'extraction
- c) La distribution de charge dans les piliers dépend du ratio de la largeur et de la hauteur du pilier

Taille des piliers

La taille des piliers est influencée par les éléments suivants :

- La profondeur de la surface et le pourcentage d'extraction dans les premiers travaux ou développement
- La résistance de la roche : les filons avec des minéraux faibles requièrent des piliers larges. L'effet de l'atmosphère et des gaz échappés influencent aussi la taille des piliers (notamment le charbon)
- La nature du toit et du pavement. Celles-ci influencent la responsabilité d'écraser et de fluage. Un toit fort tend à écraser les bords du pilier pendant qu'un pavement tendre prédispose au fluage et les deux requièrent des piliers larges.
- Les considérations géologiques : dans les voisinages des joints, des larges piliers sont requis. Le pendage et la présence des eaux influencent aussi la décision sur la taille des piliers

- Les déformations en fonction du temps : Avec le temps, les déformations augmentent, la charge restant constante, et si la taille du pilier n'est pas suffisamment large, alors il peut faillir sous les déformations en fonction du temps, bien qu'il puisse être initialement stable.

Aussi, avec le temps, l'altération prend place ce qui réduit la résistance des piliers.

Il pourrait paraître que la taille du pilier augmente avec la profondeur ainsi que la largeur de la galerie. Comme la profondeur augmente, la pression des couches augmente, Naturellement, ainsi donc, pour supporter l'augmentation des pressions des couches, la taille des piliers doit être augmentée avec la profondeur.

Avec l'augmentation des largeurs des galeries, le pourcentage d'extraction est augmenté lequel à son tour résulte dans des grandes pressions des couches par unité de surface des piliers solides. Pour contrecarrer ceci, la taille des piliers requiert encore d'être augmenté avec l'augmentation des largeurs des galeries.

Autres méthodes d'estimation des charges

Plusieurs méthodes proposées pour l'estimation des charges appliquées sur le pilier minier. Des méthodes simples se basent sur la géométrie de la mine et la densité recouvrement. La de l'aire tributaire (TAT) est la méthode la plus simple. Son principe est de calculer le poids de colonne de recouvrement. Puis, la TAT a évolué et nous donne la théorie de l'arche de pression (PAT) qui a le même principe mais il prend en considération la Zone d'Influence (ZI). Deux autres méthodes d'estimation de charge ont un principe défèrent La méthode convergence-confinement et La théorie du fléchissement élastique. Ces deux méthodes basent sur les calculs in-situ de la convergence du toit et les déformations Résultants des vides creusés lors de l'exploitation. Une dernière méthode analytique est proposée par Roberts et al. Le principe de cette méthode est de faire un modèle numérique de la mine en éléments finis ou frontières pour le calcul des charges.

Application numérique :

Afin de dimensionner les piliers qui constituent l'ouvrage indispensable dans la méthode d'exploitation adoptée et retenue dans les conditions de la Mine de Boukhara, notre approche a été l'application de la *théorie de l'aire tributaire* qui ne nécessite pas beaucoup de données, et elle repose sur des simples bases de calcul et des constatations in situ ; c'est-à-dire la détermination de trois paramètres primordiaux et qui sont les maillons essentiels dans le dimensionnement :

- La contrainte sur le pilier
- La résistance du pilier
- Le facteur de sécurité

Et à partir de ces calculs nous vérifions leurs dimensions et nous estimons leurs stabilité et aptitudes de supporter les charges et/sollicitations simples et composée qui leurs sont imposées dans des conditions de sécurité satisfaisantes,

Compte tenu de la situation actuelle, prendre des mesures des piliers existants à l'intérieur de la mine de Boukhadra au niveau 1105 est très difficile, et donc nous nous sommes appuyés sur les plans existants, et donc les résultats réels peuvent être différents de ce que nous avons obtenu à certains zones , et donc nous ne pouvons pas être certain de la véracité et l'exactitude des résultats obtenus ,or nous considérons que notre étude n'est qu'un point de départ pour lancer des études approfondies basées sur des fondements scientifiques et technologiques soutenus par des programmes et logiciels numériques qui peuvent hisser de nombreuses ambiguïtés dans ce domaine et aboutir à des résultats qui peuvent être impressionnant, qui sert la science et la préservation de la mine de Boukhadra ,

NB :

Dans ce calcul : La largeur maximale (dans le cas des piliers rectangulaires) et la hauteur des piliers -qui est celle de l'excavation- ont été utilisés dans les calculs, Cela implique que la résistance des longs piliers rectangulaires et des piliers en partie en banc peut avoir été sous-estimée ou peut être surestimée,

Application numérique :

Afin de dimensionner les piliers qui constituent l'ouvrage indispensable dans la méthode d'exploitation adoptée et retenue dans les conditions de la Mine de Boukhara, notre approche été l'application de la [théorie de l'aire tributaire](#) qui ne nécessite pas beaucoup de données, et elle repose sur des simples bases de calcul et des constatations in situ ; c'est-à-dire la détermination de trois paramètres primordiaux et qui sont les maillons essentiels dans le dimensionnement :

- La contrainte sur le pilier
- La résistance du pilier
- Le facteur de sécurité

Et à partir de ces calculs nous vérifions leurs dimensions et nous estimons leurs aptitudes de supporter les charges simples et composée qui leurs sont imposées dans des conditions de sécurité satisfaisantes,

NB :

Compte tenu de la situation actuelle, prendre des mesures des piliers existants à l'intérieur de la mine de Boukhadra au niveau 1105 est très difficile, et donc nous nous sommes appuyés sur les plans existants, et donc les résultats réels peuvent être différents de ce que nous avons obtenu à certains zones , et donc nous ne pouvons pas être certain de la véracité et l'exactitude des résultats obtenus ,or nous considérons que notre étude n'est qu'un point de départ pour lancer des études approfondies basées sur des fondements scientifiques et technologiques soutenus par des programmes et logiciels numériques qui peuvent hisser de nombreuses ambiguïtés dans ce domaine et aboutir à des résultats qui peuvent être impressionnant, qui sert la science et la préservation de la mine de Boukhadra ,

AXE PRINCIPAL

<i>N° Pilier</i>	<i>Largeur excavation</i>	<i>Hauteur excavation/p ilier</i>	<i>Largeur pilier</i>	<i>Longueur pilier</i>	<i>Pression P</i>		<i>Rapport Largeur/H auteur</i>	<i>Charge pilier</i>	<i>Resistance pilier</i>	<i>Facteur Sécurité FS</i>
	Lex	h	lp	Lp	$(Lp + Lex) * (lp + Lex) * \rho * h$			$p/Lp * lp$		RESISTANCE /CHARGE SP/ σP
	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Tonne force /mètre carré</i>	<i>MPa</i>	//	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	
1	10.00	20.00	4.00	8.00	13 608.00	133.45	0.4	4.17	4.70	1.13
2	10.00	20.00	2.00	7.00	11 016.00	108.03	0.35	7.72	4.60	0.60
3	10.00	20.00	2.50	7.00	11 475.00	112.53	0.35	6.43	4.60	0.71
4	10.00	20.00	2.00	7.00	11 016.00	108.03	0.35	7.72	4.60	0.60
5	10.00	20.00	4.00	5.00	11 340.00	111.21	0.25	5.56	4.38	0.79
6	10.00	20.00	3.00	6.00	11 232.00	110.15	0.3	6.12	4.49	0.73
7	10.00	20.00	2.00	9.00	12 312.00	120.74	0.45	6.71	4.81	0.72
8	10.00	20.00	2.00	9.00	12 312.00	120.74	0.45	6.71	4.81	0.72
9	12.00	20.00	3.00	9.00	17 010.00	166.81	0.45	6.18	4.81	0.78
10	12.00	20.00	5.00	5.00	15 606.00	153.05	0.25	6.12	4.38	0.72
11	12.00	20.00	7.00	7.00	19 494.00	191.17	0.35	3.90	4.60	1.18
12	12.00	20.00	2.00	14.00	19 656.00	192.76	0.7	6.88	5.35	0.78
13	20.00	20.00	5.00	15.00	47 250.00	463.37	0.75	6.18	5.46	0.88
14	20.00	20.00	3.00	6.00	32 292.00	316.68	0.3	17.59	4.49	0.26
15	20.00	20.00	4.00	5.00	32 400.00	317.74	0.25	15.89	4.38	0.28
16	20.00	20.00	3.00	7.00	33 534.00	328.86	0.35	15.66	4.60	0.29

17	20.00	30.00	3.00	8.00	52 164.00	511.56	0.26	21.32	4.42	0.21
18	12.00	30.00	2.00	21.00	37 422.00	366.99	0.7	8.74	5.35	0.61
19	12.00	30.00	4.00	8.00	25 920.00	254.19	0.26	7.94	4.42	0.56
20	12.00	30.00	2.00	12.00	27 216.00	266.90	0.4	11.12	4.70	0.42
AXE SUD-EST										
<i>N° Pilier</i>	<i>Largeur excavation</i>	<i>Hauteur excavation/p ilier</i>	<i>Largeur pilier</i>	<i>Longueur pilier</i>	<i>Pression P</i>		<i>Rapport Largeur/H auteur</i>	<i>Charge pilier</i>	<i>Resistance pilier</i>	<i>Facteur Sécurité FS</i>
	Lex	h	lp	Lp	$(Lp + Lex) * (lp + Lex) * \rho * h$			$p/Lp) * lp$		RESISTANCE /CHARGE SP/ σP
	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Tonne force /mètre carré</i>	<i>MPa</i>	//	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	
21	15.00	35.00	1.00	5.00	30 240.00	296.56	0.14	59.31	4.15	0.07
22	12.00	35.00	4.00	4.00	24 192.00	237.25	0.11	14.83	4.09	0.28
23	25.00	35.00	5.00	13.00	107 730.00	1 056.49	0.37	16.25	4.64	0.29
24	8.00	35.00	3.00	6.00	14 553.00	142.72	0.17	7.93	4.21	0.53
25	12.00	35.00	1.50	8.00	25 515.00	250.22	0.23	20.85	4.33	0.21
26	30.00	35.00	10.00	14.00	166 320.00	1 631.07	0.40	11.65	4.70	0.40
27	25.00	35.00	1.00	7.00	78 624.00	771.05	0.20	110.15	4.27	0.04
28	8.00	30.00	3.00	10.00	16 038.00	157.28	0.33	5.24	4.56	0.87
29	14.00	30.00	2.00	4.00	23 328.00	228.77	0.13	28.60	4.13	0.14
30	10.00	30.00	5.00	7.00	20 655.00	202.56	0.23	5.79	4.34	0.75

AXE SUD-EST

<i>N° Pilier</i>	<i>Largeur excavation</i>	<i>Hauteur excavation/p ilier</i>	<i>Largeur pilier</i>	<i>Longueur pilier</i>	<i>Pression P</i>		<i>Rapport Largeur/H auteur</i>	<i>Charge pilier</i>	<i>Resistance pilier</i>	<i>Facteur Sécurité FS</i>
	Lex	h	lp	Lp	$(Lp + Lex) * (lp + Lex) * \rho * h$			p/Lp *lp		RESISTANCE /CHARGE SP/ σP
	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Mètre</i>	<i>Tonne force /mètre carré</i>	<i>MPa</i>	<i>//</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	
31	7.00	30.00	2.00	3.00	7 290.00	71.49	0.10	11.92	4.06	0.34
32	10.00	30.00	2.00	2.00	11 664.00	114.39	0.07	28.60	3.98	0.14
33	12.00	30.00	2.00	6.00	20 412.00	200.18	0.20	16.68	4.27	0.26
34	20.00	30.00	3.00	8.00	52 164.00	511.56	0.27	21.32	4.42	0.21
35	20.00	30.00	5.00	20.00	81 000.00	794.35	0.67	7.94	5.28	0.66
36	12.00	15.00	4.00	7.00	12 312.00	120.74	0.47	4.31	4.85	1.12
37	10.00	15.00	1.00	2.00	5 346.00	52.43	0.13	26.21	4.13	0.16
38	10.00	15.00	2.00	7.00	8 262.00	81.02	0.47	5.79	4.85	0.84
39	10.00	15.00	3.00	4.00	7 371.00	72.29	0.27	6.02	4.42	0.73
40	13.00	15.00	5.00	30.00	31 347.00	307.41	2.00	2.05	8.16	3.98

Interprétation des calculs

Dans notre approche, le diagnostic est basé sur le rapport contraintes / résistances estimée à partir de quelques données et basé fondamentalement sur le rapport largeur -hauteur.

On détermine l'intrinsèque de cette comparaison, c'est-à-dire celle imputable directement au choix des dimensionnement des piliers et par la suite d'autres ouvrage miniers (chambres, magazines, niveaux ...), en supposant que les conditions sont réalisées :

D'après le retour d'expérience:

Dans le cas d'un mauvais dimensionnement, l'effondrement ne survient pas dans les premiers mois d'exploitation car alors la charge sur les piliers n'a pas encore atteint sa valeur maximale. Il faut attendre pour cela que les dimensions du panneau soient suffisamment importantes marnes pour que tous les terrains de recouvrement reposent bien sur les piliers. L'effondrement peut se produire plusieurs années ou plusieurs décennies après l'exploitation

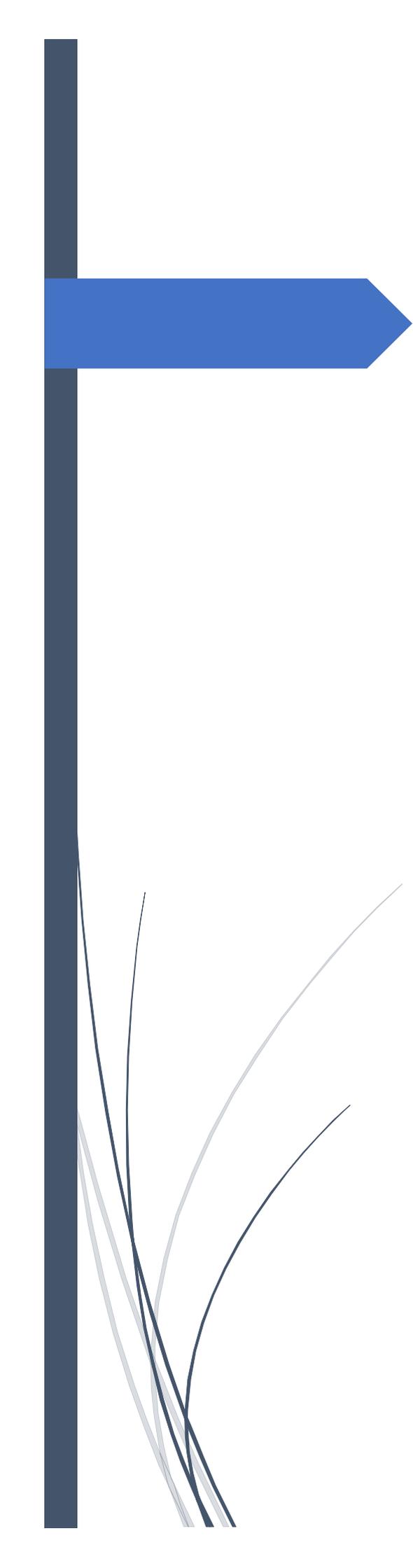
De ce fait, les mesures entreprises à partir des observations et constatations sur terrains de l'état actuel de la Mine indiquent que :

- Pour les zones où le facteur de sécurité est inférieur à 1, Certains secteurs de piliers ont subi une charge importante provoquant une déformation intense.(situation d'instabilité totale)
- Toutefois, les mesures et les calculs effectuées, n'ont enregistré aucune anomalie dans plusieurs zones où le facteur de sécurité est supérieur à 1 et qui se trouvant donc momentanément en état d'équilibre.(c'est la zone stable)
- Dans les zones où Le facteur de sécurité est très voisin de 1 et les piliers se dégradent progressivement sous l'application continue des charges dû à plusieurs sollicitations, (pression de recouvrement, phénomène du fluage... etc.), les piliers sont dans un état stable, mais c'est une stabilité critique pour ainsi dire,

Sur la base de ce qui précède et les résultats que nous avons obtenus, nous nous essayons d'expliquer nos résultats à la lumière de la situation actuelle alarmante :

- I. Seulement 04 piliers dans lesquelles le facteur de sécurité était supérieur à un (>1), (piliers N° : 01 ,11 , 36 & 40), Ces piliers dont le facteur de sécurité était proche de 1 semblent à première vue solides et stables, mais leur stabilité est relative voire critique , et vue les contraintes/sollicitations de couches de recouvrement adjacentes (force de pression)exercées continuellement sur ces piliers , peut éventuellement conduire à leurs pertes et à leurs rupture
- II. 36/40 piliers calculés le facteur de sécurité est inférieur à 1, voire presque nul pour 12 piliers (dont les N° : 14,15,16,17,20,21,22,23,25,26,27,31,32,34&36) , c .a.d aucune résistance et/ou faible résistance ,les piliers dans ce cas sont :détériorés ou effondrés .
- III. Le dimensionnement préalable des piliers n'a pas fait l'objet d'études fiable, la méthode d'exploitation qui consiste à laisser en place des piliers en vue d'assurer la stabilité du site, ne peut marcher car il existe toujours des incertitudes sur les caractéristiques des terrains qui ne peuvent être levées.

En conclusion, on peut dire : qu'entre surestimation et sous-estimation de dimensionnement des ouvrages miniers à la mine de Boukhadra, sous-estimation des dimensions des piliers et surestimation des chambres ont conduit l'état de stabilité de la mine à atteindre ce qu'elle est aujourd'hui, surtout à ce niveau 1105, ainsi le manque et l'absence des données fiables conçus à partir des études approfondies, et assisté par des logiciels et applications numériques,



CONCLUSION

CONCLUSION

La méconnaissance des mécanismes et l'absence de reconnaissances poussées et d'essais géotechniques permettant d'évaluer les différentes contraintes in situ, il est possible d'avoir une estimation de ces dernières et un prédimensionnement des piliers grâce à l'approche classique de l'aire tribulaire, qui est le modèle qui présente l'avantage d'être très simple d'utilisation et de pouvoir s'appliquer à des géométries de mine. Cependant, il repose sur certaines hypothèses fortes de par sa nature purement statique qui ne prend pas en compte la déformabilité de la roche, cette théorie simple, efficace basée sur des indicateurs statistiques issus du retour d'expérience.

Deux principaux aléas de grande ampleur sont susceptibles d'affecter la surface du sol à l'aplomb des mines exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnés :

- **Les affaissements progressifs**, qui donnent lieu à un mouvement continu du sol,
- **Les effondrements brutaux**, qui génèrent un mouvement discontinu du sol marqué par des escarpements topographiques.

La Mine de Boukhadra qui comprend de nombreux chantiers (quartiers) dont : l'épuisement des réserves et l'abandon des niveaux épuisés et/ou exploités auparavant (période coloniale) et manques d'information voire l'absence totale des informations (absence de traçabilité des anciennes méthodes d'exploitation et plans des zones exploités auparavant) ont laissé place au développement de désordres en surface et sur les chantiers actuels d'exploitation et ceux qui vont être développer pour éventuel exploitation (phases 4 &5) ; parmi lesquels ont été comptés de nombreux affaissements et effondrements. Les effondrements étant particulièrement dangereux, il est devenu nécessaire de pouvoir distinguer à l'avance les zones à risque d'effondrement de celles à risque d'affaissement.

Et avant de donner une explication des résultats obtenus grâce aux applications numériques, nous essayons avant de conclure de définir un concept important qui peut être d'une importance primordiale dans la définition des caractéristiques des résultats, qui est :

La phénoménologie du comportement mécanique des piliers

Plusieurs facteurs peuvent favoriser la rupture des piliers parmi lesquels on peut citer :

- L'effet du fluage progressif de la roche,

- L'effet de l'érosion par l'eau qui induit une réduction de la résistance de la roche, le vieillissement,
- L'effet de l'exploitation qui peut engendrer une augmentation des contraintes appliquées aux piliers, par exemple lorsque le taux de défrètement global augmente.

Indépendamment des facteurs responsables de la détérioration des piliers, le mécanisme général par le biais duquel elle se produit peut-être étudié grâce à des essais de compression

Phénoménologiquement, le comportement décrit par les essais de compression se traduit par l'apparition et l'agrandissement de fissures et de fractures à l'intérieur des piliers à mesure qu'ils s'endommagent puis cèdent.

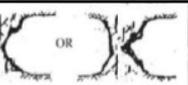
1	Pilier intact	
2	Ecaillage mineur des parois, apparition d'une fracturation parallèle à la hauteur du pilier	
3	Ecaillage significatif des coins, Agrandissement des fractures qui restent de longueur inférieure à la hauteur du pilier	
4	Fractures continues et ouvertes de longueur supérieure à la hauteur du pilier, début de fracturation diagonale	
5	Fracturation diagonale développée sous forme de « sablier »	
6	Pilier rompu, faible résistance résiduelle, forme de sablier très marquée ou chute majeure de blocs.	

Fig. N°IV-1 Classification des piliers en fonction de leur niveau d'endommagement (Thomas Hauquin., 2016.)

- **Étape 1** : Pilier non fracturé initialement,
- **Étape 2** : l'endommagement débute dans les angles où les contraintes de compression verticales et de cisaillement sont maximales.
- **Étapes 3-5** : En raison de l'absence de confinement horizontal, et sous l'effet de contraintes tangentielles induites par la rupture des angles, des écailles peuvent se détacher le long des parois. Les piliers prennent alors la forme typique d'un sablier.

Dès lors, il est de notre devoir d'inviter, à travers cette plateforme à inciter les étudiants qui nous succéderont à s'appuyer sur cette initiative mémoire qui a été posée – malgré toutes les insuffisances qui peuvent être enregistrées – dans la réalisation de recherches et dévoiler beaucoup de recherches appliquées afin de contribuer au développement du domaine des mines Préserver cette richesse non permanente et parvenir à un développement durable dans ce domaine.

Références bibliographiques :

1. J. Bonvallet et C. Chambon; *Détermination d'un coefficient de sécurité dans les exploitations par chambres et petits piliers abandonnés* , Revue Française De Géotechnique Numero 13 ; France (1980)
2. E. Tincelin, D. Leonet, D. de Winter *Dimensionnement des exploitations souterraine et stabilité de la surface* , Revue Française De Géotechnique Numero N° 14 Bis (1981) Supplément ,France,
3. C .Didier, N. van der Merwe. *Analyse en retour d'expérience de deux effondrements miniers dans des mines de charbon : cas des mines de coalbrook (Afrique du Sud) et de Gardanne (France)*. Revue Française De Géotechnique NUMERO 131-132,2010,France
4. Jean-Marc Watelet, D. Montagne, Michel Wojnarowicz. *Risques d'effondrement de carrières souterraines en milieu urbain. De la prévention a la mise en sécurité. Exemple de l'ilot St-Julien _à Laon (02)*. Revue française de Géotechnique, 2002,
5. V. Maury *effondrements spontanés et possibilité de mise en charge hydraulique* Revue Française De Géotechnique Numéro 13 ; France (1980).
6. P. Habib *La rupture différée en mécanique des roches* Revue Française De Géotechnique Numéro 108. 2004 ; France
7. P. Bérest, B. Brouard, B. Feuga et M. Karimi-Jafari *L'effondrement de 1873 à la mine de Varangéville*, Revue Française De Géotechnique Numéro 131-132.2010 ; France
8. J.-P. Josien, J.-P. Piguet et G. Vouille *Apport des retours d'expérience pour la mise en sécurité dans les mines de fer de Lorraine* Revue française de Géotechnique NUMERO 131-132,2010, France .
9. NEKACHE R. *Étude de la stabilité des mines souterraines par les méthodes numériques. Cas de la mine de Chaabet El Hamra – Algérie mémoire Magister , Université Annaba,ALGERIE ,2012*
10. LAICHE A. *Modélisation de l'effet de forme, de taille et de l'anisotropé sur la stabilité d'un pilier souterrain, Mémoire de Fin d'Etudes Ingéniorat* , école nationale supérieure des mines et de la métallurgie AMAR LASKRI- ANNABA 2019.
11. Jacques FINE, *Etude Des Risques De Mouvements De Terrains Lies Aux Travaux Miniers En Souterrain Et A Ciel Ouvert Les affaissements miniers* , ECOLE DES MINES DE PARIS, France
12. Nishant Kumar Pati ; *"Evaluation of Underground Coal Pillar Design"* Under the guidance of Dr. MANOJ KUMAR MISHRA, Department of Mining Engineering , National Institute of Technology Rourkela-2011.INDE
13. Abdellah Wael R , *Serviceability analysis of deep underground openings driven in jointed-rock*, International Journal of Mining Science and Technology 2017, (<https://www.elsevier.com>)
14. Song Gaofeng ,Yang Shengli, *Probability and reliability analysis of pillar stability in South Africa* , International Journal of Mining Science and Technology (2018) <https://www.elsevier.com> .
15. Gabriel S. Esterhuizen, Dolinar, D. R., & Ellenberger, J. L. (n.d.). *Pillar Strength and Design Methodology for Stone Mines*.

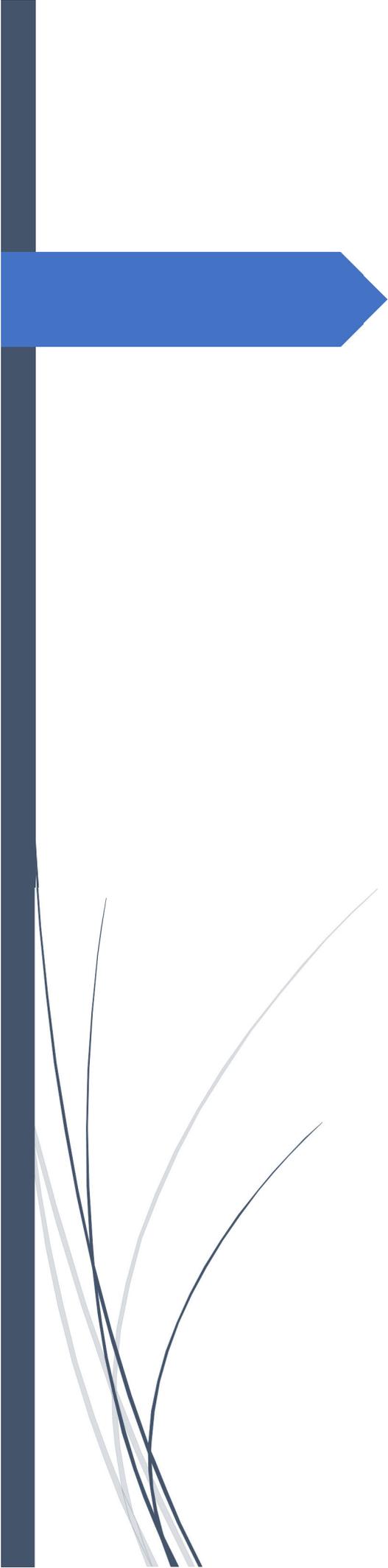
16. Kongolo, N *Determination Of Pillar Strength From Kamoto Room And Pillar Collapse By Numerical Approach.*: University of Witwatersrand. Johannesburg South Africa ,1998.
17. Limited, K. F. *Executive Summary Report for Kamoto Redevelopment Project Rev 1.0.* 2007.Kolwezi: HATCH TM.
18. L. DENOEL, *Recherches récentes sur les affaissements dus aux travaux miniers,* Annales des Mines de Belgique , 1954
19. Yves Paquette. *Comportement des terrains au-dessus des exploitations partielles Diagnostic de stabilité et organisation de la surveillance des exploitations partielles abandonnées Cas des carrières de la région Nord-Pas-de-Calais.* Conférence mondiale sur le développement durable des anciens pays charbonniers” l’Après-Charbon”, Mar 1997, Lille, France.
20. Jean-Jacques Tritsch. *Les mécanismes de ruptures des carrières souterraines abandonnées. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées :* séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France.
21. F. Laouafa, Jean-Jacques Tritsch. *Stabilité des carrières : analyse critique de quelques méthodes analytiques. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées :* séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France.
22. F. Laouafa, M. Ghoreychi, X. Daupley. *Une méthode pour la prévision de la stabilité à long terme d’exploitations minières : applications aux mines de sel exploitées par la méthode des chambres et piliers.* Journées nationales de géotechnique et de géologie, Jun 2004, Lille, France
23. J. Fougeron. *Effondrement et affaissement des mines de fer en Lorraine : rôle de la couverture et de la morphologie.* Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007. France
24. LEMRABET A, TAYEBI A ; *Approche comparative de deux gisements de fer Boukhadra et Rouina : Contexte géologique et Méthodes d’exploitation* Mémoire de Master encadré par K.KICHER, université , Bejaia , Algérie , 2015 ;
25. Jean Pierre TSHIBANGU *La méthode des chambres et piliers : design et implications géomécaniques,* Journée d’étude de la SBGIMR : L’exploitation du Noir de Mazy 31 mai 2017 ,Université de Mons.
26. N Berenger, R Flahaut, D Mathon, C Kreziak, F Marty. *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique.* Institut Français des Sciences Et Technologies Des Transports, De L’aménagement Et des Réseaux - IFSTTAR, 2014, GUIDE TECHNIQUE, France.
27. AL HEIB M. M. *les nouvelles méthodes de modélisations numériques et le volume d’influence des exploitations minières en conditions complexes,(* http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php <http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>) , thèse doctorat ,Institut National Polytechnique de Lorraine, France ,1993 ,

28. THIBODEAU D . *Comportement et méthodes de dimensionnement des câbles d'ancrage utilisés dans les mines souterraines* , ([http:// www. Cfcopies .com/V2 /leg/leg droi.php](http://www.Cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php) [http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/ droits/ protection.htm](http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm)) , thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France ,1994
29. KHEDER K. *méthodologie d'études de la stabilité des carrières souterraines complexes exploitées par chambres et piliers abandonnés*, ([http:// www. Cfcopies .com/V2 /leg/leg droi.php](http://www.Cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php) [http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/ droits/ protection.htm](http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm)) , thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, France ,1996
30. G. Cailletaud ,S. Cantournet, L. Corte, J.L. Dequiedts. Forest, A. Gaubert, S. Joannes, M. Maziere H. Proudhon, D. Ryckelynck, M. Tijani *COURS Mécanique Des Matériaux* , MINES ParisTech , France 2012.
31. A. Thoraval. *Aide au dimensionnement de l'exploitation de marbre en carrières souterraines par modélisation numérique. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées* : séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France.
32. MAADADI B. TALI O., *Creusement et soutènement des excavations souterraines. (Cas de mine de Boukhadra-Tébessa), mémoire licence, université Bejaia,2016*
33. Ch. Fairhurst *le bilan énergétique en mécanique des roches*, Comité Français de Mécanique des Roches, 1976.
34. *M. Dejean Stabilité et consolidation des exploitations souterraines abandonnées* Revue française de Géotechnique NUMERO 17,1981, France
35. IFSTTAR-Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux *Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées Guide méthodologique*. Septembre 2014.France
36. INERIS *Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique , France ,2016*
37. GENTIER S. PROJET ROCC. Stabilité Des Falaises Côtières :Les Mécanismes D'écroulements BRGM ,France 2002
38. CARTANNAZ C.MIDOT D.MATHON Ch Cartographie des aléas mouvements des terrains au droit de 11secteurs des cavités souterraines de Savonnière -en-Perthois (Meuse), BRGM ,France 2010
39. François SCHLOSSER *Ouvrages de soutènement Poussée et butée*, Techniques de l'Ingénieur (C 242), France,
40. Jean-Louis DURVILLE Gilles SÈVE, *Stabilité des pentes Glissements en terrain meuble*, Techniques de l'Ingénieur (C 254), France,
41. FAVRE J.L., BRUGNOT G., GRESILLON J.-M, JAPPIOT M. *Évaluation des risques naturels Une approche probabiliste ?* Techniques de l'Ingénieur (C 3 295), France,
42. Pierre GESTA *Travaux souterrains*, Techniques de l'Ingénieur (C3 295), France,
43. Evgueni Porokhovoï. *Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques*. Géologie appliquée. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1995.

44. Arnaud Charmoille, Amélie Lecomte Charles Kreziak *Dissolution naturelle du gypse dans le sous-sol Analyse et gestion des aléas mouvements de terrain de type affaissement et effondrement ?* INERIS , France
45. C. LAMBERT R. SALMON *Évaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière* , Rapport d'étude ,INERIS , France
46. M .P. HANESSE, T. RICHARD *Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique* Rapport d'étude ,INERIS , France
47. A. Cherkaoui M. Herbaux , Aléa versant rocheux sous-cavé -Caractérisation et évaluation, INERIS , France
48. G. SEVES P. POUGET *Stabilisation des glissements de terrain – guide technique*, laboratoire centrale des Ponts et Chaussées, France 1998
49. B.Boky *Exploitation des Mines* (Tr :A. Gorodiskl, B. De Trezvinsky Y. Vassilevsky) Editions Mir Moscou 1968
50. Nedellec JL,Cruche T M . *Typologie des éboulements rocheux et des modes de rupture associés*, Étude bibliographique, Applications aux remparts de l'île de La Réunion, BRGM, France .2003

Sites web :

1. <https://www.assemblee-nationale.fr>
2. (<https://www.linternaute.fr/dictionnaire/fr>)
3. <https://www.assemblee-nationale.fr>
4. <https://www.universalis.fr>
5. <https://www.gouvernement.fr/risques/mouvement-de-terrain>
6. <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/coulees-boue>
7. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/glisement/37141>
8. <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/>
9. <http://www.reseau-canope.fr/risquesetsavoirs/quand-les-sols-perdent-pieds-les-mouvements-de-terrain.html>
10. <https://paysgrandbrianconnais.fr/girn/les-risques-naturels-en-montagne/mouvements-de-terrain>
11. <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/eadaa/mecasol.htm>



ANNEXES

ANNEXE 01 : Formules Empiriques de Resistance de Piliers

Formule CMRI (Central Mining Research Institute)

CMRI a développé une formule pour la résistance des piliers en tenant en compte le ratio w/h du pilier, la résistance à la compression uni-axiale du pilier, la hauteur du filon et la profondeur de couverture :

$$S = (0.27 \times \sigma_c \times h^{-0.36}) + \left(\frac{H}{160} \left(\frac{w}{h} - 1 \right) \right)$$

Avec :

S : la résistance du pilier en MPa

σ_c : la résistance à la compression simple (RCS) ; en MPa

h : la hauteur de travail ou la hauteur du filon en m

H : la hauteur des terrains de couverture en mètres.

Nombreuses formules de résistance des piliers ont été proposées, mais cinq formules sont les plus utilisés. Chaque formule spécifie son propre facteur de sécurité. Nous avons :

Formule Obert-Duwall/Wang (1967)

Il a été dérivé des tests de laboratoire sur les roches dures et les considérations élastiques la même relation comme faite par Bunting en 1911.

$$\sigma_p = \sigma_1 \left(0.778 + 0.222 \frac{w}{h} \right)$$

Avec

σ_p : la résistance du pilier

Selon Obert et Duvall, cette équation est valide pour w/h partant de 0.25 à 4, en assumant les conditions de charges-gravité. A travers les calculs des cas des mines et l'utilisation des propriétés de roches de laboratoires, des facteurs de

sécurité de 2 à 4 étaient dérivés des courts et long termes de stabilités de piliers, respectivement. Essentiellement, ce facteur de sécurité compte pour les interprétations de roches de force au laboratoire (ou matériel roche) à la force in-situ pour les roches dures.

Formule Holland-Gaddy

$$\sigma_p = k \frac{\sqrt{w}}{h}$$

- σ_p : La résistance du pilier en psi
- k le facteur Gaddy
- w et h les dimensions du pilier en pouces

Holland spécifiait que le facteur de sécurité entre 1.8 et 2.2 pour la conception des piliers de charbon, avec une valeur recommandée de 2.0. Le ration w/h, pour lequel la formule Holland est valide, va de 2 à 8. Bien que populaire dans les années 1970, la formule Holland-Graddy n'est plus recommandée parce qu'elle a été trouvée être plus conservative aux ratios élevés (>5).

Formule Holland (1973)

$$\sigma_p = \sigma_1 \sqrt{\frac{w}{h}}$$

- σ_p : la résistance du pilier
- w et h les dimensions du pilier en pouces
- σ_1 : la résistance des piliers cubique (w/h =1). En effet, il peut être interprété comme a résistance à la taille critique pour les spécimens de charbon et doit être déterminé. Le facteur de sécurité recommandé est 2.0

Formule Salamon-Munro (1697)

Les constantes de l'équation ci-haut sont dérivées des sondages statistiques des données reflétant les expériences des mines actuelles. En dérivant une formule de résistance de

pilier, il était assumé que les piliers qui étaient encore intacts avaient des dimensions sécuritaires, pendant que ceux qui se sont écroulés étaient trop petits.

La formule suivante était proposée :

$$\sigma_p = 1.32 \times \frac{w^{0.46}}{h^{0.66}}$$

- σ_p La force en psi
- w et h en pieds

Le facteur de sécurité recommandé pour cette formule est 1.6, l'intervalle allant de 1.31 à 1.88.

En unités SI, l'équation devient :

$$\sigma_p = 7.2 \times \frac{w^{0.46}}{h^{0.66}}$$

- σ_p La force en Mpa
- w et h en mètres

Formule Bieniawski

Elle est basée sur les tests à grande échelle sur les piliers de charbon in situ. Ces tests effectués aux États-Unis par Greenwald et autres durant les années 1933-1941. Des tests extensifs étaient conduits en Afrique du Sud durant les années 1965-1973 par Bieniawski (1968,1969), Wagner (1974), et Bieniawski et Van Heerden (1975).

$$\sigma_p = 400 + 220 \frac{w}{h}$$

La formule originelle est :

$$\sigma_p = 400 + 220 \frac{w}{h}$$

- σ_p la force en psi

La formule normalisée est :

$$\sigma_p = \sigma_1 \left(0.64 + 0.36 \frac{w}{h} \right)$$

- σ_p la force du pilier en Mpa
- w et h en mètres
- σ_1 : la résistance d'un spécimen cubique de taille critique ou grande (3 pieds ou 1 m pour le charbon).

Bieniawski (1969) et Bieniawski and van Heerden (1975) ont confirmé cette relation par des tests in situ à grande échelle sur 66 tests de spécimen de charbon de ration largeur sur hauteur de 0.5 à 3.4.

La formule est particulièrement réaliste pour $w/h = 10$, d'après lesquelles elle donne des estimations conservatives. Bien que pour des ratios de w/h élevés, elle est la moins conservatrice comparée aux quatre autres formules.

Détermination de la charge de pilier

Des nombreuses approches sont disponibles pour estimer la charge aux piliers, ou plus correctement la moyenne de force au pilier. Les deux majeurs sont l'approche de l'aire tributaire et la théorie de déflexion élastique. L'approche simpliste pour déterminer la charge du pilier est l'aire tributaire.

$$S_p = \left[1.1H \frac{(w + B)(L + B)}{w \times L} \right]$$

Avec :

S_p : La charge du pilier ou la force moyenne du pilier en psi

H : est la profondeur en dessous de la surface en pied

W : la largeur du pilier en pied

L : la longueur du pilier en pied

B : la largeur de l'entrée en pied.

Le terme $1.1 H$ peut être remplacé par la pression vierge verticale S_v dérivé du poids de terrain de recouvrement au-dessus du filon gH , où g est l'unité de poids de recouvrement. La pression peut être considéré augmenter de 1.1 psi/ft de profondeur.

Pour des piliers carrés, $w=L$, l'équation devient :

$$S_p = 1.1H \left[\frac{(w + B)^2}{w^2} \right]$$

Pour les filons inclinés :

$$S_p = 1.1H \frac{(w + B)^2}{w^2} (\cos \theta + m \sin \theta)$$

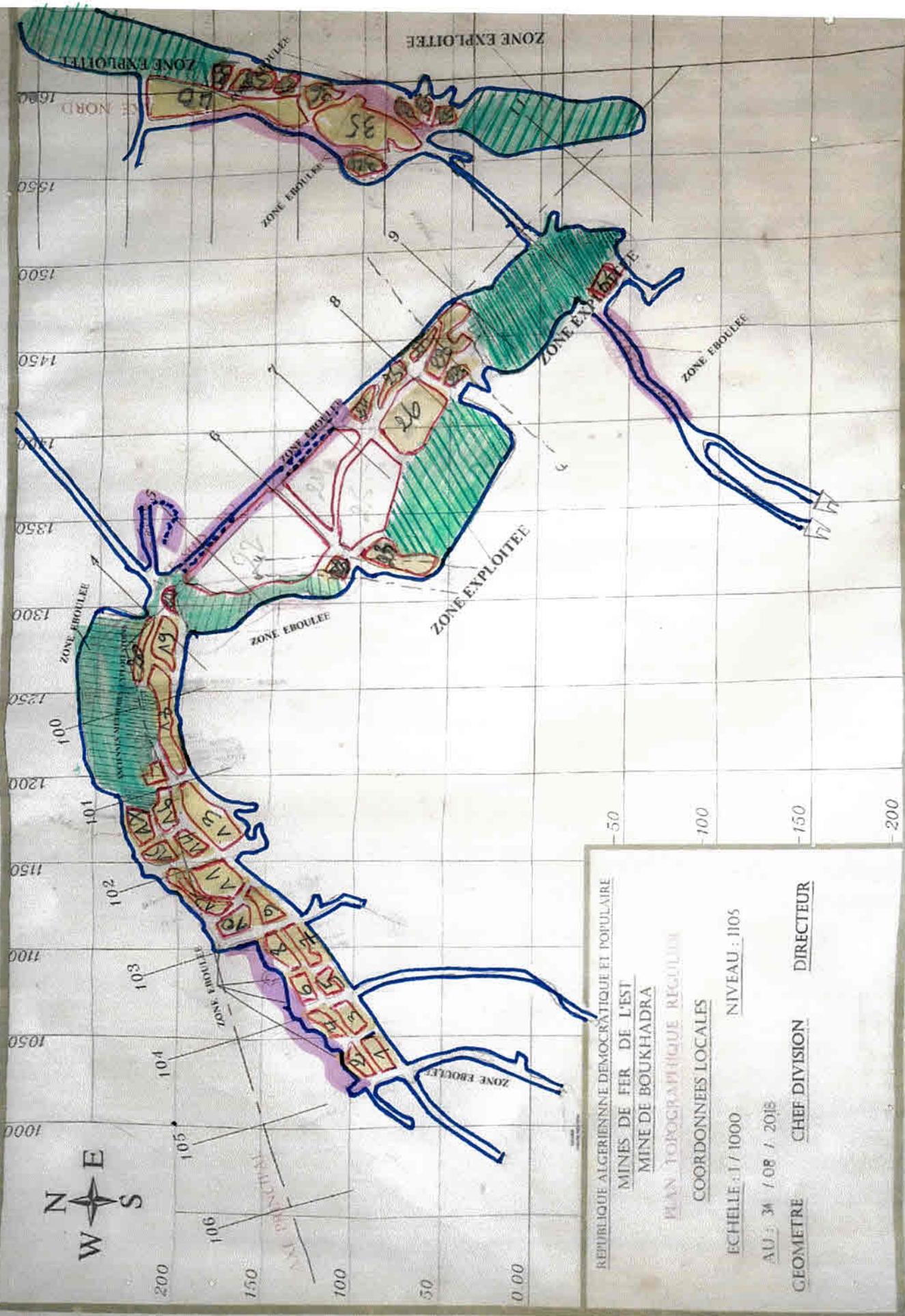
Où θ est l'angle d'inclinaison du filon, m la coefficient de Poisson

Si le terme extraction e est introduite (100^e est le pourcentage d'extraction), lequel est défini comme le ration de l'aire miné sur l'aire totale, donc pour l'extraction avec des piliers rectangulaires :

$$e = 1 - \left[\frac{w}{w + B} \right] \left[\frac{L}{L + B} \right]$$

Ce qui peut aussi conduire à écrire :

$$S_p = 1.1 \frac{H}{(1 - e)}$$



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
 MINES DE FER DE L'EST
 MINE DE BOUKHADRA
 PLAN TOPOGRAPHIQUE REGULAR
 COORDONNEES LOCALES
 ECHELLE: 1/1000 NIVEAU: 1105
 AU: 30 / 08 / 2015
 GEOMETRE: CHEF DIVISION DIRECTEUR

DOCUMENT 1

LA THEORIE DE L'AUTO-REMBLAYAGE PAR FOISSONNEMENT

En désignant par:

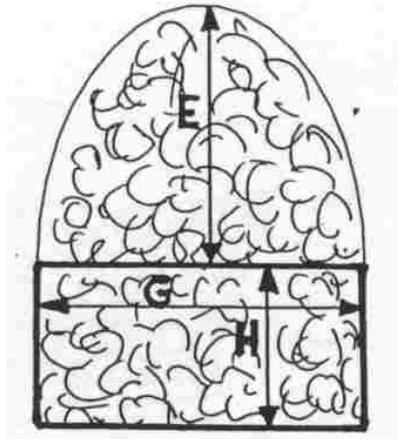
- V_v le volume des vides disponibles
- V_e le volume des terrains effondrables
- C_f coefficient de foisonnement des éboulis

il y aura remplissage complet des vides si:

$$V_v + V_e = C_f V_e$$

Le volume de la zone effondrée sera donc:

$$V_e = \frac{V_v}{C_f - 1}$$



Cette relation permet une évaluation de la hauteur maximale des terrains foisonnés.

Application 1. Effondrement du toit d'une galerie.

En supposant que la cloche d'effondrement prend une forme elliptique, on aura:

$$V_e = \frac{1}{4} G E$$

$$V_v = G H$$

d'où

$$E = \frac{4}{\pi(C_f - 1)} H$$

Pour $C_f = 1.6$, on obtient $E = 2.12 H$

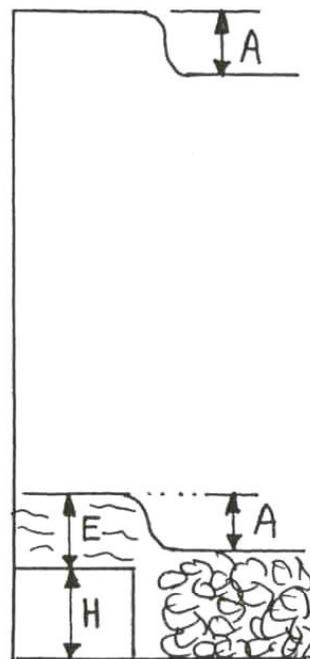
Application 2. Epaisseur des bancs foudroyés dans une longue taille.

En admettant que le foudroyage ne concerne qu'une épaisseur de bancs E et qu'au dessus les terrains descendent d'une valeur A sans foisonnement, on obtient :

$$E = \frac{H - A}{C_f - 1}$$

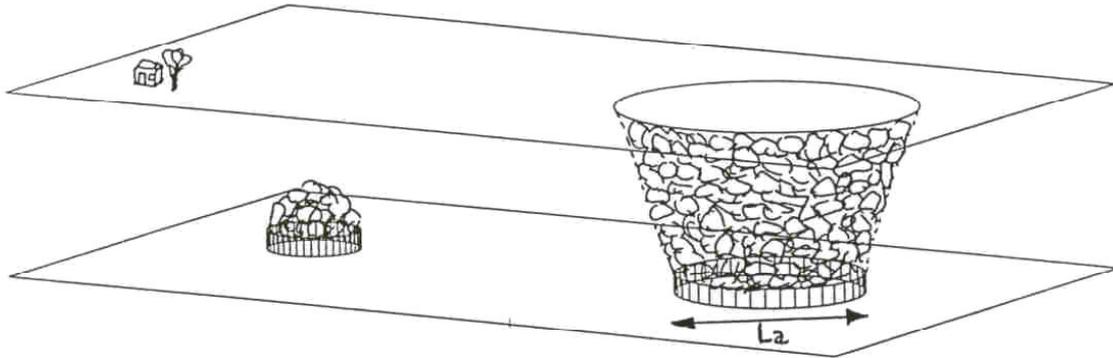
Pour $C_f = 1.2$ et $A = 0.95 H$, on obtient: $E = 0.25 H$

Cependant, dans cette application, il est difficile d'adopter un coefficient de foisonnement est dégressif depuis le premier banc du toit pour s'annuler à partir d'une certaine hauteur



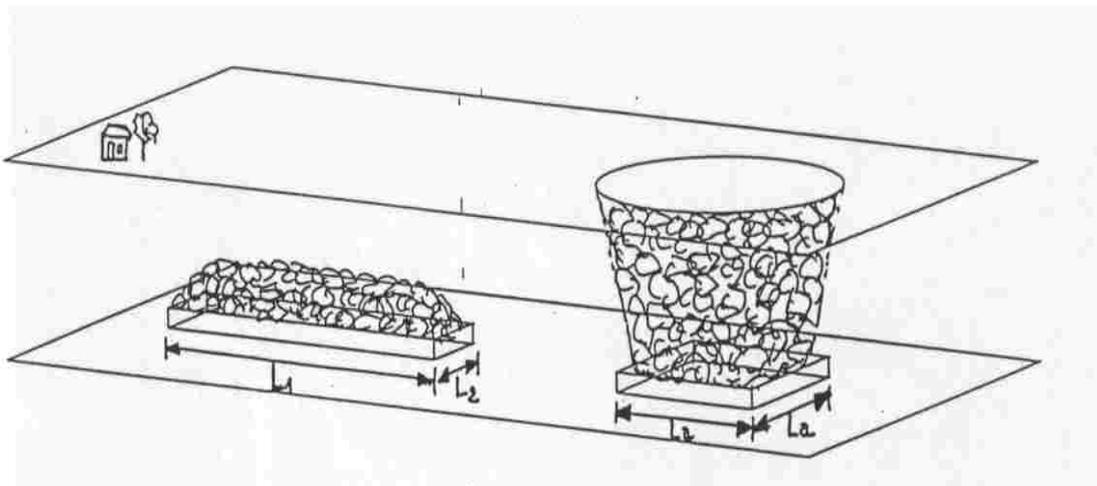
DOCUMENT 2

Largeur minimale d'affaissement



Exploitation d'un panneau circulaire

Il y a affaissement en surface lorsque le diamètre du panneau atteint une valeur L_a

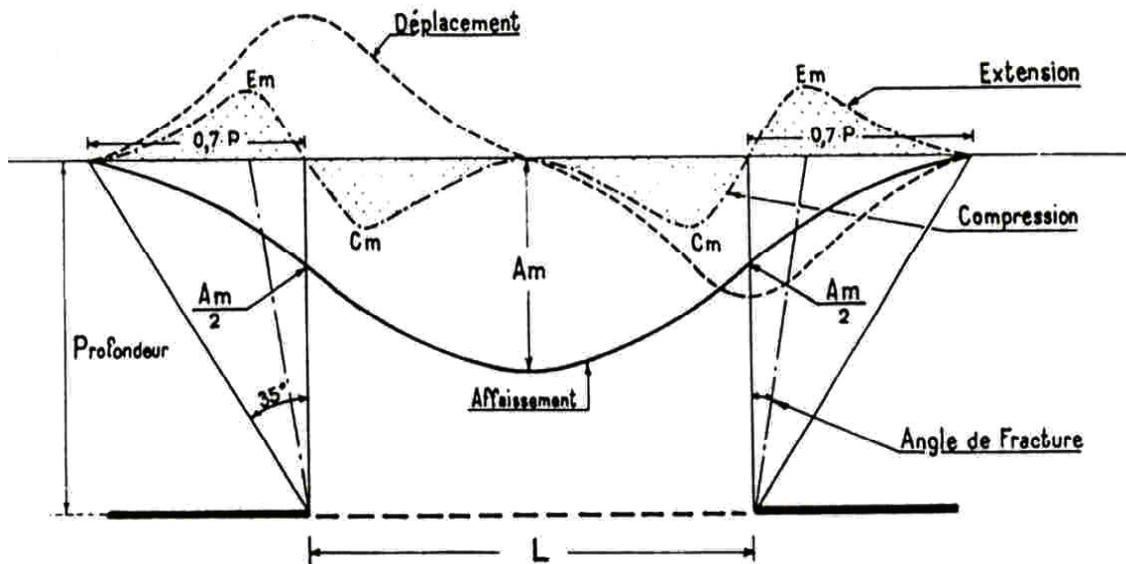


Exploitation d'un panneau rectangulaire

Il y a affaissement en surface si les deux dimensions du panneau atteignent ou dépassent une valeur L_a

DOCUMENT 4

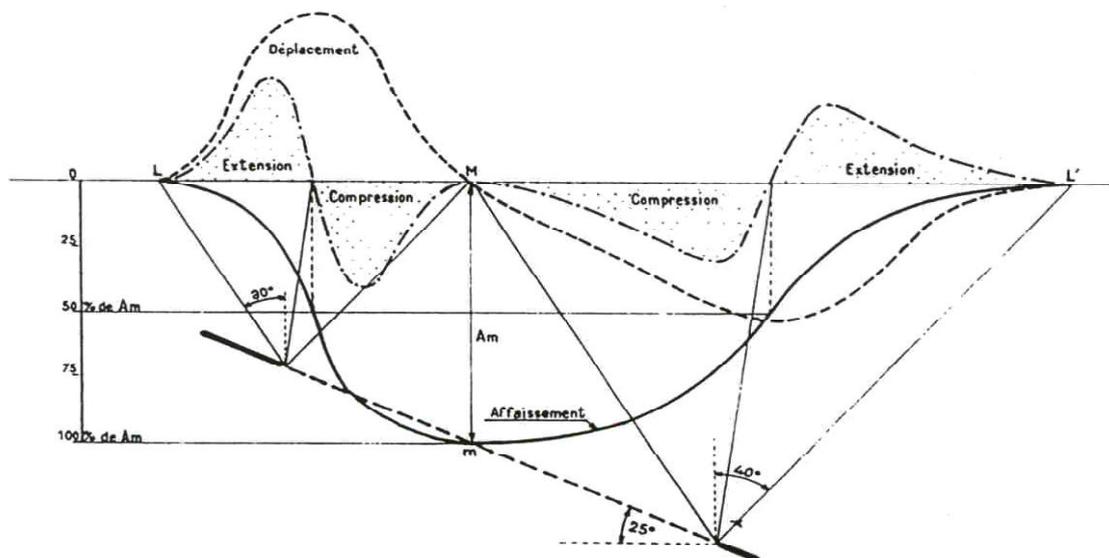
Paramètres caractéristiques d'un affaissement en cuvette



Affaissement consécutif à l'exploitation d'une couche horizontale
par la méthode des longues tailles foudroyées

Cette courbe est représentative des affaissements mesurés en aire critique dans les anciennes exploitations de charbon des HBNPC

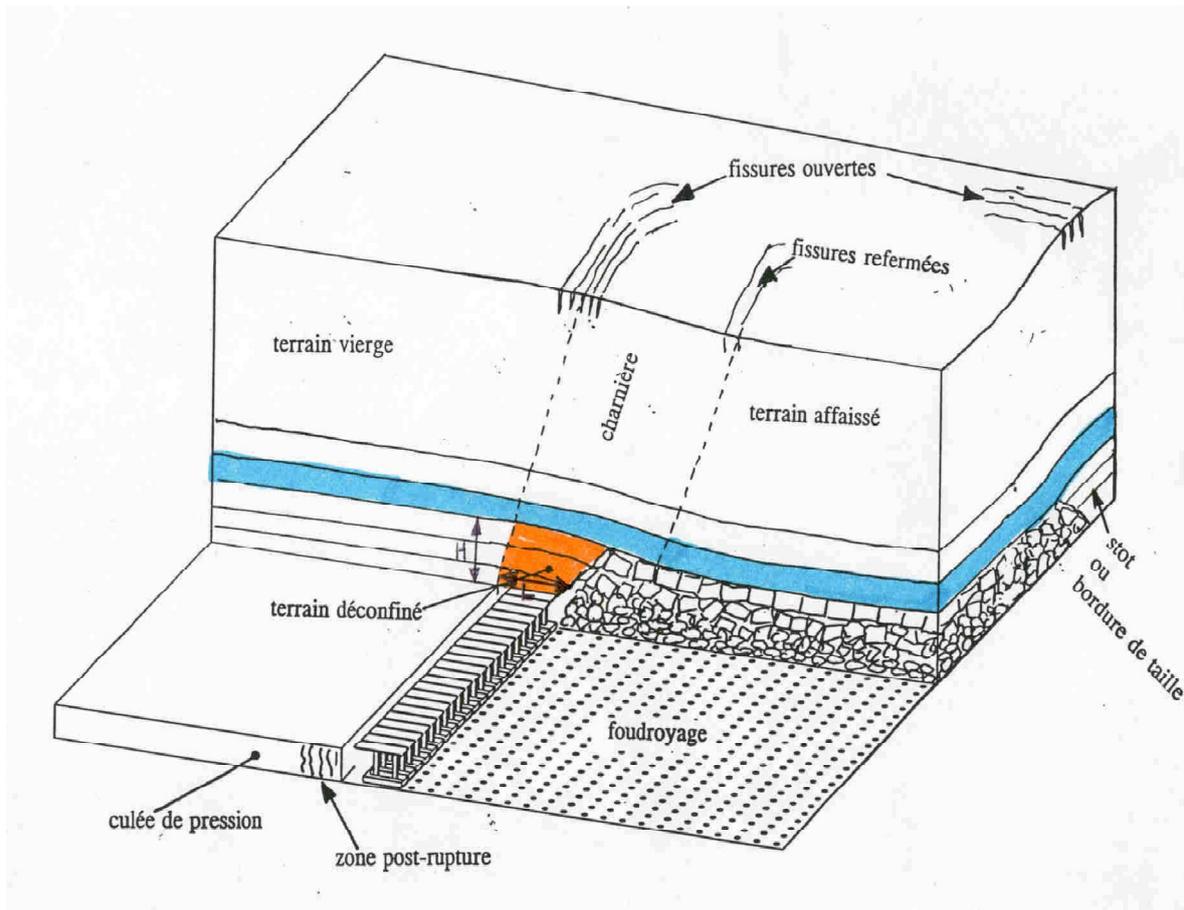
Am affaissement maximal
Em extension horizontale maximale
Cm compression horizontale maximale



Affaissement consécutif à l'exploitation d'une couche pentée
par la méthode des longues tailles foudroyées
L'angle d'influence amont est différent de l'angle d'influence aval

DOCUMENT 5

Exploitation par longue taille Mécanique de l'affaissement des terrains



L'analyse du comportement des terrains conduit à distinguer :

- les terrains vierges à l'avant du front de taille. Aucun affaissement notable ne peut être décelé sur ces terrains
- des terrains affaissés assez loin derrière le front de taille. Ces terrains s'appuient sur les terrains foudroyés
- entre ces deux catégories de terrains, on trouve :
 - une zone de terrain déconfiné, c'est à dire des terrains où les contraintes initiales sont libérées: la contrainte verticale est libérée par l'extraction du minerai, une des contraintes horizontales est libérée par le foudroyage. Dès que ces terrains ne sont plus maintenus en place par le soutènement, ils s'éboulent. Les premiers bancs du toit vont donner lieu à la formation de blocs dont la chute provoquera un foisonnement notable. Quant aux bancs supérieurs, ils donneront lieu à un foisonnement moindre, ils seront fracturés mais pourront rester plus ou moins en place. Le rôle du soutènement est de maintenir en place ces terrains déconfinés.
 - une zone charnière où les terrains subissent un mouvement de flexion, peuvent être fracturés, mais assureront une certaine continuité. En surface, sur cette zone charnière, on trouvera des fissures pouvant être des fissures ouvertes coté terrains vierges. Par contre, coté terrains affaissés, on observera plutôt une fermeture des fissures, voire des bourrelets.

Résumé :

La stabilité d'une mine repose essentiellement sur la capacité des piliers à soutenir le poids des terrains sus-jacents, La rupture des piliers peut entraîner un affaissement de la surface topographique. Ce qui entraîne en revanche, d'importantes pertes humaines, matérielles et financières

Après mis en évidence une recherche bibliographique relativement exhaustive qui a été consacré aux Mouvements des terrains (Description, classification, typologie) ayant des conséquences vertigineuses tant pour les personnes que pour les ouvrages miniers

Nous avons opté pour le concept de l'aire tributaire pour dimensionner les piliers, et nous avons appliqué les aspects théoriques de la méthode susmentionnée par l'application des paramètres numériques des conditions de la mine de Boukhadra.

الخلاصة

يعتمد استقرار المنجم في المقام الأول على قدرة الأعمدة على تحمل وزن طبقات الأرض التي تعلوها ، ويمكن أن يتسبب كسر الأعمدة في هبوط /تغيير السطح الطبوغرافي. هو ما قد يؤدي إلى خسائر بشرية ومادية ومالية كبيرة.

بعد تسليط الضوء على بحثه ببليوغرافي شامل نسبيًا تم تخصيصه للحركات الأرضية (الوصف ، التصنيف ، ...) التي لها عواقب مدهشة على كل من الأشخاص والأعمال و المكونات المنجمية التعدين

اخترنا مفهوم منطقة الرافد l'aire tributaire لحساب و تحجيم الأعمدة ، وطبقنا الجوانب النظرية للطريقة المذكورة أعلاه من خلال التطبيق العددي للظروف الخاصة بمنجم بوخضرة

Abstract:

The stability of a mine depends primarily on the ability of the pillars to support the weight of the overlying land. Breaking of the pillars can lead to subsidence of the topographic surface. However, this leads to significant human, material and financial losses

After highlighting a relatively exhaustive bibliographic research which was devoted to Land movements (Description, classification, typology) having dizzying consequences both for people and for mining works

We opted for the concept of the tributary area to dimension the pillars, and we applied the theoretical aspects of the above-mentioned method by applying the numerical parameters of the conditions of the Bukhara mine