

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière : Génie Minier

Option : Exploitation des Mines

Présenté par

LHEZIL Abderrezak

ZIANE Tarek

Thème

***Modélisation Du Creusement D'une
Excavation Par La Méthodes Des Eléments
Finis, Cas De La Mine de Chaâbet El Hamra
Ain-Azel W. SETIF***

Soutenu le 27/06/2018 à 13H devant le jury composé de :

Président	Mr. FREDJ. M	MAA	U.A.M.Bejaia
Promoteur	Mr. BOULKRAM. R	MAA	U.A.M.Bejaia
Examineur	Mr. DJEZAIRI. O	MAA	U.A.M.Bejaia

Promotion : 2017-2018

Remerciements

« En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, notre créateur de nous avoir donné la force et le courage pour accomplir ce travail »

Au terme de ce travail nous tenons à remercier en premier lieu Mr. BOULRAM. R, notre encadreur pour son aide précieuse, pour ses remarques pertinentes et surtout pour le temps qu'il nous a accordée malgré ses nombreuses charges.

Nous tenons à remercier également les membres du jury Mr. FREDJ. M comme président et Mr. DJEZAIRI. O comme examinateur pour l'honneur qu'ils nous ont fait d'avoir acceptés d'examiner notre travail.

Un grand merci pour toute l'équipe de la mine de Chaâbet El-Hamra, en particulierité Mr. Madani, Mr. Saber et Mme Meriem, pour leur accueil et encadrement durant la période de stage pratique.

Un grand merci pour tous les enseignants du département des mines et géologie, qui ont contribué à notre formation.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou loin à l'élaboration de ce mémoire

Abdou Ω Tarek

Dédicace

Je dédie ce travail à

- ❖ *Mes très chers parents ;*
- ❖ *Mes chers frères sœurs ;*
- ❖ *A toute ma famille ;*
- ❖ *A la famille Kaci et tous mes oncles et tantes ;*
- ❖ *A tous mes amis ;*
- ❖ *A Pirirou ;*
- ❖ *A Lotfi, Nassim, Lamine, Jugo, Djow,
Kouceila, Stinson, Slimane*

A mes chers parents

A ma famille

& tous ceux qui me connaissent

Abdou Lhezil 

Sommaire

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste d'abréviation	
Liste des symboles	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sue les massifs rocheux	
I.1. Introduction.....	2
I.2. Massif rocheux.....	2
I.2.1. Définition	2
I.2.2. Notions sur la mécanique des roches	2
I.2.3. Structure des massifs rocheux	3
I.3. Matrice rocheuse.....	3
I.3.1. Définition	3
I.3.2. Description pétrographique	4
I.3.3. Paramètres physico-mécaniques et hydrauliques utiles à l'identification des roches ...	5
I.3.4. Les discontinuités.....	12
I.3.4.1. Les discontinuités dans un massif rocheux.....	12
I.3.4.2. Les types de discontinuités	13
I.3.4.3. Les paramètres caractérisant les discontinuités	15
I.4. Conclusion	20
Chapitre II : Généralités sue l'exploitation souterraine	
II.1. Généralités sur la mine de Zinc de Chaâbet El-Hamra.....	21
II.1.1. Situation géographique	21
II.1.2. Historique de la mine de Chaâbet El-Hamra	21
II.1.3. Géologie régionale	22
II.1.4. Aspect géologique et Structural du gisement.....	22
II.1.5. Tectonique du gisement [30]	24
II.1.5.1. Tectonique cassante.....	24
II.1.5.2. Tectonique souple(Plis).....	24
II.1.6. L'exploitation de la mine de Chaâbet El-Hamra	24
II.1.6.1. Mode d'ouverture [30]	24
II.1.6.2. Choix de la méthode d'exploitation	25

II.1.6.3. Travaux d'infrastructure.....	25
II.1.6.3.1. Paramètres du creusement	26
II.1.6.3.2. Volume des travaux (2015) :	27
Chapitre III : Les systèmes de classification des massifs rocheux	
III.1. Introduction	28
III.2 Rock quality designation (RQD).....	28
III.2.1. Avantages	30
III.3. Rock mass rating (RMR).....	30
III.3.1. Avantages	33
III.4. Le Q-system	33
III.5. Geologic strength index (GSI)	37
III.6. Quelques Corrélation entre les différentes méthodes de classification.....	40
III.7. Conclusion.....	40
Chapitre IV : Aperçu sur la méthode des éléments finis	
IV.1. Introduction.....	41
IV.2. Méthodes des éléments finis (MEF)	41
IV.2.1. Application de la MEF aux ouvrages souterrains	41
IV.2.2. Conception de base : Techniques de résolution	41
IV.2.2.1. La discrétisation.....	42
IV.2.2.2. Eléments géométriques	42
IV.2.3. L'interpolation.....	43
IV.2.4. L'utilisation de la MEF	45
IV.2.5. Présentation du logiciel Plaxis	45
IV.2.6. Le code PLAXIS 8.6	50
IV.2.6.1. Les modèles de comportements utilisés dans Plaxis	50
IV.2.6.2. Calcul du coefficient de sécurité (Phi-c-réduction).....	51
IV.3. Conclusion	51
Chapitre V : Application des systèmes de classification sur la zone d'étude	
V.1. Introduction	54
V.3. Classification géomécaniques du massif de Chaâbet El-Hamra	54
V.3.1. Classification selon le RMR	57
V.3.2. Classification selon le Q-Barton	60
V.3.3. Classification selon le Geological Strength Index (GSI).....	61
V.4. Modélisation numérique de la zone d'étude avec Plaxis 8.6.....	62

V.4.1. Description de zone d'étude	62
V.4.2. Présentation de la procédure de simulation	62
V.4.2.1. Caractéristiques géométriques du massif	62
V.4.2.2. Géométrie de la section à étudier	64
V.4.3. Modélisation numérique	65
V.4.3.1. Conditions aux limites.....	65
V.4.3.2. Conditions initiales	66
V.4.3.3. Exécution de l'excavation des chambres	69
V.4.3.4. Les différentes phases du calcul.....	70
V.4.4. Calcul de la déformation (déplacements) dus à l'excavation des chambres	70
V.4.4.1. Calcul et comparaison des déplacements horizontaux entre les phases choisies	71
V.4.4.2. Calcul et comparaison des déplacements verticaux entre les phases choisies	73
V.4.4.3. Calcul et comparaison des déplacements totaux entre les phases choisies.....	75
V.4.5. Calculs des contraintes effectives (σ_{eff})	77
V.5. Conclusion.....	81
Conclusion générale	82
Références bibliographiques	
Résumé	
Abstract	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Exemple de massif rocheux.....	3
Figure I.2 : Photographie de lame mince au microscope Polarisant.	4
Figure I.3 : Dispositif d'un essai de compression uniaxiale.	9
Figure I.4 : Schéma de principe d'un essai de compression triaxial.....	10
Figure I.5 : Essai de traction directe.....	10
Figure I.6 : Essai de la Traction indirecte	11
Figure I.7 : Résistance de cisaillement.....	12
Figure I.8: Plan de stratification.....	13
Figure I.9: schistosité	14
Figure I.10: Une faille d'un massif rocheux	14
Figure I.11: Une diaclase	15
Figure I.12 : Quelques orientations des discontinuités dans les massifs rocheux.....	16
Figure I.13: Espacement entre deux joints apparents dans le massif de la mine de Chaebet El. Hamra « Ain Azel-Sétif ».....	17
Figure I.14: Fissure ouverte et remplie	18
Figure I.15 : Un exemple de nombre des familles des discontinuités dans un massif.....	19
Figure I.16: Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC)	20

Chapitre II

Figure II.1 : Situation géographique du gisement de Chaabet El Hamra.	21
Figure II.2 : Coupe schématique longitudinale de gisement (Profil 0-profil 29)	22
Figure II.3: Log stratigraphique de la zone minéralisée	23
Figure II.4 : Plan et coupe des travaux d'ouvertures de la mine de Chaâbet El Hamra.....	25

Chapitre III

Figure III.1 : schéma d'une carotte pour calcul de l'RQD.	29
---	----

Chapitre IV

Figure IV.1 : Destruction d'une structure en élément.....	42
Figure IV.2 : Fenêtre d'outil Plaxis	46
Figure IV.3 : Exemple de maillage	46
Figure IV.4 : Fenêtre de saisie des propriétés de matériaux	47
Figure IV.5 : Fenêtre de calcul	48

Figure IV.6: Fenêtre output.....	49
Figure IV.7 : Exemple d'une présentation graphique des résultats contrainte-déplacement..	49
Figure IV.8 : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire	50
Figure IV.9 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb.....	51
Figure IV.10 : Définition des modules E_0 et de E_{50}	51
Figure IV.11 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb	53

Chapitre V

Figure V.1 : Front de taille-Recoupe II- Profil 13, bloc B5-3.....	55
Figure V.2 : Front de taille-Galerie- Profil 13, bloc B5-3.....	56
Figure V.3: Quelques descriptions des discontinuités	57
Figure V.4: Coupe longitudinale au niveau de profil 13.....	62
Figure V.5: La coupe transversale du massif	63
Figure V.6: Modèle géométrique.	64
Figure V.7: Génération des conditions aux limites.	65
Figure V.8: Génération du maillage en 2D	66
Figure V.9: conditions hydrauliques	67
Figure V.10: le champ des contraintes effectives	68
Figure V.11: Le coefficient de pression du terre K_0	68
Figure V.12: Phases des calculs	70

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification pétrographique simplifiée	5
Tableau I.2 : Classes de la roche selon la résistance en compression uniaxiale.....	9
Tableau I.3 : Conditions de creusement pour quelques orientations	16
Tableau I.4 : Description des espacements selon leur mesure.....	17
Tableau I.5 : Classification des discontinuités selon leur extension	18

Chapitre II

Tableau II.1 : Planning des travaux d'infrastructures pour (2015)	26
Tableau II.2 : Volume des travaux préparatoires (2015).....	27
Tableau II.3 : Volume des travaux par profil	27

Chapitre III

Tableau III.1 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.....	30
Tableau III.2 : Paramètres de classification des roches et notes de pondération	32
Tableau III.3 : Qualité de la masse rocheuse	33
Tableau III.4 : Paramètres de la classification du système Q.....	34
Tableau III.5 : Évaluation de la qualité du massif selon la note Q	37
Tableau III.6 : Estimation de GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse.....	39
Tableau III.7 : Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI	39

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Eléments géométriques utilisé dans le maillage.....	43
---	----

Chapitre V

Tableau V.1 : Mesures de la Recoupe II - Profil 13, bloc B5-3.....	54
Tableau V.2 : Galerie - profil 13 - bloc B5-3.....	55
Tableau V.3.1 : Classification selon RMR	58
Tableau V.3.2 : Classification selon RMR	59
Tableau V.4.1 : Classification selon Q-system.....	60
Tableau V.4.2 : Classification selon Q-system.....	60
Tableau V.5.1 : Classification selon GSI	61
Tableau V.5.2 : Classification selon GSI	61
Tableau V.6 : Paramètres géotechniques du sol	63
Tableau V.7 : Géométrie de la section à étudier.....	64
Tableau V.8 : Résultats des déplacements et contraintes dus à l'excavation des chambres...	80

Abréviations

ISO : Organisation Internationale de Normalisation.

NF : Norme Française.

JRC : Coefficient de rugosité du joint.

RQD : Rock Quality Designation.

RMR : Rock Mass Rating.

ISRM: International Society of Rock Mechanics

AFTES : Association Française des Tunnel et de l'Espace Souterrain.

Jn: Joint number.

Jr: Joint roughness.

Ja: Joint alteration.

Jw: Joint water.

SRF: Stress Reduction Factor.

GSI: Geological Strength Index.

VER : Volume Elémentaire Représentatif.

MEF : Méthode des Eléments Finis.

MMC : Mécanique des Milieux Continus.

ENOF : L'Entreprise Nationale de produits non Ferreux.

Symboles

Symboles	Désignation	Unité
R_c	La résistance en compression uniaxiale	[N/m ²]
R_t	La résistance à la compression triaxiale	[N/m ²]
σ_t	La résistance à la traction indirecte	[N/m ²]
τ	La résistance au cisaillement	[MPa]
ρ	La masse volumique	[Kg/m ³], [t/m ³]
γ	Le poids volumique	[Kg/m ³]
V_v	Le volume des vides	[l], [m ³]
M_w	La masse d'eau	[Kg]
M_s	La masse de solide	[Kg]
M_t	La masse totale	[Kg]
K	Coefficient de perméabilité	[m/s]
Q	Le débit volumique	[M ³ /s]
S	La surface/section	[m ²]
i	Gradient hydraulique	/
V_p	La vitesse d'onde	[m/s]
We	La teneur en eau	[%]
n	La porosité	[%]
S_r	Le degré de saturation	[%]
E	Le module de Young	[MPa]
C	Cohésion	[MPa]
λ	Fréquence des joints	[m ⁻¹]
S_j	Espacement des joints	[m]
φ	Angle de frottement interne	[°]
ν	Coefficient de poisson	/
j_n	Nombre des familles des discontinuités	/
j_r	Paramètre de rugosité des joints	/
j_a	Degré d'altération des joints	/
j_w	Paramètre de réduction hydraulique	/
U_x	Déplacements horizontaux	[m]
U_y	Déplacements verticaux	[m]
U_{tot}	Déplacements totaux	[m]
dU_x	Incréments horizontaux	[m]
dU_y	Incréments verticaux	[m]
dU_{tot}	Incréments totaux	[m]
σ_{eff}	Contrainte effective	[m]
σ_{tot}	Contrainte totale	[m]

Introduction Générale

Introduction générale

La sécurité est un facteur primordial à prendre en considération lors de la réalisation de tout type d'ouvrage souterrains, afin d'assurer la sécurité des travaux lors et/ou après la réalisation d'une excavation ou ouvrage souterrain (tunnel, galerie etc.) les ingénieurs font recours à certaines études qui déterminent la stabilité d'un massif rocheux.

Depuis des dizaines d'années, des études ont abouti à la création et l'amélioration de certaines méthodes ou techniques de détermination des différents comportements d'une masse rocheuse bien avant d'entamer les travaux d'excavation, parmi ces méthodes, la classification géomécanique est jugée être la plus fiable, elle comporte plusieurs systèmes de classification et de caractérisation d'un massif rocheux.

Selon les estimations faites à base de description géologique, Le massif dolomitique contenant la minéralisation zincifère de Chaabet-El Hamra est considéré comme étant stable, cependant ces estimations ne sont pas satisfaisantes, et ne permettent pas d'entamer les travaux d'excavation, ni garantir la stabilité du terrain lors ou après l'exécution des travaux.

Afin de bien cerner cette problématique, qui consiste à classifier et caractériser ce massif dans le but de déterminer sa stabilité, notre mémoire de fin d'étude se compose de **5** chapitres ;

Le premier chapitre intitulé « les massifs rocheux », présente les différentes notions et concepts des massifs rocheux, leur structure, la nature des roches qui les composent et les différents types de discontinuités et leur influence sur leur stabilité ;

Le deuxième chapitre comprend des généralités sur la mine de zinc de Chaâbet El-Hamra notre cas d'étude ;

Dans le troisième chapitre intitulé « méthodes de classification des massifs rocheux », une présentation est donnée sur les différents systèmes de classification, leurs explications et formules de calcul ;

Le quatrième chapitre présente des notions générales sur la méthode des éléments finis ainsi qu'un aperçu sur l'application de modélisation (Plaxis 8.6).

Le cinquième chapitre présente une application de la méthode des éléments finis, grâce au logiciel « Plaxis 8.6 », afin de valider les résultats obtenus par l'application des systèmes de classification et d'arriver à une conclusion finale par rapport à notre problématique.

Chapitre I
Généralités Sur Les
Massifs Rocheux

I.1. Introduction

Le matériau qui compose la roche intacte est naturel et a été soumis dans la plupart des cas à des millions d'années d'action mécanique, thermique et chimique. Au cours de ces processus, les discontinuités ont été introduites dans la roche par des événements géologiques, à différents moments et en raison de différents états de contrainte. Très souvent, le processus par lequel une discontinuité a été formée peut avoir des implications sur ses propriétés géométriques et mécaniques, et il est donc toujours important de comprendre la formation des discontinuités en utilisant les principes de la géologie structurale.

La compréhension du comportement des discontinuités dans un massif rocheux est la première étape majeure pour un ingénieur, avant d'entamer la construction d'un ouvrage souterrain, afin d'éviter toutes sortes de risques possibles lors de l'exécution des travaux.

Dans ce chapitre nous allons essayer de présenter brièvement des notions sur les structures et les comportements mécaniques des massifs rocheux comme introduction à ce travail.

I.2. Massif rocheux

I.2.1. Définition

Un massif rocheux est un objet géologique et mécanique très complexe et diversifié, ce qui le définit comme étant un milieu hétérogène, anisotrope, discontinu et de faible porosité, si bien que pour le caractériser, il faut déterminer les paramètres de ses différents composants. [1]

I.2.2. Notions sur la mécanique des roches

Comme pour toutes les sciences dites de l'ingénieur, ce sont les applications qui justifient l'individualisation de la mécanique des roches après de longues périodes d'usages qui n'étaient pas seulement empiriques. Les sciences physiques, dont la mécanique, ont toutes commencé de cette façon. Plutôt qu'une science, la mécanique des roches est un art, au sens fort de l'art de construire, comme la résistance des matériaux et la mécanique des sols, qui l'ont précédée et gardée avec elle une étroite parenté ; c'est un ensemble de connaissances utiles pour un certain champ d'applications et validées par les sciences qu'elles impliquent (ce champ d'application étant susceptible de s'étendre avec les besoins de la société). On appellera donc ici mécanique des roches ; la mécanique appliquée aux roches. [2]

La mécanique des roches concerne des milieux continus, tant solides que fluides, mais aussi et surtout divers types de milieux discontinus et de milieux associant solides et fluides ; si elle tend à privilégier les concepts de déformation et de contrainte, elle fait appel à presque tous les chapitres des sciences mécaniques et elle fournit les outils indispensables aux simulations modernes.

I.2.3. Structure des massifs rocheux

La roche a une structure discontinue, elle est composée d'éléments continus plus ou moins homogènes, de forme géométrique quelconque, qui contient des discontinuités. En mécanique des roches, le terme discontinuité désigne toute interruption des propriétés mécanique ou physique dans la matrice rocheuse, Il s'agit souvent d'une dégradation des propriétés mécaniques sur des zones de très faible épaisseur. L'étude d'un massif rocheux fracturé nécessite donc une caractérisation de la matrice rocheuse, ainsi que celle des discontinuités. [2]

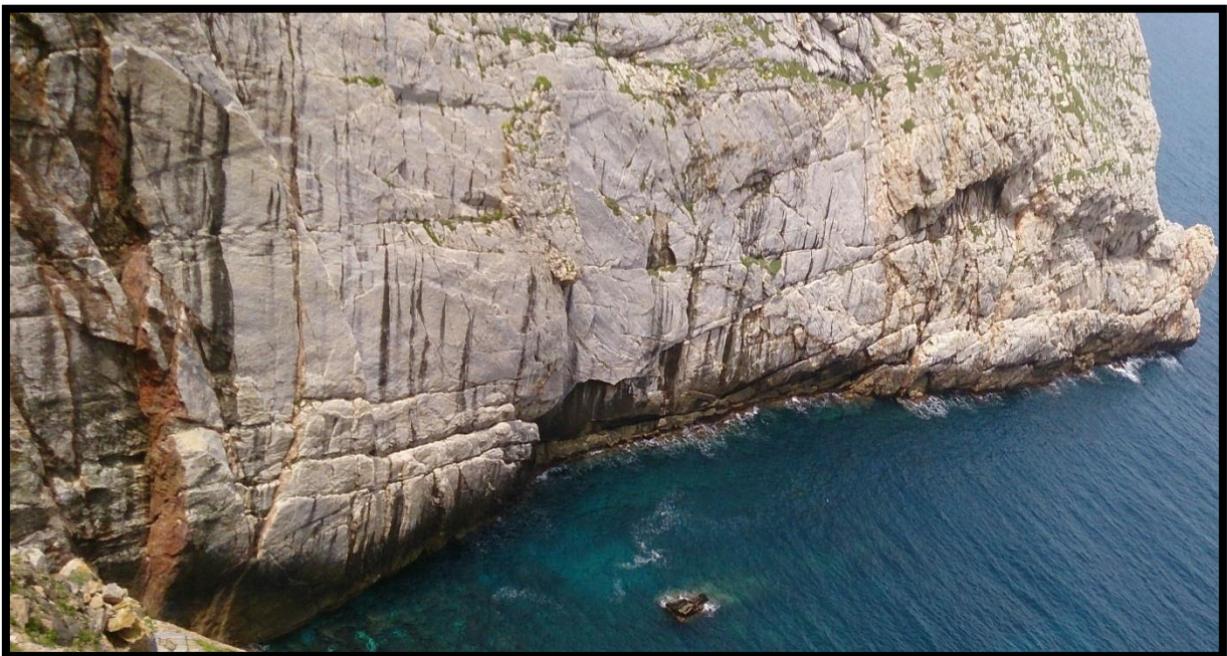


Figure I.1: Exemple de massif rocheux [Photo prise en 2016 Seraidi-Annaba]

I.3. Matrice rocheuse

I.3.1. Définition

La matrice rocheuse est définie comme un volume de roche intacte qui possède des propriétés homogènes et non coupé par des discontinuités discrètes et isolées, elle fait aussi référence aux blocs non-fracturés situés entre les discontinuités structurales. En fonction des caractéristiques du massif rocheux et de son histoire géologique, la taille de ces blocs peut varier

de quelques millimètres à plusieurs mètres. Les géologues distinguent trois grandes catégories de roches en fonction de leur origine : [3]

- Les roches magmatiques (ou éruptives) résultantes du refroidissement de magmas en fusion.
- Les roches sédimentaires se sont déposées dans les mers ou (Résultant de la désagrégation des roches par l'érosion, ou biogènes) les lacs et sont formées par l'accumulation de particules détritiques (formées grâce à l'activité d'organismes).
- Les roches métamorphiques sont le produit de la transformation à l'état solide d'une roche préexistante, avec modifications structurales et en général apparition de nouveaux minéraux, sous l'influence de la pression et de la température. La très grande variété des espèces minéralogiques et des roches sa conduit les géologues à diverses classifications, faisant appel à de nombreux termes pétrographiques. [4]

I.3.2. Description pétrographique

La description pétrographique consiste à déterminer la nature des différents minéraux, leur abondance relative, degré d'altération, la taille et l'agencement, ainsi les pores. La figure I.2 présente un exemple d'une lame mince de roche observée en microscope polarisant, ou on peut distinguer les différents minéraux qui compose une roche. [4]

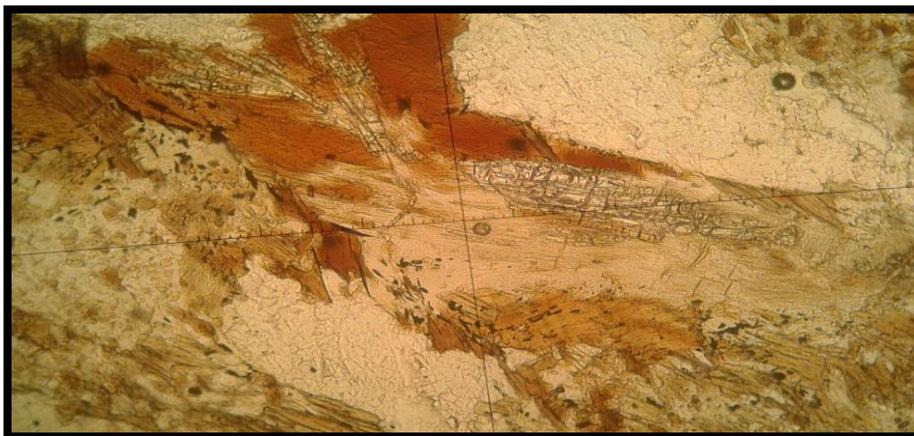


Figure I.2 : Photographie de lame mince au microscope Polarisant.

Tableau I.1: Classification pétrographique simplifiée. [4]

Famille		Teinte	Minéraux constitutifs	Principaux termes	Autres termes
Roches magmatiques	Volcaniques	Claire Sombre	Quartz Feldspaths Amphiboles Pyroxène Olivine	Trachyte, Rhyolite Andésite Basalte	Dolérite
	Plutoniques	Claire Sombre	Quartz Feldspaths Amphiboles Pyroxène	Granite Diorite Gabbro	Microgranite Microdiorite Monzonite Péridotite
Roches Métamorphiques	Foliées	Claire Sombre	Quartz Micas Amphibole	Gneiss, Micaschiste Amphibolite	Leptynite
	Non foliées			Marbre, Cornéenne	
Roches sédimentaires	Détritiques	Sombre Claire	Argile Quartz Calcite	Pélites Marnes Grès	Argilites
	Biogènes et /ou Chimiques		Carbonate Sulfate etc...	Calcaires, Craie, Dolomies, Gypse	Meulière, Charbon

I.3.3. Paramètres physico-mécaniques et hydrauliques utiles à l'identification des roches

Les massifs rocheux sont des milieux complexes qui peuvent être caractérisés par leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques.

Suite à des processus complexes qui rassemblent les minéraux, les roches possèdent des propriétés physiques liées à la structure et à la nature des matériaux qui les constituent. La disposition et la nature de ces matériaux affectent le comportement mécanique de la roche.

L'identification des propriétés physico-mécaniques des matrices rocheuses et des massifs rocheux, se fait conformément à des normes telles que l'ISO (Organisation Internationale de Normalisation) et la NF (Norme Française). [5]

a) La porosité [31]

La porosité représente plus généralement la présence de vides globuleux (pores) dans le matériau. Elle ne dépend pas essentiellement de la taille des grains mais surtout de leur agencement.

Elle est déterminée en faisant le rapport du volume de vide (V_v) sur le volume total (V_t) de l'échantillon.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \quad [\%] \quad (\text{I.1})$$

La porosité varie de quelque % à plus de 40 % dans les roches sédimentaires, elle est plus faible dans les roches magmatiques, souvent inférieure à 1 %. [6].

Les essais géotechniques au laboratoire militaire de Canada ont porté une classification des roches selon leur porosité comme suit :

- Roches de faible porosité : $0 < n < 5 \%$.
- Roches de porosité moyenne : $5 < n < 10 \%$.
- Roches de porosité élevée : $10 < n < 20 \%$.
- Roches de grande porosité : $n > 20 \%$.

b) La masse volumique [31]

C'est la masse du matériau par unité de volume, y compris les vides éventuels. La masse volumique est de l'ordre de 2200 à 2600 kg/m³ pour la majorité des terrains de recouvrement des exploitations minières souterraines (Fine J, 1998) ; pour la plupart des minéraux constituant le sol, elle est de l'ordre de 2500 à 2700 Kg/m³ [7].

c) La densité [31]

C'est le rapport de la masse volumique à la masse d'un égal volume d'eau. C'est un nombre sans dimension [8]. Elle est obtenue en faisant le rapport de la masse volumique d'un élément

sur la masse volumique de l'élément de référence. Pour les solides et les liquides, l'eau est prise pour référence ($\rho_e = 1 \text{ g/cm}^3$), et pour les gaz, l'air sera la référence ($\rho_a = 1.2 \text{ Kg/m}^3$).

d) La teneur en eau [31]

Elle représente la quantité d'eau contenue dans un échantillon et se calcule en faisant le rapport de la masse d'eau (M_w) à la masse du solide sec (M_s) :

$$We = \frac{M_w}{M_s} \times 100 = \frac{M_t - M_s}{M_s} \times 100 \quad [\%] \quad (I.2)$$

Où :

- M_w : La masse d'eau en [g] ;
- M_t : La masse totale de l'échantillon en [g] ;
- M_s : La masse sèche des grains solides en [g].

e) La perméabilité [31]

On la caractérise par le coefficient de perméabilité (K) "filtration". Elle représente donc l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un liquide (l'eau).

La perméabilité de la matrice est fortement influencée par la microfissuration et par voie de conséquence, elle varie avec l'état de contrainte [9].

Cette perméabilité peut être déterminée à partir de la loi de Darcy qui, fait intervenir le débit (Q) traversant une surface (S) d'un matériau (échantillon) et le gradient hydraulique noté (i) :

$$K = \frac{Q}{S \cdot i} \quad [\text{m/s}] \quad (I.3)$$

La plupart des roches ont des perméabilités très faibles. La perméabilité de la roche est régie par la porosité. La perméabilité un paramètre très important dans l'étude des roches poreuses. Dans le massif rocheux, l'écoulement se concentre dans les fissures [10].

f) Le degré de saturation (S_r), [31]

C'est le rapport du volume de l'eau contenue dans l'échantillon au volume des vides. [11]

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad [\%] \quad (I.4)$$

Tel que :

- V_w : Le volume de l'eau dans l'échantillon en [cm³].
- V_v : Le volume des vides en [cm³].

j) La vitesse d'onde [31]

L'état de compacité d'une roche peut être déterminé à partir des vitesses de propagation des ondes en son sein. Une roche bien compactée a généralement une vitesse élevée pour autant que les grains soient bien en contact et que les ondes puissent passer à travers les grains solides. [10]

L'une des caractéristiques intéressantes liée à ces vitesses d'ondes pour une roche est l'indice de continuité noté (IC), qui est déterminé en faisant le rapport entre la vitesse (V_p) des ondes obtenues au laboratoire et la vitesse (V_p^*) obtenue à partir de la composition minéralogique.

h) La résistance à la compression uniaxiale (R_c), [31]

Selon la norme (NF P 94-077) elle est déterminée lors des essais de compression simple. Dans cet essai, l'échantillon est pris sous la forme d'un parallélépipède (éprouvette cubique), d'élanement L/A (L : hauteur, A : arrête minimale) compris entre 2 à 2,5 avec deux faces planes, lisses et parallèles obtenues par une rectification soignée.

L'échantillon est ensuite placé entre les plateaux d'une presse et la force axiale est augmentée jusqu'à la rupture de l'éprouvette. On appelle résistance à la compression (notée R_c) la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression. La valeur maximale F de la force permet de calculer la résistance en compression uniaxiale (R_c) de la roche :

$$R_c = \frac{F}{S} \text{ [N/m}^2\text{]} \quad (I.5)$$

Tel que :

- F : Effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture) ;
- S : La surface de la section de l'éprouvette sur laquelle on applique l'effort F .

Tableau I.2 : Classes de la roche selon la résistance en compression uniaxiale. [31]

Classe	R_c (MPa)	Description
R ₁	>200	Résistance très élevée
R ₂	60 à 200	Résistance élevée
R ₃	20 à 60	Résistance moyenne
R ₄	6 à 20	Résistance Faible
R ₅	<6	Résistance très faible

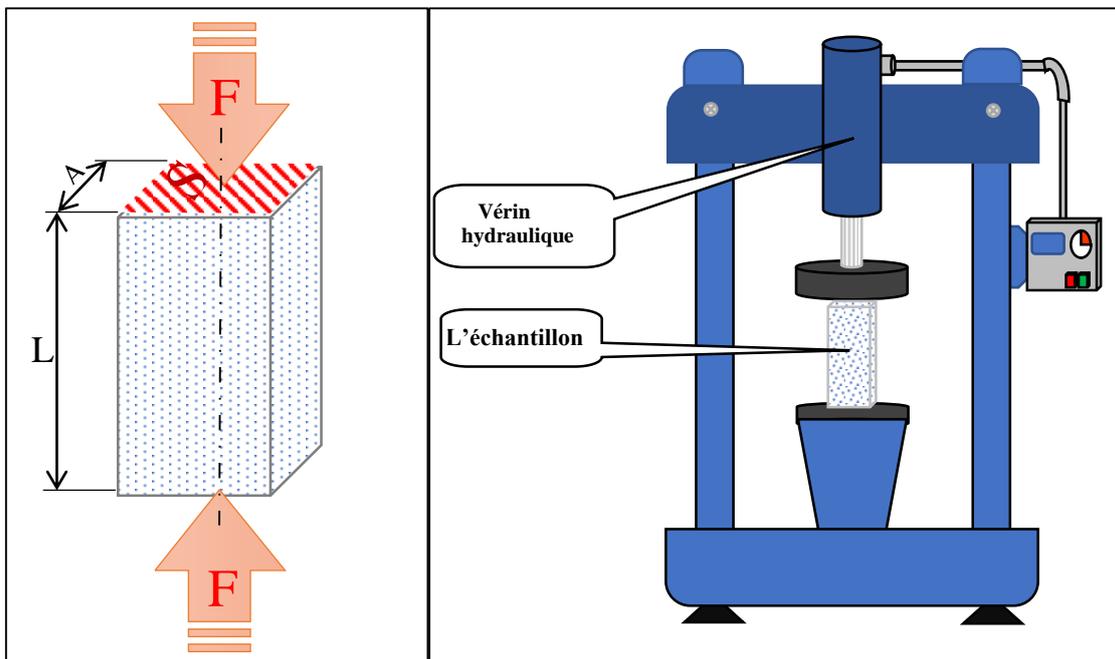


Figure I.3 : Dispositif d'un essai de compression uniaxiale.

i) La résistance à la compression triaxiale (R_t), [31]

Selon la norme (NF P 94-074) l'essai de compression triaxial est destiné à mesurer la résistance d'échantillon cylindrique de roche soumis à un état de compression triaxial, il permet d'obtenir les valeurs nécessaires à la détermination de l'enveloppe de rupture ainsi que les valeurs d'angle de frottement interne et de cohésion apparente.

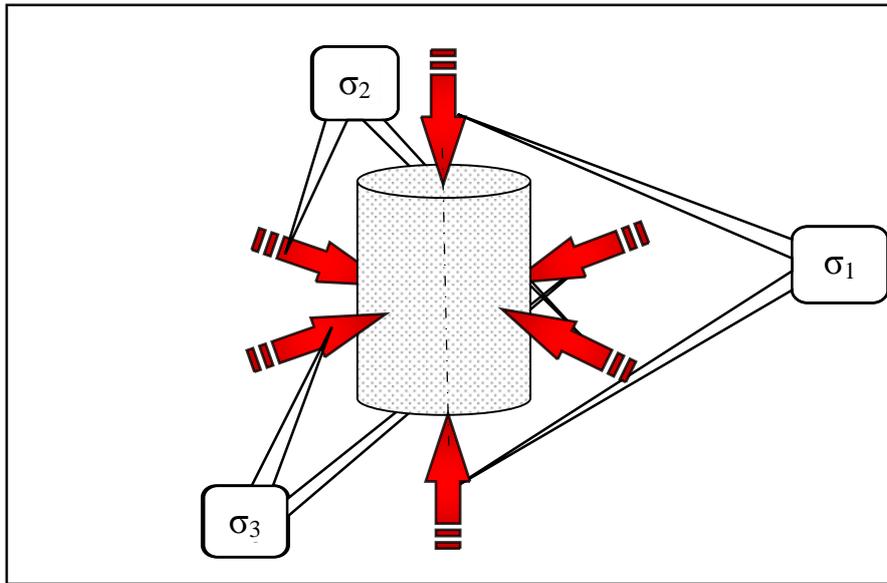


Figure I.4 : Schéma de principe d'un essai de compression triaxial. [12]

J) La résistance à la traction (σ_t), [31]

- **Traction directe** : En soumettant une éprouvette cylindrique à une traction uniaxiale, la résistance à la traction simple est égale à la contrainte limite de traction qui produit la décohérence des échantillons des roches massives.

$$\sigma_t = \frac{P_{max}}{A_0} \quad [N/m^2] \quad (I.6)$$

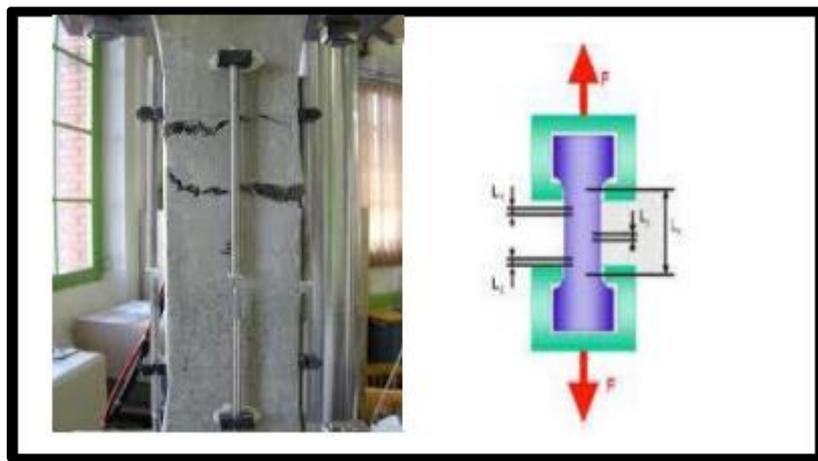


Figure I.5 : Essai de traction directe. [11]

Tel que :

- P_{max} : valeur finale atteinte par l'effort appliqué
- A_0 : surface transversale.

- **Traction indirecte :** L'essai de résistance à la traction indirecte, dit aussi essai brésilien, est réalisé en comprimant entre les plateaux de la presse une éprouvette cylindrique le long de deux génératrices opposées. La rupture est obtenue par traction au centre de l'éprouvette. On évite ainsi les difficultés de collage des têtes nécessaires dans les essais de traction directe. Si F est l'effort fourni par la presse au moment de la rupture, (D) le diamètre de l'éprouvette et (L) sa hauteur, la résistance à la traction indirecte est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_t = \frac{2F_{max}}{\pi DL} \quad [\text{N/m}^2] \quad (\text{I.7})$$

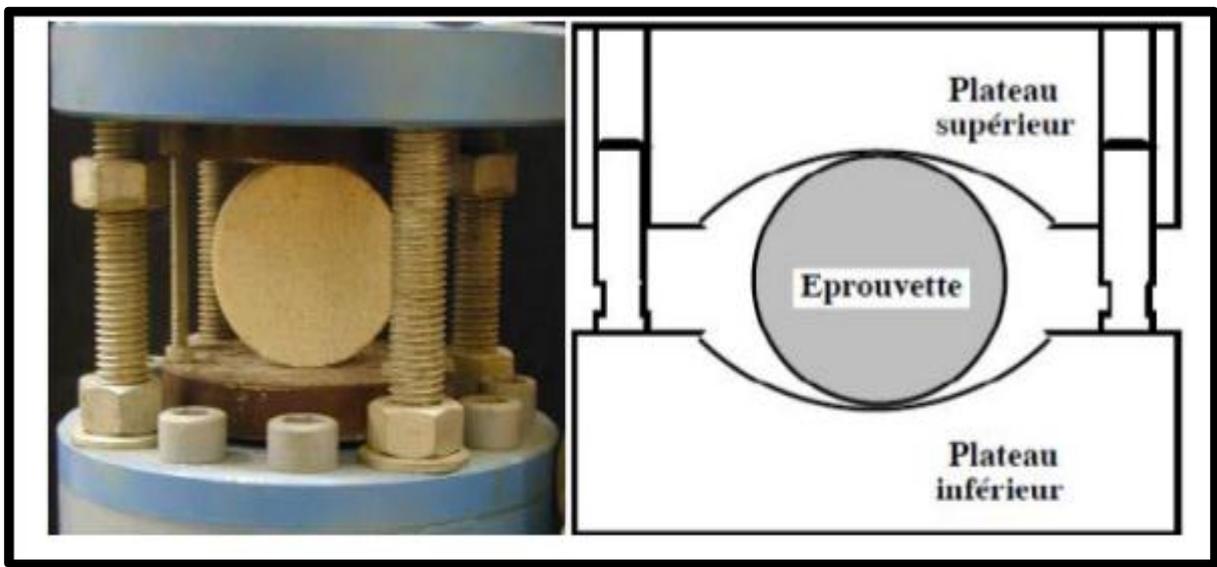


Figure I.6 : Essai de la Traction indirecte. [4]

k) La résistance au cisaillement (τ), [31]

Elle consiste à provoquer la rupture d'une éprouvette suivant un plan déterminé, l'éprouvette est soumise à la fois à un effort normal (N) constant tout au long de l'essai, et à un autre tangentiel T qui croît jusqu'à la rupture.

On peut déduire les paramètres de résistance au cisaillement, angle de frottement φ et cohésion (C).

Cet essai s'exprime par la formule :

$$\tau = c + \sigma_t g \varphi \quad [\text{MPa}] \quad (\text{I.8})$$

Tel que :

- τ : contrainte de cisaillement ;
- c : cohésion ;
- σ : contrainte normale ;
- φ : angle de frottement interne.

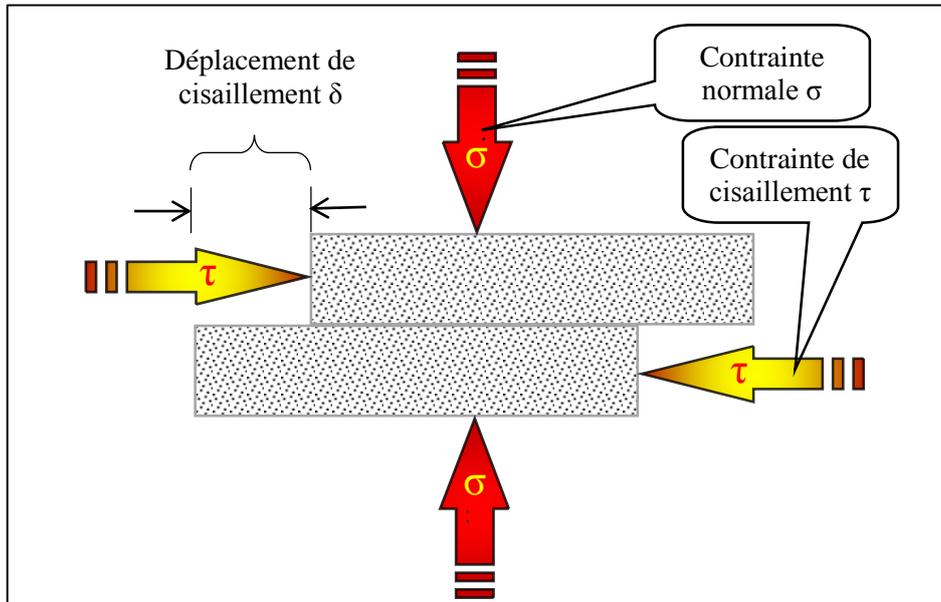


Figure I.7 : Résistance de cisaillement. [13]

I.3.4. Les discontinuités

C'est l'existence de discontinuités dans une masse rocheuse qui fait de la mécanique des roches un sujet unique. Le mot « discontinuité » désigne toutes séparations dans le continuum rocheux ayant une résistance à la traction nulle et utilisée sans aucune compréhension génétique (les mots « joint » ou « faille » qui décrivent des discontinuités formées de différentes manières). [14]

Le terme de discontinuité est utilisé pour désigner toute surface qui interrompt physiquement la continuité d'une matrice rocheuse et de ses propriétés mécaniques, hydrauliques et thermiques. Cette surface est en général assimilable, sur une certaine étendue, à un plan.

Les discontinuités représentent des types de surface très variées dont l'identification géologique, depuis l'échelle millimétrique jusqu'à l'échelle kilométrique, apportent des informations importantes sur le nombre de leurs paramètres géométriques et mécaniques. [15]

I.3.4.1. Les discontinuités dans un massif rocheux [10]

Le professeur ZHAO.J (2008) a résumé les différentes influences des discontinuités sur le comportement d'un massif rocheux, elles peuvent être responsables de :

- Couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger)
- Agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- Faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- Entraîner de grandes déformations ;
- Changer la distribution et l'orientation des contraintes.

I.3.4.2. Les types de discontinuités [10]

Les principales discontinuités présentes dans les massifs rocheux sont :

a) Joints de stratification :

Ils sont plus ou moins réguliers séparant les strates. Ils créent une interface de deux matériaux rocheux et ces derniers peuvent être soulignés comme de minces dépôts argileux ou schisteux favorisant le glissement.

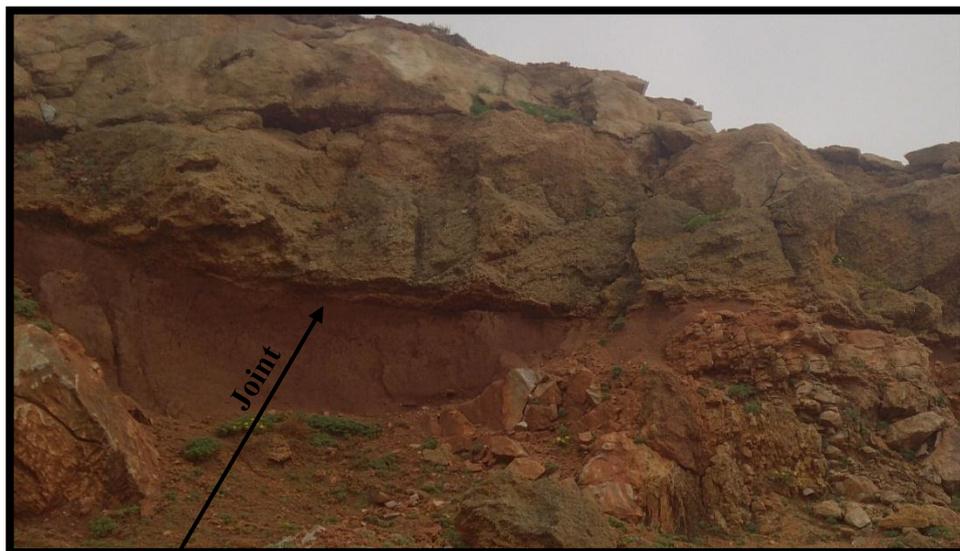


Figure I.8: Plan de stratification [Photo prise en 2016 Cap de garde-Annaba]

b) Schistosité :

Elle résulte de la réorientation des minéraux constitutifs dans une direction perpendiculaire à celle des contraintes de compression auxquelles le massif a été soumis.



Figure I.9: schistosité [Photo prise en 2018 Schistes, Tizi Ouzou]

c) Failles (fractures) :

Ce sont des surfaces de rupture générées par les effets de cisaillement issus des contraintes de compression (failles inverses ou normales selon l'orientation des contraintes principales ...) ou par traction. Le déplacement des lèvres de la rupture (le rejet) peut avoir une amplitude nulle ou atteindre plusieurs kilomètres.

Il est évident que la genèse de la faille va dépendre d'état de fracturation des épontes (masses rocheuses de part et d'autre de la fracture). Les plans de faille sont souvent marqués de stries indiquant le sens du mouvement et facilitant un rejet de la faille dans cette direction. [20]



Figure I.10: Une faille d'un massif rocheux [20]

d) Diaclases :

Elles correspondent à une rupture de type fragile. Elles peuvent être des plans liés à la diagenèse et au retrait de la roche pour certains ou d'origine tectonique pour d'autres. Quoiqu'il en soit, dans les roches stratifiées, les diaclases se présentent pratiquement toujours sous la forme de deux familles orthogonales entre elles et perpendiculaires aux plans de stratification. Les diaclases découpent ainsi des éléments parallélépipédiques facilitant les chutes de blocs.



Figure I.11: Une diaclase [16]

I.3.4.3. Les paramètres caractérisant les discontinuités

Étant donné l'importance de la présence de discontinuités sur les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux et afin de pouvoir quantifier cet effet, d'abord, nous avons besoin de connaître les caractéristiques géométriques, géologiques et mécaniques des discontinuités.

a) Orientation, direction et pendage :

En tout point, l'orientation d'un plan dans l'espace est définie par deux angles, par rapport au nord géographique et à la verticale, respectivement mesurés avec une boussole et un inclinomètre. Les lignes de niveau du plan définissent la direction ou azimuth du plan, compté de 0 à 180 degré en tournant vers l'est. Les lignes de plus grande pente du plan définissent le pendage, de 0 pour un plan horizontal à 90 degré pour un plan vertical, assorti de l'indication du côté vers lequel le plan est incliné. [16]

Tableau I.3: Conditions de creusement pour quelques orientations. [17]

Classes		Orientation des discontinuités		Conditions de creusement	
		Angle entre pendage et axe d'avancement du creusement (°)	Pendage (°)		
OR ₁		Quelconque	0 à 20	En bancs sub-horizontaux	
OR ₂	a	0 à 30	20 à 90	En travers banc	(a) Avec le pendage
	b				(b) Contre le pendage
OR ₃		30 à 65	20 à 90	Conditions intermédiaires	
OR ₄	a	65 à 90	20 à 60	En direction	(a) Pendage moyen
	B		60 à 90		(b) Pendage fort

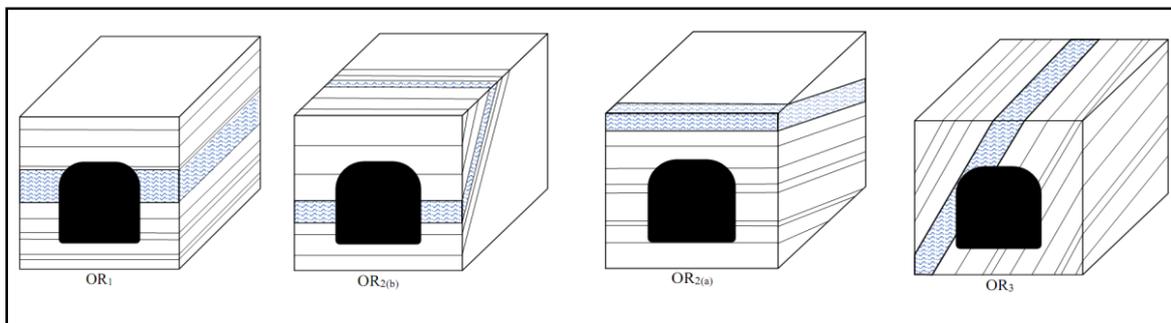


Figure I.12 : Quelques orientations des discontinuités dans les massifs rocheux. [17]

b) Espacement et fréquence :

L'espacement est la distance entre les intersections des discontinuités avec la ligne de balayage de mesure (souvent un forage dans le massif). La fréquence i.e. le nombre des discontinuités par l'unité de distance, est l'inverse de l'espacement.

Si, le long de la ligne du levé, N est le nombre de discontinuités et L la longueur du levé, la fréquence (λ) des discontinuités vaut $\lambda = N/L$ et l'espacement moyen (x) vaut $x = L/N$.

On déduit que la fréquence est simplement l'inverse de l'espacement moyen des discontinuités. La fréquence et l'espacement moyen dépendent de l'orientation de la ligne de levé par rapport à celle des discontinuités [18].

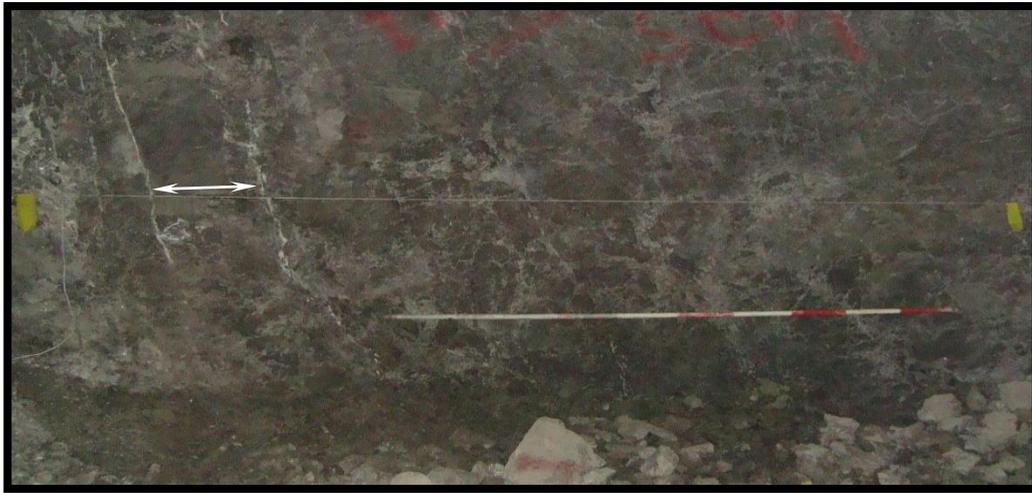


Figure I.13: Espacement entre deux joints apparents dans le massif de la mine de Chaâbet El Hamra [Photo prise en 2018 Ain Azel-Sétif]

On décrit l'espacement selon les mesures des discontinuités :

Tableau I.4 : Description des espacements selon leur mesure.

Espacement des discontinuités (m)	Description
< 0.02	Espacement extrêmement étroit
0.02 - 0.06	Espacement très étroit
0.06 – 0.2	Espacement étroit
0.2 – 0.6	Espacement modéré
0.6 – 2	Espacement large
2 – 6	Espacement très large
> 6	Espacement extrêmement large

c) La persistance :

La persistance est l'extension spatiale où la longueur d'une discontinuité peut être directement mesurée en observant les longueurs des traces des discontinuités sur les affleurements [15].

On classe les persistance des discontinuités selon la longueur de leurs traces :

Tableau I.5 : Classification des discontinuités selon leur extension [10]

Persistence	Longueur de la trace (m)
Persistence Très Faible	< 1
Persistence Faible	1 - 3
Persistence moyenne	3 - 10
Persistence élevée	10 – 20
Persistence Très élevée	> 20

d) Ouverture et matériaux du remplissage :

Il est très rare que les deux surfaces d'une discontinuité soient en contact, généralement il existe un espace entre elles appelé ouverture qu'elle soit remplie d'air, d'eau (joint ouvert) ou avec des matériaux de remplissage [15].

En général, les propriétés du matériel de remplissage affectent la résistance au cisaillement, la déformabilité et la perméabilité des discontinuités. On peut distinguer :

- Matériaux tendres : qui peuvent être rayés à l'ongle ou essuyés à la main (argile, sable) ;
- Matériaux durs : qui ne peuvent être rayés à l'ongle (minéraux comme la calcite, le quartz, etc.).

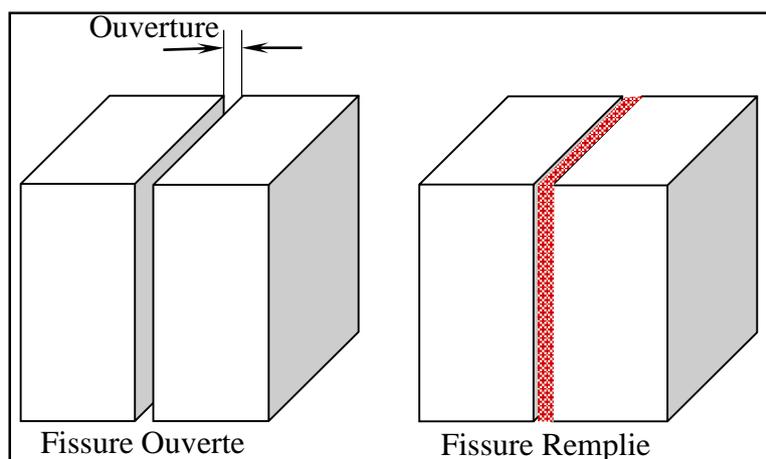


Figure I.14: Fissure ouverte et remplie [15]

e) Familles de discontinuité :

Le nombre de famille de discontinuités est déterminé partir du nombre de groupes ses discontinuités parallèles ou subparallèles et ayant la même orientation. [19]

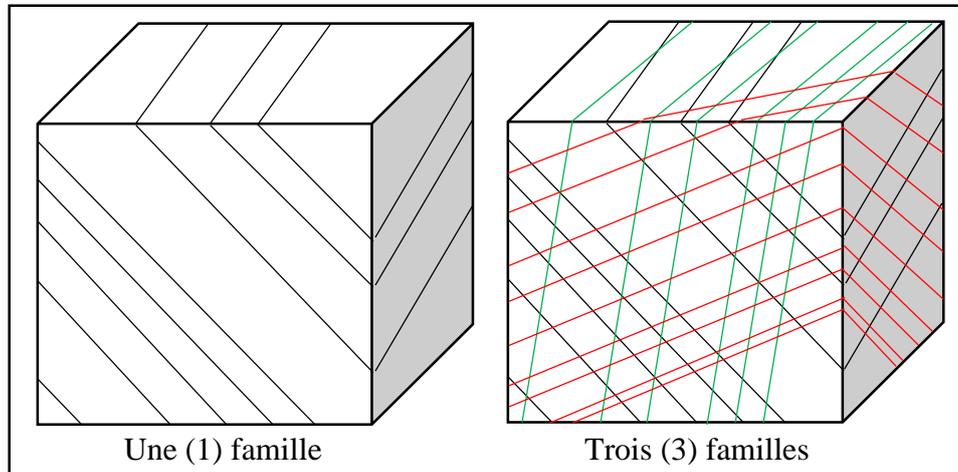


Figure I.15 : Un exemple de nombre des familles des discontinuités dans un massif.

f) La rugosité :

Elle correspond à la forme de la surface de discontinuité d'un ensemble individuel à petite échelle. Elle doit être évaluée sur la base des critères visuel et sensoriel.

Pour décrire la rugosité, il convient d'utiliser les termes suivants [12] :

- **Très rugueuse :** la surface est très rugueuse et présente d'importantes aspérités visuelles, semblables à du gravier fin ou de calibre moyen.
- **Rugueuse :** lorsqu'on passe la frôle du doigt, la surface est rugueuse comme du papier de verre à gros grain. Les aspérités peuvent être visuelles.
- **Légèrement rugueuse :** la surface est rugueuse comme du papier de verre à grain plus fin. Les aspérités ne sont pas visibles à l'œil nu.
- **Lisse :** la surface est plutôt lisse, comme du papier.
- **Miroir de faille :** la surface est très lisse, voire polie, et présente une striation due à un déplacement en cisaillement.

Un coefficient de rugosité du joint (JRC) peut être adapté. Le JRC est une mesure quantitative de la rugosité, variant de 0 pour une surface plane et lisse à 20 pour une surface très rugueuse. Au laboratoire, il est déterminé par différentes procédures expérimentales. Barton

et Choubey (1977) ont proposé comme méthode de référence, un essai nommé "essai de basculement" (tilt test). Il consiste à placer la fracture sur une surface inclinée, le glissement de la fracture pour un angle α d'inclinaison donné est directement relié à la rugosité du joint et à l'angle de frottement de base ou résiduel. [21]

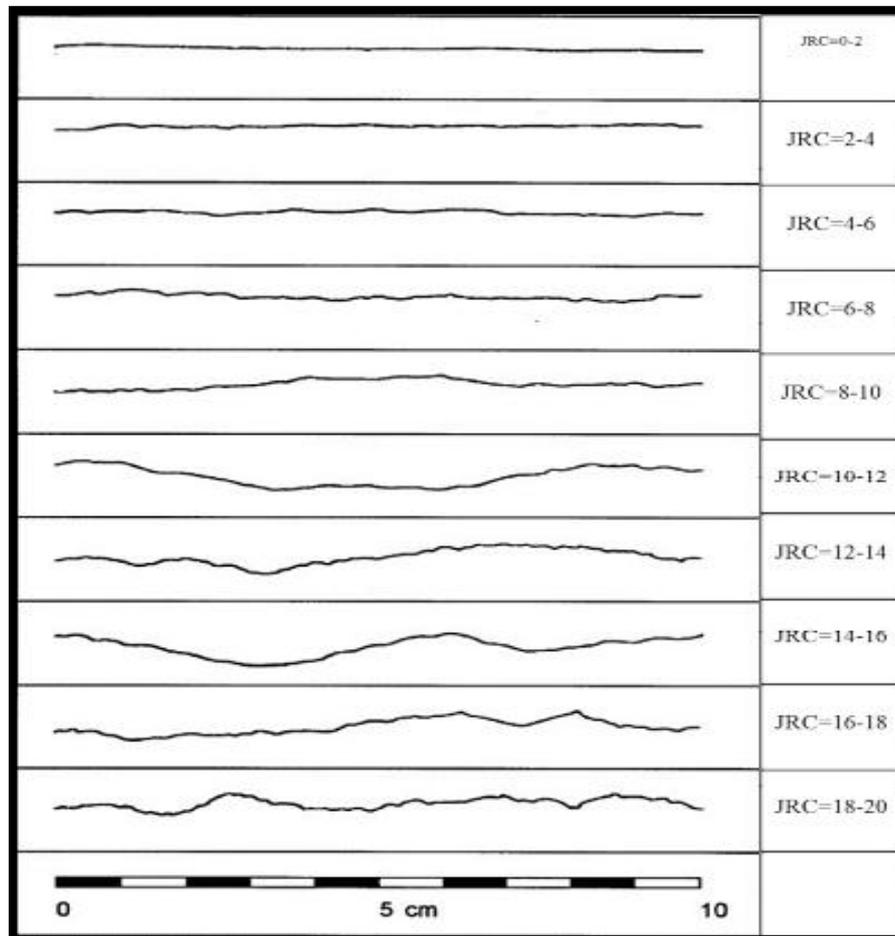


Figure I.16: Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC) [12].

I.4.Conclusion

Les massifs rocheux sont composés par matrice rocheuse d'une part et de discontinuités d'autre part, ils ont un comportement mécanique et une structure géométrique. Les discontinuités jouent un rôle important sur la stabilité d'un massif.

L'identification géotechnique d'un massif rocheux exige la détermination des propriétés de la roche (physiques, mécanique, géométriques), ainsi que les discontinuités qui l'interrompent (orientation, pendage, persistance). Ceci s'avère être possible, uniquement par le biais d'un nombre d'essais effectués sur site, et au laboratoire.

Chapitre II
Description De La Mine
De Chaâbet El-Hamra

II.1. Généralités sur la mine de Zinc de Chaâbet El-Hamra

II.1.1. Situation géographique

Le gisement de Zinc de Chaâbet El-Hamra est situé à vol d’oiseau, à environ 250 Km au Sud-Est d’Alger et à 50 km au Sud de Sétif à 3,5 km au Sud-est du village d’Ain Azel et à 7,5 km de la mine de Kherzet Youcef. Ses coordonnées géographiques approximatives sont : 35°45’N et 5°30’E. L’altitude du site varie de 950 à 1200 mètres. [34]

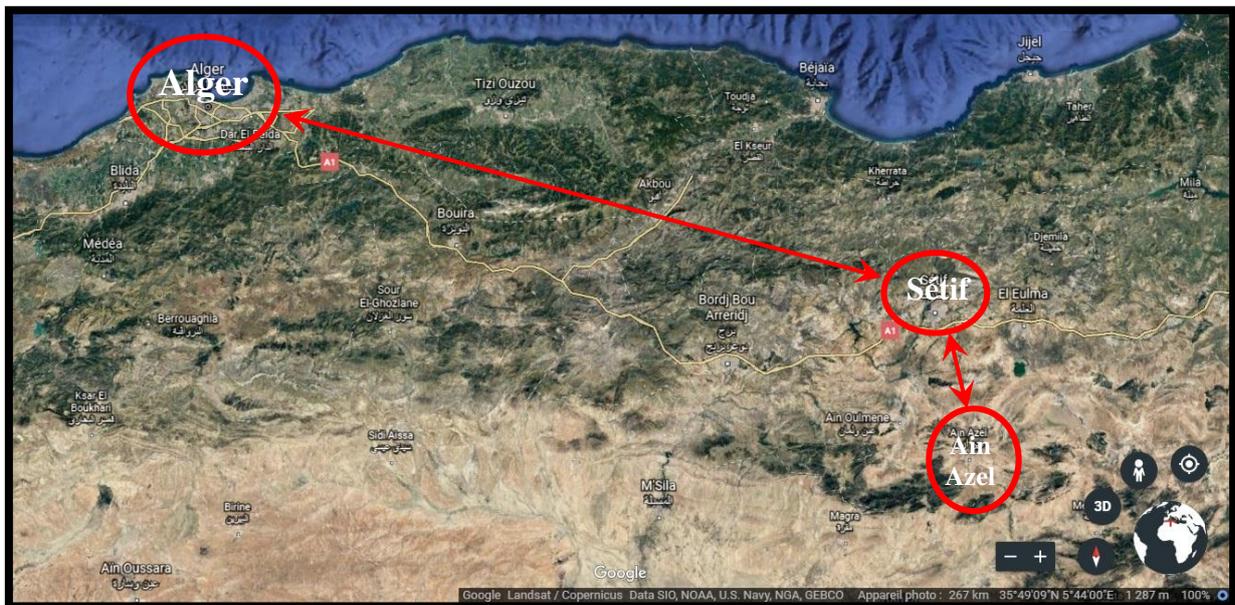


Figure II.1 : Situation géographique de la mine de Chaâbet El-Hamra.

II.1.2. Historique de la mine de Chaâbet El-Hamra

Le gisement de Chaâbet El-Hamra est connu depuis longtemps, il a fait l’objet d’exploitation des affleurements de calamines de 1910 à 1920 et de 1936 à 1941. Beaucoup plus tard, les travaux d’exploration par forages ont été entrepris afin d’établir l’extension des zones connues. Après la nationalisation des mines en 1966, le gisement de Chaâbet El-Hamra a été l’objet de premiers travaux de prospection géologique, de 1967 à 1988, suivis ensuite de travaux d’évaluation par sondages à maille régulière de 50x100 et de 100x100m, de 1989 à 1991. En 1991 et suite au coup d’eau survenu le 02 juin 1990 à la mine de Kherzet Youssef et qui a mis fin à l’exploitation du gisement, l’ENOF a élaboré un premier dossier de recherche détaillée par ouvrages miniers sur le gisement de Chaâbet El-Hamra. Les travaux miniers ont démarré en janvier 1992 et les ouvrages d’accès ont été achevés en avril 1994. [34]

La mine a démarré l'extraction du tout-venant en avril 1994 tout en continuant à réaliser des travaux de recherche au fond pour préciser les réserves géologiques et les conditions hydrogéologiques. Les résultats financiers de la mine ont été toujours déficitaires, ce qui a poussé l'ENOF à engager périodiquement des analyses et évaluations technicoéconomiques.

II.1.3. Géologie régionale

Le gisement de Chaâbet El-Hamra, fait partie du « district métallogénique » à Pb-Zn des monts du Hodna qui renferme d'importantes minéralisations en Pb-Zn localisées dans la région de Ain Azel. Le gisement de Chaâbet El-Hamra appartient aux blocs de Ain M'Lila, qui comprend trois structures de soulèvement en forme de Horst-Anticlinaux. Le gisement est associé au Horst de Rahbat. [34]

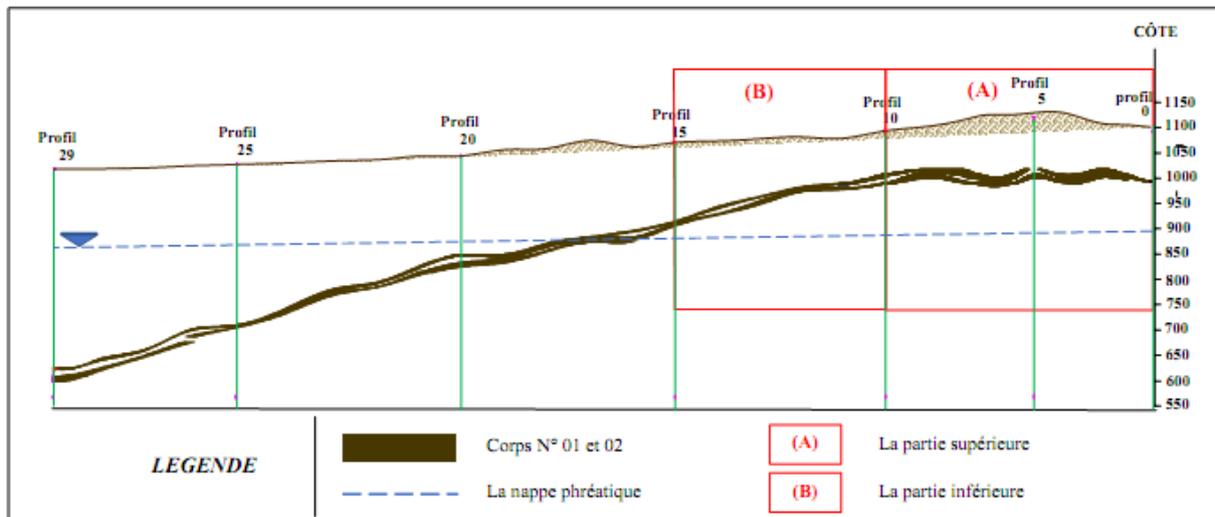


Figure II.2 : Coupe schématique longitudinale du gisement de la mine de Chaâbet El-Hamra (Profil 0-profil 29). [34]

II.1.4. Aspect géologique et Structural du gisement

Le minerai zincifère du gisement de Chaâbet El-Hamra est composé de deux corps principaux appelés corps n° 1 pour le corps supérieur et corps n° 2 pour le corps inférieur. Ces corps sont allongés en bande sur une longueur de 2700 m en direction et 100 à 400 m en pendage. Ces corps de minerai plongent d'un pendage de 10° à vers le Nord-Ouest. Ce pendage devient plus important à partir du profil 14 (19° à 20°). Le minerai est encaissé dans une dolomie poreuse ou bréchique située dans la partie inférieure de l'étage Hauterivien (Crétacé inférieur). Le toit du corps supérieur (corps n° 1) est une dolomie à lits marneux, tandis que le mur du corps inférieur (corps 'n° 2) s'agit une dolomie massive à concrétions (dolomie tachetée).

Les deux corps de minerai sont stratiformes, subparallèles et séparés l'un de l'autre par un niveau intercalaire constitué d'une dolomie à minéralisation pauvre et parfois stérile de puissance variable. Ce niveau peut être absent, de telle sorte que les deux corps se confondent en un seul corps de minerai continu.

La puissance moyenne du corps n°1 (corps supérieur) est de 5 mètres et celle du corps n°2 (corps inférieur) est de 4 mètres. Il n'existe aucune corrélation entre les épaisseurs et les teneurs et on constate une distribution contrastée dans les corps de minerai.

CORPS N°	COUCHE N°	LITHOLOGIE	PUISS (m)	DESCRIPTION
COROS N° 1	6		0.80	Grès Organogène
			0.50	Marne noire à aspect schisteux
			1.50	Dolomie bréchique faiblement minéralisée Dolomie à minéralisation disséminée de sphalerite
	5		0.20	Joint marneux
			2.00	Dolomie grise à minéralisation en veinules de sphalerites et nids de baryte par endroits la couche est à moitié stériles
4		2.00	Dolomie à minéralisation disséminée de sphalerite	
COROS N° 2			4 - 10	L'intercalaire stérile
			0.20	Sphalerite massive à joint argileux
	3		1.60	Dolomie à minéralisation bréchique de sphalerite
			0.40 - 2.00	Dolomie st stérile
	2		1.60	Dolomie à veines de sphalerite
			0.20	Sphalerite massive
1		0.80	Minéralisation bréchique	
		0.70	Dolomie stérile	
		0.50	Sphalerite massive (par endroit toute la couche est minéralisée) Dolomie à concrétions	

Figure II.3: Log stratigraphique de la zone minéralisée [34]

La minéralisation du gisement de Chaâbet El-Hamra a une structure pluri-étagée, de forme lenticulaire. La zone métallifère globale constituée de lentilles se présente sous forme d'une large bande de direction Nord-Ouest (300 à 320°), d'environ 2700 m de longueur et de 300 à 600 m de largeur et à une profondeur allant de 100 à 400 m. La puissance de ces lentilles est variable, Elle atteint parfois 15 m. [34]

II.1.5. Tectonique du gisement [30]

Le gisement de Chaâbet El Hamra occupant l'extrême partie Ouest du flanc Nord-Ouest du Horst anticlinal de Rahbat se caractérise par une structure complexe en plis cassés. Il apparaît sous forme d'un dôme recoupé par deux grands accidents de direction orientée Est- Ouest donnant ainsi naissance à trois blocs principaux : Un bloc central ; Un bloc méridional et un bloc occidental avec une structure en Horst et en Graben, ce gisement est touché par deux types de tectonique ;

II.1.5.1. Tectonique cassante

Il s'agit d'un système de failles synsédimentaires ou flexures de direction Nord-Sud, (Glaçon, 1967), on y trouve :

- Une Faille centrale : C'est une faille normale de direction Nord-Ouest/Sud-Est avec un pendage du plan de faille au Sud-Est inférieur à 178° et à rejet vertical d'environ 10 à 15m.
- Une Faille latitudinale : C'est une faille normale de direction Est-Ouest à plongement vers le nord avec un angle de pendage de l'ordre de $70-80^\circ$ et à rejet vertical de 10 à 20m.

II.1.5.2. Tectonique souple(Plis)

Le secteur de Chaâbet El Hamra est caractérisé par une structure générale sous forme d'un anticlinal découpé par une variété d'accidents tectoniques, Cet anticlinal présente un plan axial orienté Nord-Ouest/Sud-Est.

II.1.6. L'exploitation de la mine de Chaâbet El-Hamra

II.1.6.1. Mode d'ouverture [34]

La mine de zinc de Chaâbet el-Hamra est exploitée en souterrain par un système d'ouvrages minier permettant l'accès, l'extraction, l'aéragé et la circulation du personnel du jour vers le fond. Il s'agit de :

- Une Tranchée d'accès d'une longueur de 113 m ;
- Une descenderie de 650 m ;
- Une galerie d'intermédiaire de 166 m ;
- Un travers banc de 290 m de longueur ;

- Un puits vertical de 117 ml pour l'aération et secours.

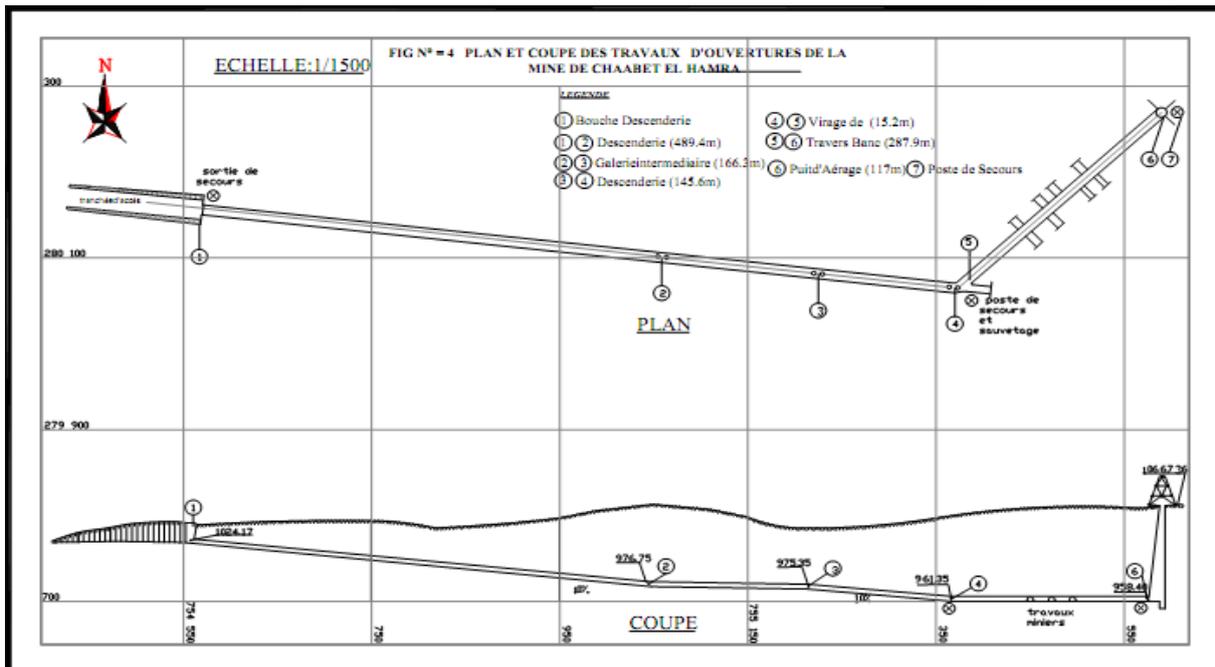


Figure II.4 : Plan et coupe des travaux d'ouvertures de la mine de Chaâbet El-Hamra. [34]

II.1.6.2. Choix de la méthode d'exploitation

Le choix de la méthode d'exploitation doit répondre aux exigences suivantes :

- Sécurité des ouvrages miniers ;
- Sécurité du personnel ;
- Rendement maximal ;
- Perte et salissage minimaux.

Sur la base des propriétés physico-mécaniques du minerai et des roches encaissantes, la morphologie du gisement et la puissance des corps minéralisés, les méthodes retenues sont : traçage et dépilage et sous niveaux abattu, et l'exploitation par chambre et piliers. La mise en œuvre de ces méthodes nécessite au préalable le creusement d'une série d'ouvrages miniers (galerie de roulage, aérage, jonction et de découpage de bloc) qu'on appelle les travaux d'infrastructures et préparatoires avec des paramètres définis pour l'abattage et l'extraction du minerai. [34]

II.1.6.3. Travaux d'infrastructure

Les travaux d'infrastructures sont des ouvrages destinés à l'accès, au roulage à l'aérage et issue de secours du champ miniers. Ils seront creusés au mur de la minéralisation d'une manière

à servir la totalité de la partie à exploitée, avec une pente de 10% à 15% à partir des anciens travaux sur une longueur de 901m pour atteindre le profil 15. [34]

II.1.6.3.1. Paramètres du creusement

Le creusement se fait par des Galeries de jonction et de découpage en voute d’une section de 12 m² avec les dimensions du bloc suivantes :

- Longueur, elle est égale à la dimension du bloc ;
- Largeur 4.0 m ;
- Hauteur 3.0 m.

II.1.6.3.2. Volume des travaux (2015) :

En 2015, l’unité de production prévoit la réalisation de 520 m de travaux infrastructures dont 240m de galerie roulage et 280m de galerie d’aérage dont 337m dans le minerais et 183ml dans le stérile. [34]

Tableau II.1 : Planning des travaux d’infrastructures pour 2015. [34]

Type de travaux	Objectif 2015(t)	
Galerie de roulage	Minerais	160
	Stérile	80
	Quantité	4 800
Galerie d’aérage	Minerais	157
	Stérile	123
	Quantité	4 710
Total	9 510	

II.1.6.4. Travaux préparatoires :

Les travaux préparatoires sont des ouvrages destinés à diviser un champ minier en blocs ou chambres d’exploitation de dimensions définis, assurer l’aérage des chantiers, la circulation du personnel et le transport des matériaux vers le front d’attaque. Ces ouvrages sont galerie de jonction et de découpage, leur creusement se fera dans le minerais. [34]

II.1.6.4.1. Paramètres du creusement

Galerie de jonction et de découpage en voute d’une section de 12m²

- Longueur, elle est égale à la dimension du bloc
- Largeur 4.0 m ;
- Hauteur 3.0 m.

II.1.6.4.2. Volume des travaux préparatoires (2015) :

En 2015 l'unité prévoit la réalisation de **360 ml** de travaux préparatoires dont **40 ml** galerie de jonction et **320 ml** de galerie de découpage. [34]

Tableau II.2 : Volume des travaux préparatoires (2015). [34]

Type de travaux	Objectif 2015(t)	
Galerie découpage	Minerai	247
	Stérile	73
	Quantité	7 410
Galerie de jonction	Minerai	40
	Stérile	00
	Quantité	1 200
Total	8 610	

Tableau II.3 : Volume des travaux par profil. [34]

DESIGNATION	Pr12-13	Pr13-14	Pr14-15	TOTAL
T d'infrastructure (ML)	145	245	130	520
T préparatoires (ML)	140	220	0	360

Chapitre III
Systemes De
Classification Des
Massifs Rocheux

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les différentes méthodes ou systèmes de classification des massifs rocheux, ces méthodes prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité de ces massifs.

Ces facteurs sont reliés notamment aux différents aspects géologiques, hydrogéologiques et de toute évidence, les caractéristiques mécaniques de la masse rocheuse, c'est-à-dire la matrice rocheuse qui constitue le noyau d'un massif, et tout ce qui peut influencer sur sa stabilité tel que les discontinuités et leur description (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage...).

Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques qui ont pour but d'estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif rocheux, en particulier, la description macroscopique de ses constituants géo-mécaniques, et donc de pouvoir juger la stabilité d'une masse rocheuse par rapport aux travaux d'excavation souterraine (tunnels, galeries, chambres d'exploitation... etc.)

III.2 Rock quality designation (RQD) [22]

En français « désignation de la qualité de la roche » ; DEERE (1964) propose un paramètre évaluant la qualité de la masse rocheuse selon un index intitulé RQD (Rock Quality Designation). Obtenu à partir de carotte de forage géologique, cet indice représente l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur de course précise. Basée sur un procédé qualitatif, seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 cm (4 pouces) est conservée et cette somme est divisée par la longueur de course de la carotte de forage. Ce paramètre est défini comme suit :

$$RQD(\%) = \frac{\sum \text{longueurs} \geq 100\text{mm}}{\text{longueur totale de la course}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Initialement, la longueur de course pour évaluer l'indice RQD présentait une ambiguïté supplémentaire. Lors de la commission sur la standardisation de test de laboratoire et sur le terrain (ISRM, 1981b), une première recommandation est apparue : tout calcul du RQD doit être réalisé selon différentes longueurs de course de carotte de forage afin de séparer les différents plans de sédimentations, zones de faiblesse, des structures locales, etc. Une longueur totale de course d'au plus de 1,5 m de longueur et (\varnothing 54,7 mm) de diamètre doit être utilisée.

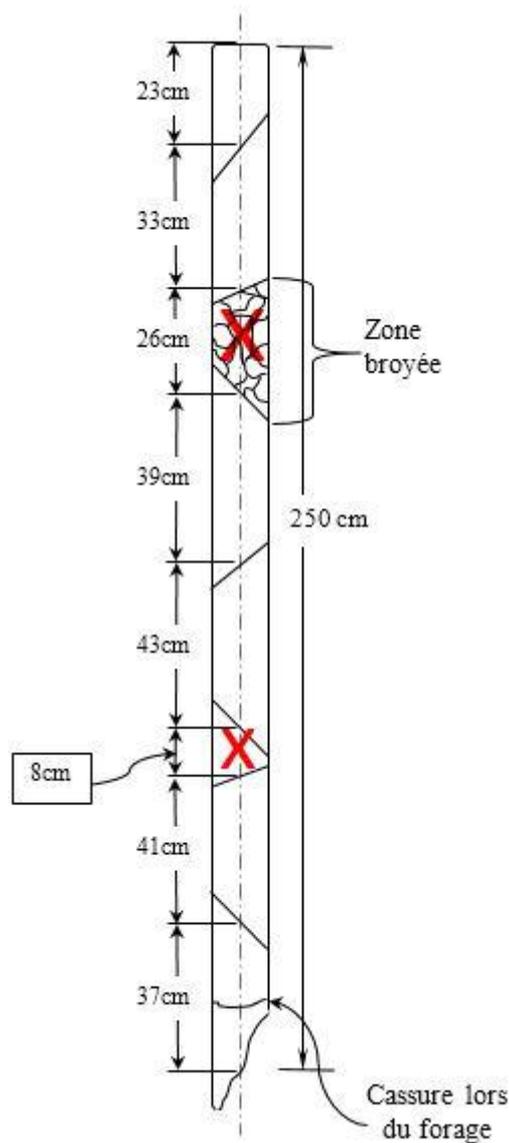


Figure III.1 : schéma d'une carotte pour calcul de l'RQD.

Outre que les recommandations sur la quantité de support, DEERE et AI affirment que le RQD s'avère utile pour déterminer le facteur de réduction du module de déformation de la roche intacte à la masse rocheuse.

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de DEERE (1968) et elle est présentée au Tableau III.1 ci-dessous :

Tableau III.1 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux. [23]

RQD (%)	Qualité du massif rocheux
<25	Très pauvre
25 - 50	Pauvre
50 - 75	Moyenne
75 - 90	Bonne
90 - 100	Excellente

Il existe aussi des méthodes alternatives qui s'avère très utile pour estimer l'indice RQD. Lorsqu'aucun forage géologique n'est disponible. PRIEST et HUDSON (1976) ont établi une relation entre l'espacement des joints (λ [joints/mètre]) déterminé à partir de mesure de surface du massif rocheux exposé et de l'indice RQD :

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1) \tag{III.2}$$

III.2.1. Avantages

Le système de classification RQD se base sur des forages géologiques standard et sa plus grande force retombe sur sa simplicité, la vitesse d'acquisition et aussi qu'il est peu coûteux. Le RQD doit être interprété comme un indice de qualité du massif lorsque la roche présente des caractéristiques problématiques comme un haut degré de détérioration et se présente par un comportement ductile, une zone de cisaillement ou un massif fracturé. Ceci signifie que l'indice RQD est seulement capable d'évaluer la partie intacte du massif rocheux. [23]

III.3. Rock mass rating (RMR)

En français « classification de la masse rocheuse » ; le système RMR ou la classification géomécanique a été développé par BIENIAWSKI 1972-1973 en Afrique du Sud pour évaluer les besoins de stabilité et de soutien tunnels. Depuis, il a été successivement affiné et amélioré. L'avantage de ce système est que seulement quelques paramètres de base relatifs à la géométrie et aux conditions mécaniques de la masse rocheuse sont utilisées. Pour classer une masse rocheuse, le système RMR incorpore ces six paramètres de base. [24]

Autrement dit, il résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (de A1 à A5) et d'une note d'ajustement. La somme de ces notes attribue une valeur comprise entre 0 et 100 au massif. Les cinq paramètres qui déterminent l'indice RMR sont définis comme suit :

- **A1** (Strength of intact rock material) : il tient compte de la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse (note : de 0 à 15).
- **A2** (Rock Quality Designation RQD) : il est déterminé par la valeur du RQD obtenue à partir de carottes géologiques (note : de 3 à 20).
- **A3** (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures, le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).
- **A4** (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (note : de 0 à 30).
- **A5** (Groundwater conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques du massif. (Note : de 0 à 15).
- **B** (Adjustment for joint orientation) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

Cependant, la pondération du paramètre (**B**) est de nature statique, c'est-à-dire qu'aucun aménagement n'est fait pour la profondeur, et aucun ajustement n'est fait pour les orientations intermédiaires. Néanmoins, cet ajustement des discontinuités est considéré comme adéquat pour le domaine civil (BIENIAWSKI, 1989). Pour le domaine minier, aucune étude n'est disponible dans la littérature vis-à-vis de la validité de ce paramètre pour les mines en profondeur. (LAUBSCHER 1977 ; 1984), CUMMINGS et AL. (1982) et KENDORSKI et AL. (1983) ont toutefois tenté de modifier le paramètre directionnel du RMR pour les mines. Ceci sera discuté subséquentement. [22]

La somme des cinq premiers indices caractérise le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif [24]. Le RMR89 s'écrit alors :

$$\text{RMR}_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad [24] \quad (\text{III.3})$$

Tableau III.2 : Paramètres de classification des roches et notes de pondération. [24]

Paramètres			Coefficients						
A1	Résistance de la roche	Indice de franklin Is (MPa)	>10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Indice de franklin non utilisé		
		Résistance à la compression (MPa)	<250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	△
	Notes		15	12	7	4	2	1	0
A2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Notes		20	17	13	8	3		
A3	Espacement (m)		>2	0.6 - 2	0.2-0.6	0.06-0.2	<0.06		
	Notes		20	15	10	8	5		
A4	Nature des joints		Surface très rugueuse non continus en pentes en contact En pentes non altérées	Surface légèrement rugueuse épaisseur <1 mm Epente non altérées	Surface légèrement rugueuse Epaisseur <1mm. Epente altérées	Surface Lustrée ou remplissage <5mm joints continus	Remplissage mou<5mm où joints ouverts >5mm joints continus		
	Notes		30	25	20	10	0		
A5	Venus d'eau	Débit sur 10m	Aucun venu d'eau	<10	10-25	20-125	>125		
		Pression d'eau contrainte principale	0	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	>0.5		
	Hydrogéologie		Complètement sec	Humide	Suintement (eau Interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problème sérieux de venues d'eau		
	Notes		15	10	7	4	0		

Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées. L'application de cette classification est limitée aux cas des massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités. [25]

Afin de pouvoir classer la masse rocheuse déterminée à partir de la valeur du RMR, présente une classification obtenue selon l'indice RMR final, [22] cette classification est représentée dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Qualité de la masse rocheuse. [24]

Note globale	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Classe du massif rocheux	I	II	II	IV	V
Description du massif rocheux	Très bon rocher	Bon rocher	Rocher moyen	Rocher médiocre	Rocher Très médiocre

III.3.1. Avantages

Ce système a réussi à identifier des paramètres géologiques quasi universels permettant d'enregistrer rapidement et simplement toute expérience d'excavations dans la masse rocheuse. De la sorte, l'application du système de classification RMR s'étend avec succès à la conception de fondation, de stabilité de talus, l'évaluation du décapage, ainsi que de nombreuses applications minières. [22]

III.4. Le Q-system

BARTON et AL. (1974) ont introduit le système « Q », un indice permettant de décrire la qualité de la masse rocheuse pour l'excavation de tunnels. Le système de classification se nomme « Rock Mass Quality ou Tunnelling Quality » Index système Q ou tout simplement système du NGI en hommage de l'institut Géotechnique Norvégien.

Le système Q évalue, en tant que paramètres de classification, six caractéristiques particulières du massif rocheux, soit : [22]

- Indice RQD ;
- Nombre de familles de joints (JN) ;
- Indice de rugosité des joints (JR), celle du plus faible plan de fissuration ;
- Indice de l'altération des joints (JA), caractéristiques de ce dont les fissures sont remplies ;
- Facteur de réduction pour la présence d'eau (JW) ;
- Facteur de réduction pour les contraintes in situ (SRF).

Le calcul de la cote Q se fait comme suit et varie sur une échelle logarithmique de 0,001 à 1000. [26]

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (III.4)$$

La valeur des différents paramètres de cette classification, ainsi que des notes explicatives supplémentaires permettant d'évaluer ceux-ci plus adéquatement, sont données au tableau III.4

Tableau III.4 : Paramètres de la classification du système Q. [26]

Paramètre « Jn »	
Nombre de famille de diaclases	Jn
Massif, peu ou pas de diaclases	0,5-1
Une famille de diaclases	2
Une famille et diaclases aléatoires	3
Deux familles de diaclases	4
Deux familles et diaclases aléatoires	6
Trois familles de diaclases	9
Trois familles et diaclases aléatoires	12
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses	15
Roche concassée, semblable à un sol	20

Paramètre Jr (Rugosité des diaclases)	
Parois en contact	Jr
Diaclases discontinues	4
Rugueuses, irrégulières, ondulées	3
Lisses, ondulées	2
Très lisses, ondulées	1.5
Rugueuses ou irrégulières, planaires	1.5
Lisses, planaires	1
Très lisses, planaires	0.5
Parois séparées lorsque cisailé	Jr
Zones avec remplissage de minéraux argileux assez épais pour empêcher le contact des parois.	1
Contact des parois	jr
Zones sableuses, de gravier ou concassée assez épaisse pour empêcher le contact des parois.	1
Paramètre Ja	
Parois en contact	Ja
Dure, élastique, remplissage imperméable	0,75
Non altérées, salissage de surface seulement	1
Légèrement altérées, minéraux non déformables, particules sableuses etc.	2
Remplissage silteux, sableux, avec une faible fraction d'argile	3
Matériaux déformables, kaolinite, mica etc. épaisseur < 1-2 mm	4
Parois en contact lorsque cisillées	Ja
Particules sableuses, sans argile	4
Minéraux argileux, surconsolidés, épaisseur < 5 mm	6
Minéraux argileux, moyennement sur-consolidés, épaisseur < 5 mm	8
Remplissage argileux gonflant, épaisseur < 5 mm	8-12
Parois séparées lorsque cisillées	Ja
Zones de roche concassée	6
Roche et argile	8-12
Zones silteuses, sableuses, avec une faible fraction d'argile	5

Zones ou bandes épaisses d'argile	10-13
Paramètre Jw (infiltration d'eau)	Jw
Sec ou infiltration mineure < 5 l/m	1
Infiltration moyenne, lessivage occasionnel	0,66
Infiltration importante, roc compétant sans remplissage	0,5
Infiltration importante	0,33
Infiltration exceptionnellement importante après sautage, réduction dans le temps	0,2-0,1
Infiltration exceptionnellement importante	0,1-0,05
Facteur de réduction de contrainte(SRF)	
Description de la zone	SRF
Zone de faiblesse interceptant l'excavation	
Occurrences multiples de la zone, remplissage argileux, massif désenchevêtré	10
Zone unique, profondeur de l'exc. < 50 m	5
Zone unique, profondeur de l'exc. > 50 m	2.5
Zone unique, profondeur de l'exc. > 50 m	7.5
Zone unique dans du roc compétant, sans argile, profondeur < 50 m	5
Zone unique dans du roc compétant, sans argile, profondeur > 50 m	2.5
Diaclases ouvertes, massif très fracturé	5
Roc comprimé, déformations plastiques, contraintes élevées	
Pression de compression relativement faible	5-10
Pression de compression élevée	10-20
Roc compétant, problèmes de contraintes élevées	
Faibles contraintes, près de la surface	2.5
Contraintes moyennes	1
Contraintes élevées	0.5-2
Coups de terrain faibles	10-20
Roche gonflante	
Pression de gonflement faible	5-10
Pression de gonflement élevée	10-15

Les trois quotients de la formule représentent des caractéristiques particulières du massif rocheux, l'interprétation est la suivante :

- RQD/Jn représente la structure globale du massif, ce qui constitue une mesure approximative de la taille des blocs rocheux (éléments dissemblables) ;
- Jr/Ja représente la résistance au cisaillement des discontinuités (les plus défavorables ou argileuses) séparant les blocs rocheux ;
- Jw/SRF consiste le paramètre de réduction due à la présence d'eau Jw qui a un effet néfaste sur la résistance au cisaillement et indirectement quant à l'évaluation de l'état général des contraintes SRF. Ce dernier paramètre mesure la réduction de contrainte lors d'excavation rocheuse dans une zone présentant un niveau de cisaillement élevé ou lors de présence d'argile, des contraintes élevées dans la roche compétente, des pressions de convergence ou de gonflement dans des roches de faible résistance (plastique ou ductile).

Outre que les recommandations sur le besoin de support de terrain, la cote Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf (9) catégories de qualité pour la construction de tunnels. Le Tableau III .5 ci-dessous présente cette qualification.

Tableau III.5: Évaluation de la qualité du massif selon la note Q. [26]

N°	Indice Q	Qualité de la masse rocheuse
1	0,001 - 0,01	Exceptionnellement pauvre
2	0,01 - 0,1	Extrêmement pauvre
3	0,1 - 1	Très pauvre
4	1 - 4	Pauvre
5	4 - 10	Moyenne
6	10 - 40	Bonne
7	40 - 100	Très bonne
8	100 - 400	Extrêmement bonne
9	400 - 1000	Exceptionnellement bonne

III.5. Geologic strength index (GSI)

En français « index de la résistance géologique » ; introduit par HOEK et AL. (1995) puis amélioré par HOEK et BROWN (1997), le Geological Strength Index ne présente pas une

classification géomécanique en soi. Cependant, il constitue un lien entre le RMR (Q-system) et la détermination des Paramètres de déformabilité et de résistance des massifs rocheux.

Afin d'estimer le GSI, il est nécessaire de calculer le RMR' et le Q' qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR' est calculé en retenant une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités (B). [24]

$$\text{RMR}' = A1 + A2 + A3 + A4 + 15 \quad (\text{III.5})$$

De même, Q' se ne calcule en ne tenant pas compte de l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes (Jw/SRF)

$$Q' = \frac{\text{RQD}}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \quad (\text{III.6})$$

Ayant calculé RMR' et Q' le GSI se détermine comme suit :

$$\text{GSI} = \text{RMR}' - 5 \quad \text{si} \quad \text{RMR}' > 23$$

$$\text{GSI} = 9(\log Q' + 44) \quad \text{si} \quad \text{RMR}' \leq 23$$

L'estimation du GSI s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. Cet indice varie entre 5 et 85. Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité.

Tableau III.6: Estimation de GSI à partir d'une description géologique de la masse rocheuse

[27]

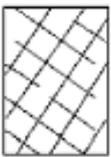
CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE		CONDITIONS DE SURFACE				
A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...] Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation.		TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses	BONNES Surfaces couleur de fer, rugueuses et légèrement altérées	MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées	PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux	TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage d'argile plastique
STRUCTURE		QUALITÉ DÉCROISSANTE				
	FRACTURÉE – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales	80				
	TRÈS FRACTURÉE – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales	70	60			
	FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec piliers et/ou failles		50	40		
	DÉSINTÉGRÉE – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis			30	20	10

Tableau III.7 : Qualité du massif rocheux selon la valeur du GSI [28]

Valeur du GSI	95-76	75-56	55-41	40-21	<20
Qualité du massif rocheux	Très bonne	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

III.6. Quelques Corrélation entre les différentes méthodes de classification

[29]

Des relations empiriques existent entre ces différents indices. BIENIAWSKI propose de relier le RMR et le (Tunnelling Quality Index Q) :

$$\text{RMR} = 9 \log Q + 44 \quad (\text{III.8})$$

De même, si la version 1989 de la classification RMR de BIENIAWSKI est utilisée, alors on peut estimer un GSI correspondant :

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{89} - 5 \quad (\text{III.9})$$

III.7. Conclusion

La classification géomécanique des massifs rocheux est un processus très important qui sert à déterminer leur stabilité, elle est faite à partir des données soigneusement et rigoureusement prises sur terrain, et d'après l'application des différents systèmes de classification, on arrive à juger la stabilité mécanique d'une masse rocheuse afin d'assurer la sécurité des travaux d'exécution d'ouvrages souterrains qui demeure le but ultime de ces études.

Chapitre IV
Aperçu Sur La
Méthode Des
Eléments Finis

IV.1. Introduction

Afin de vérifier la stabilité d'un ouvrage, en réactions avec son environnement, et de prévenir et contrôler les déplacements et les déformations des ouvrages et du sol, les contraintes totales et effectives dans le sol et les pressions interstitielles, les ingénieurs font recours aux méthodes numériques qui leur permettent d'évaluer le déplacement des particules qui constituent un massif, qui surviennent lors du creusement d'un ouvrage au sous-sol. Parmi ces méthodes, la plus généralement utilisée, est la méthode des éléments finis (MEF).

IV.2. Méthodes des éléments finis (MEF)

IV.2.1. Application de la MEF aux ouvrages souterrains [24]

La MEF est une méthode numérique décrivant les phénomènes physiques réels de l'ingénierie par des équations différentielles. Elle nécessite un grand nombre de calculs, la raison pour laquelle on s'adapte la programmation numérique (Logiciel) pour la résolution de ces équations, parmi les logiciels existants, on a opté pour PLAXIS 8.6.

L'analyse par la MEF consiste à diviser la structure physique à étudier, en composant des éléments finis, appelés éléments finis qui constituent le maillage. Ces éléments liés entre eux par un nombre de points appelés « nœuds ».

On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties, en tant qu'objet continu.

Cette méthode est récente, elle est d'un caractère pluridisciplinaire, elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

- La mécanique des milieux continus (MMC) : Elasticité, résistance des matériaux dynamique, plasticité...etc.
- L'informatique appliquée : Technique développement et de maintenance de grand logiciel ;
- L'analyse numérique : méthodes d'approximation, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs ...etc.

IV.2.2. Conception de base : Techniques de résolution

La MEF est basé sur deux principes fondamentaux : [30]

IV.2.2.1. La discrétisation

La MEF consiste à discrétiser le milieu continu réel à étudier, en sous-domaines réguliers imaginaires, appelés éléments finis, qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre fini de points dits “nœuds” (les sommets, les arrêtes des éléments). Ces points transmettent les efforts d’un élément à l’autre.

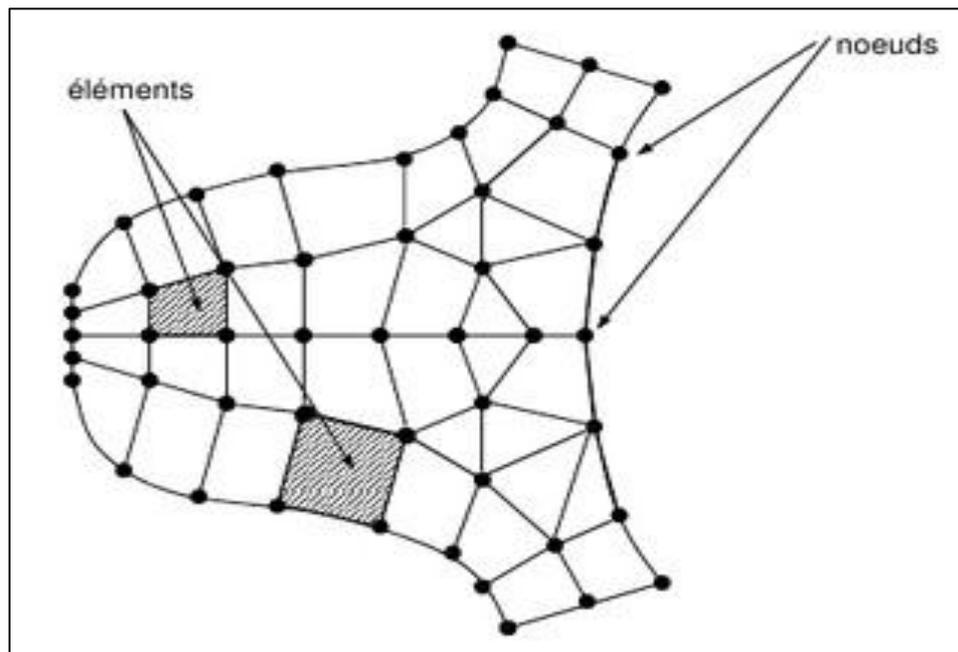


Figure IV.1 : Destruction d’une structure en élément. [31]

IV.2.2.2. Éléments géométriques

L’ensemble des éléments ou maillage doit constituer un recouvrement du domaine de calcul. En 1D, les éléments utilisés sont l’élément poutre et l’élément barre. En 2D, les éléments utilisés sont des triangles et des quadrangles. En 3D, des tétraèdres, des prismes, des cubes et parfois des pyramides.

Tableau IV.1 : Eléments géométriques utilisés dans le maillage. [4]

Eléments à une dimension				
		Linéaire	Quadratique	Cubique
Eléments à deux dimensions	Eléments triangulaires			
		Linéaire	Quadratique	Cubique
	Eléments quadrilatéraux			
		Linéaire	Quadratique	Cubique
Eléments trois dimensions	Eléments tétraédriques			
		Linéaire	Quadratique	Cubique
	Eléments hexaédriques			
		Linéaire	Quadratique	Cubique
	Eléments prismatiques			
		Linéaire	Quadratique	Cubique

IV.2.3. L'interpolation [6]

Le comportement de chaque élément est décrit par des équations algébriques, ces équations sont des équations d'équilibres des nœuds.

La qualité de champ de déplacement dans un élément est déterminée en fonction des déplacements des nœuds. En connectant les éléments ensemble, la qualité de champ devient interpolée sur l'entier de la structure.

Ces équations sont décrites sous forme matricielle par :

$$\{F\} = [K] \times \{\delta\} \tag{IV.1}$$

D'où :

- $\{F\}$: vecteur des chargements, (connu, ex : matrice des force nodales) ;
- $[K]$: matrice des constantes (connue, ex : matrice de rigidité) ;
- $\{\delta\}$: vecteur d'inconnus (valeur de la quantité de champ dans les nœuds, ex : vecteur des déplacements).

La résolution d'un problème de structure consiste à étudier trois champs vectoriels, ainsi que leur relation :

➤ Le champ de déplacement $U(x)$:

$$\dots\dots\dots U(x) = \begin{bmatrix} U(x & y & z) \\ V(x & y & z) \\ W(x & y & z) \end{bmatrix} \tag{IV.2}$$

➤ Le champ de déformation $\epsilon(x)$:

$$\dots\dots\dots \epsilon(x) = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \tag{IV.3}$$

➤ Le champ de champ de contrainte est noté par σ :

$$\dots\dots\dots \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} \tag{IV.4}$$

IV.2.4. L'utilisation de la MEF [28]

L'utilisation de la MEF, pour les excavations souterraines, s'avère très efficace. Cette méthode donne satisfaction pour vérifier le dimensionnement des ouvrages, vis-à-vis de leur résistance à la rupture. Elle permet de prendre en compte des géométries quelconques des couches de terrain.

Elle ne fait pas d'hypothèse a priori sur la cinématique de l'ouvrage de soutènement. Elle permet de représenter les interactions du soutènement avec d'autres composants de l'ouvrage ou avec des ouvrages avoisinants. Pour la modélisation des problèmes géotechnique complexes, la MEF nécessite :

- La définition de la géométrie du problème (pour que les frontières du calcul n'influencent pas les résultats)
- Le choix d'une loi de comportement du sol, de types Mohr coulomb ;
- Les caractéristiques mécaniques des ouvrages et des éléments d'interface et de soutènement et revêtement pour introduire l'interaction sol+structure ;
- Les conditions hydrauliques ;
- L'état initial des contraintes et des pressions interstitielles.

IV.2.5. Présentation du logiciel Plaxis

Le code calcul « PLAXIS » est un programme conçu pour analyser les déformations et la stabilité des ouvrages et du massif .il permet d'analyser des problèmes « élasto-plastique », « élasto-visco- plastique » en 2D et en 3D. Dont les modèles réels peuvent être représentés par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilisé une interface graphique permettent de générer un modèle géométrique et un maillage d'élément finis basé sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes : Input, Calculation, Output, Curves. [30]

a) Les options du code de calcul utilisées dans Plaxis

1) « Input »

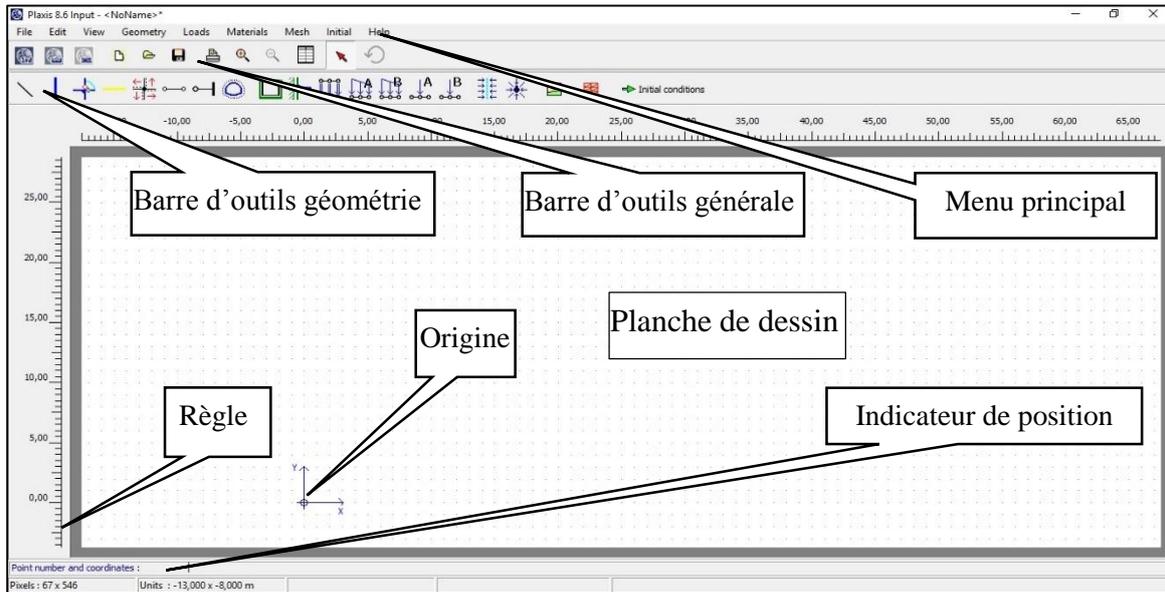


Figure IV.2 : Fenêtre d'outil Plaxis. [PLAXIS 8.6]

Input est dit pré-processing, il consiste à faire :

- **Une définition graphique et géométrique du modèle :** définition des couches, des ouvrages, des phases de construction et chargements et des conditions aux limites. Elle s'appuie sur des procédures graphiques faciles à utiliser, ce qui permet une description détaillée et précise des conditions réelles à modéliser ;
- **Une génération automatique du maillage :** le maillage d'éléments finis est généré à partir du modèle géométrique, avec des options pour le raffiner.

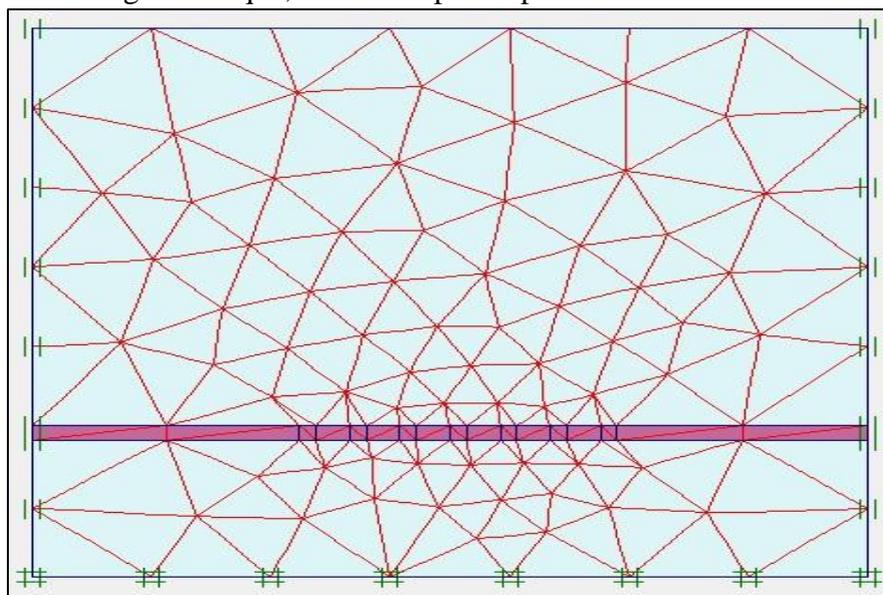


Figure IV.3 : Exemple de maillage. [Boîte de dialogue PLAXIS 8.6]

- **Les conditions aux limites :** Ce sont des déplacements nuls imposés. Ils peuvent être les directions. Une option permet d'appliquer les conditions d'appui standard valables dans la majorité des cas.
- **Un chargement :** deux systèmes de chargement indépendants sont proposés pour appliquer des forces ponctuelles ou des charges réparties. Les forces ponctuelles peuvent être appliquées à n'importe quel point de la géométrie. Les charges peuvent être réparties à n'importe quelle ligne de la géométrie sans se limiter à la seule frontière extérieure. Les valeurs des chargements peuvent être modifiées dans le mode "construction par étapes" et/ou par l'utilisation des multiplicateurs.
- **Introduire les propriétés des matériaux :**

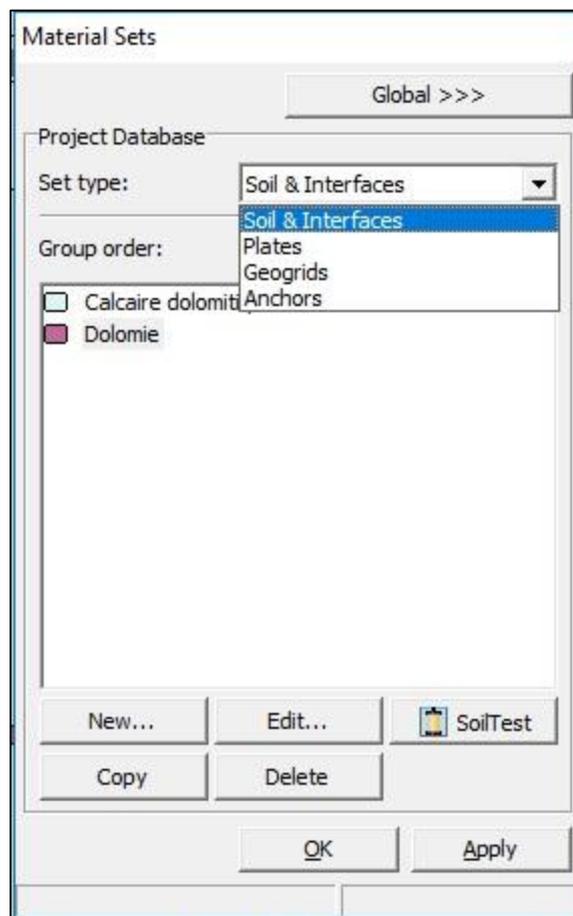


Figure IV.4 : Fenêtre de saisie des propriétés de matériaux. [Boîte de dialogue PLAXIS 8.6]

2) « Calculassions »

Le programme de calcul conduit à des analyses en déformation menées soit par un calcul plastique soit par un calcul de consolidation ou un calcul en grandes déformations. Pour chaque projet, plusieurs phases peuvent être définies avant le lancement des calculs. [6]

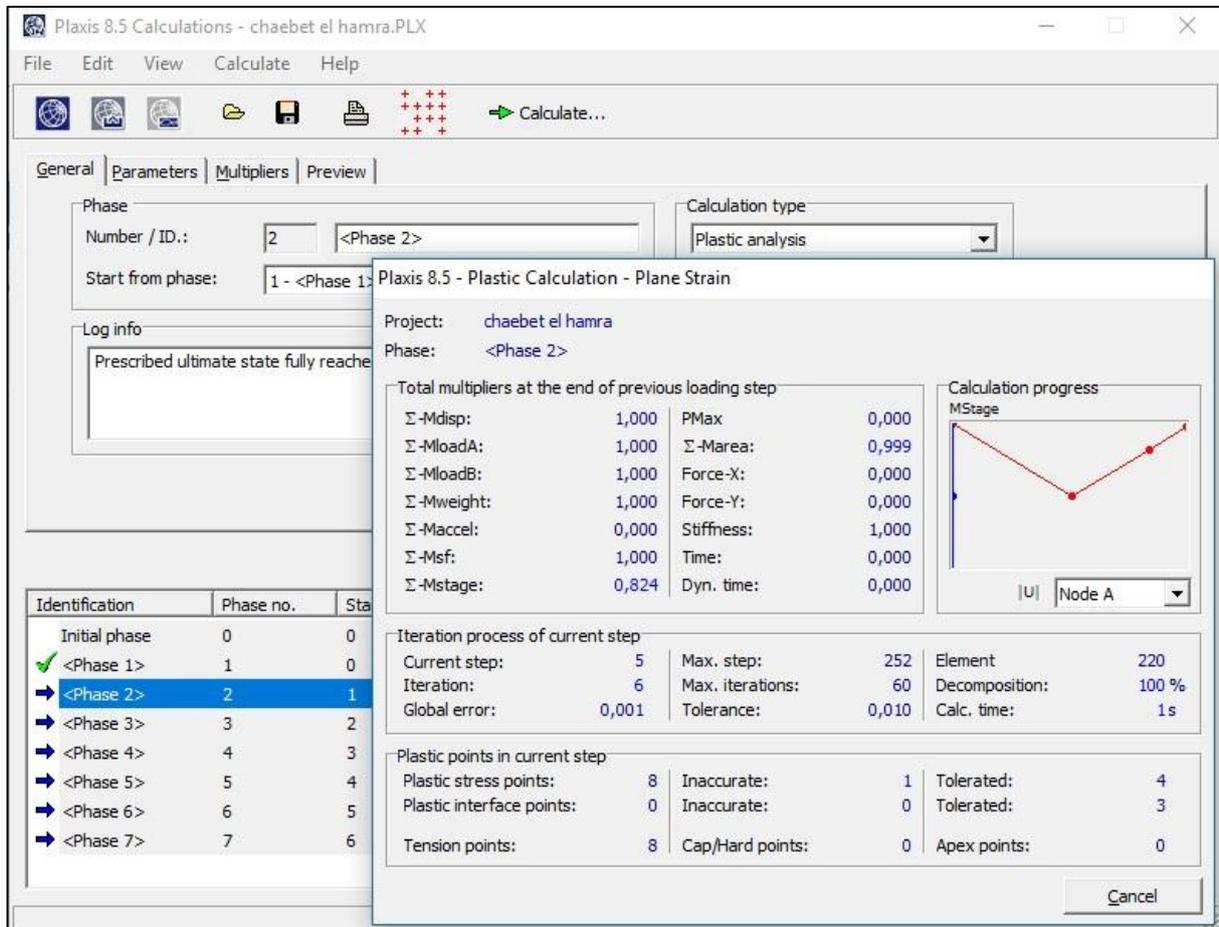


Figure IV.5 : Fenêtre de calcul. [Boîte de dialogue PLAXIS 8.6]

3) « Output »

Le post processus « Plaxis » a des fonctions graphiques pour estimer les résultats des calculs, les valeurs précises les déplacements, les forces et les contraintes. Ils sont accessibles sur des tableaux de résultats du module output.

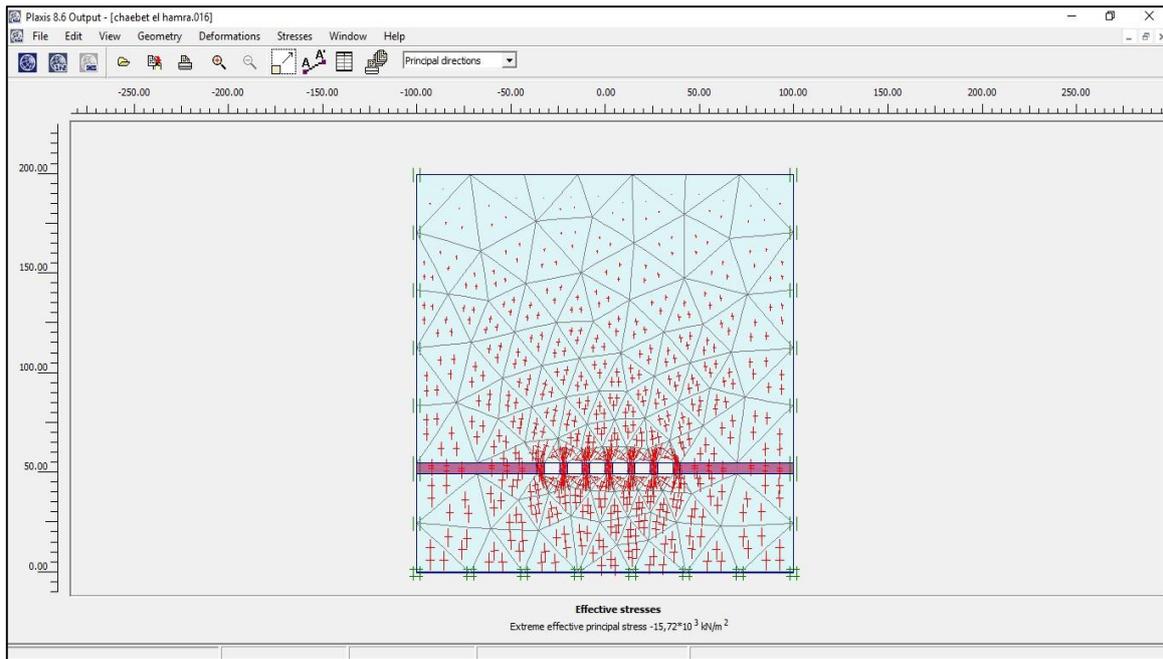


Figure IV.6: Fenêtre output. [Boîte de dialogue PLAXIS 8.6]

4) Curves

Sert à la construction des courbes de contrainte-déplacement et des chemins de contrainte.

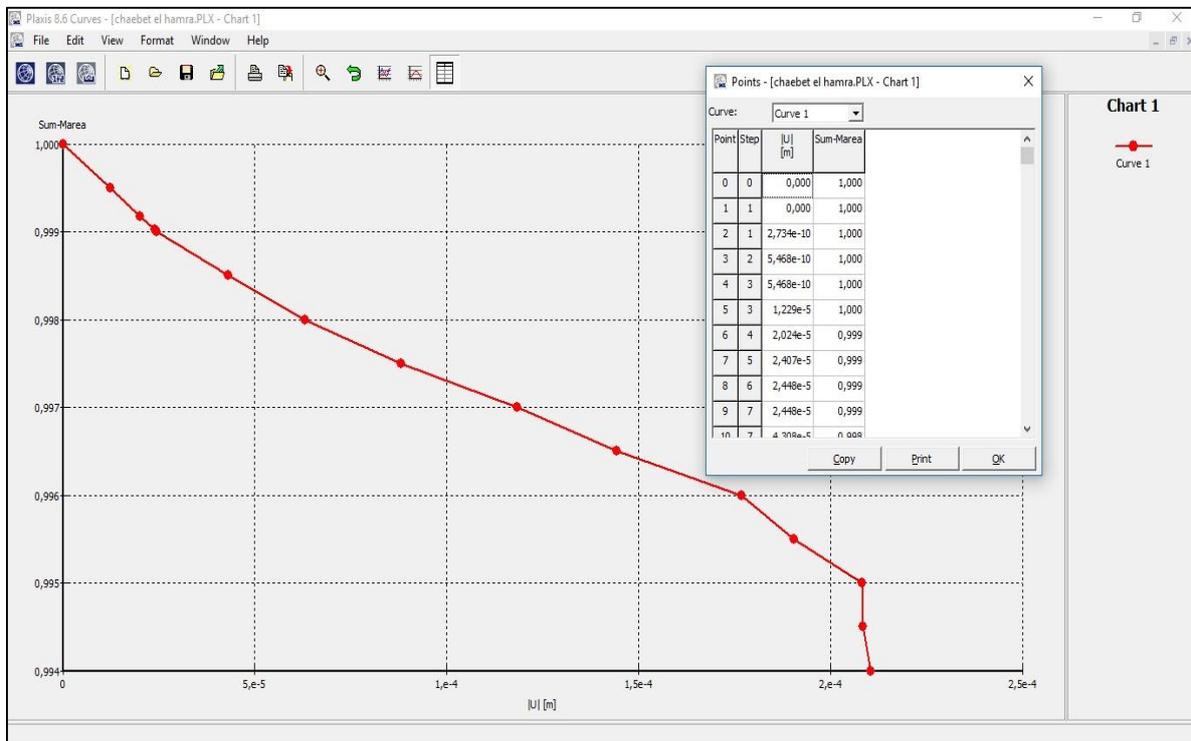


Figure IV.7 : Exemple d'une présentation graphique des résultats contrainte-déplacement.

[Boîte de dialogue PLAXIS 8.6]

IV.2.6. Le code PLAXIS 8.6 [6]

PLAXIS 8.6 est un logiciel géotechnique à les élément finis spécialement destinés à l'analyse des déformations et de la stabilité des projets des excavation en sous-sol. D'où les applications géotechniques nécessitent des lois de comportement complexe pour la simulation du comportement des sols et des roches, qui non linéaire, anisotrope et dépend du temps .de même, il est nécessaire de prendre en compte les pressions interstitielles, qu'elles soient hydrostatiques ou non.

Le logiciel est doté de fonctionnalité qui permet la modélisation de la structure et traiter toutes les interactions ente l'ouvrage et le sol (prévoir le comportement de l'ouvrage, un résumé des fonction essentielle).

IV.2.6.1. Les modèles de comportements utilisés dans Plaxis

Les propriétés d'un massif rocheux dépendent des propriétés de la roche constitutive (matrice), des propriétés des discontinuités (joints de stratification, diaclases et failles) et enfin de l'orientation et de la fréquence de ces discontinuités.

a) Modèle élastique linéaire

Ce modèle représente la loi de Hoek pour l'élasticité linéaire et isotrope. Il comporte deux paramètres de rigidité élastique : le module de Young (**E**) et le coefficient de poisson (**v**). Ce modèle est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol. Il peut être employé surtout pour modéliser les éléments de structures en béton ou en métal en interaction avec le sol. Il peut aussi être intéressant pour certains problèmes de mécanique des roches. [6]

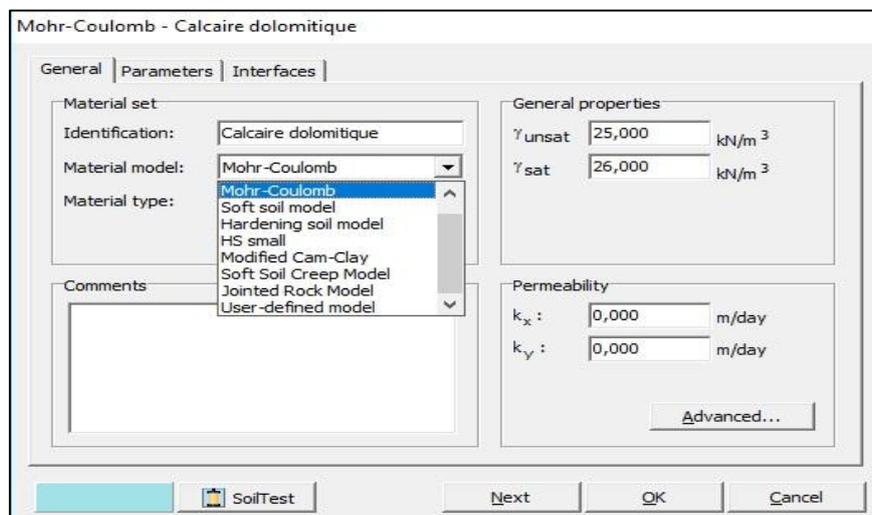


Figure IV.8 : Fenêtre des paramètres du modèle élastique linéaire. [PLAXIS 8.6]

b) Modèle de Mohr–Coulomb

Ce modèle présente un comportement élastique parfaitement plastique sans écrouissage. Il a une grande utilisation dans la géotechnique vu les résultats obtenus dans les calculs. Il comprend cinq paramètres mécaniques : E , ν (paramètres d'élasticité), ψ , c et ϕ (paramètres géotechniques), déterminés par des essais de laboratoire et ils sont nécessaires pour les calculs de déformation ou de stabilité. [33]

$$\tau = \sigma_n + \tan\phi + c \tag{IV.5}$$

Dans le plan de Mohr–Coulomb, la droite intrinsèque est représentée par :

- σ_n et τ : Sont respectivement les contraintes normales et tangentielles de cisaillement ;
- c et ϕ : Sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau.

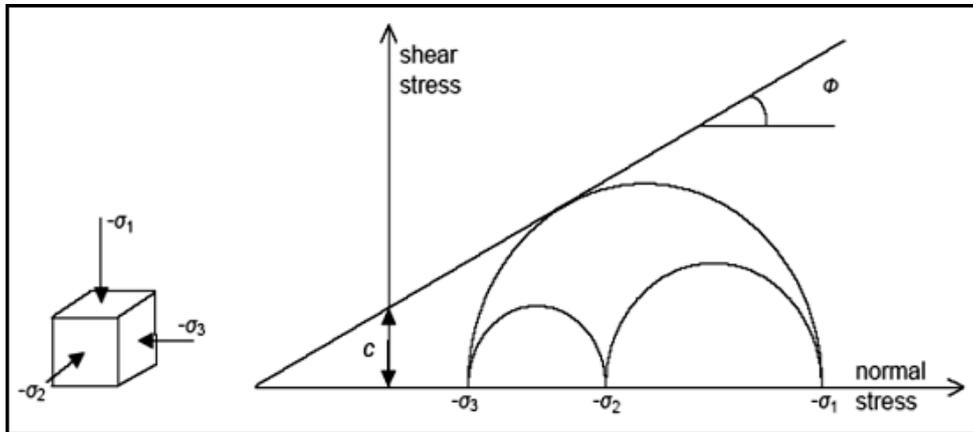


Figure IV.9 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb. [32]

➤ **Modèle de Young E**

Le module de Young varie en fonction de la déformation et de la contrainte moyenne. Dans le modèle de Mohr-Coulomb, le module est constant. Ce dernier nécessite des essais spéciaux. Il est conseillé de prendre un module moyen, par exemple celui correspondant à un niveau de 50 % du déviateur de rupture. [32]

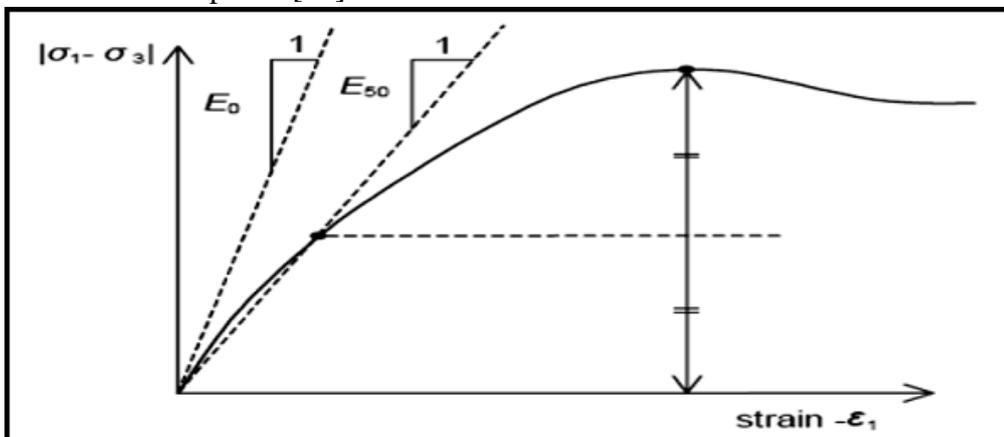


Figure IV.10 : Définition des modules E_0 et de E_{50} . [27]

➤ **Coefficient de Poisson (ν)**

Le comportement global d'un massif fracturé est fortement anisotrope. Toutefois l'anisotropie de la matrice rocheuse est relativement faible et négligeable par rapport à celle qui est induite par la présence des fractures. Pour cette raison, nous admettons que le comportement de la roche est isotrope et caractérisé par un module de Young E et un coefficient de poisson ν .

Les valeurs du coefficient de Poisson se situent entre 0.2 et 0.4. [31]

➤ **Angle de frottement (ϕ)**

Plaxis ne prend pas en compte une variation d'angle de frottement avec la contrainte moyenne. Il peut être celui de frottement de pic ou celui de frottement du palier. On peut le déterminer à partir de la courbe intrinsèque du modèle de Mohr-Coulomb. [31]

➤ **La cohésion (C)**

Les roches sont beaucoup plus cohésives que les sols, mais il existe des différences importantes de la valeur de la cohésion entre les types de roches, par exemple entre le granite et la craie. Le degré d'altération de la roche est un facteur à prendre en compte.

La cohésion est également en fonction de la présence de discontinuités. En effet, ces dernières sont les points faibles d'une roche et en déterminent fortement la résistance au cisaillement. Ainsi, lorsque de la présence des discontinuités, la résistance au cisaillement d'une roche sera dépendante de la résistance au cisaillement des joints de ces discontinuités et non de celle de la matrice. [31]

➤ **Angle de dilatance (ψ)**

C'est le paramètre le moins courant. Il peut cependant être facilement évalué par la règle suivante :

ϕ	>30	<30
ψ	$\phi-30$	0

- Le cas où $\psi < 0^\circ$ correspond à des sables très lâches ;
- La valeur $\psi = 0^\circ$ correspond à un matériau élastique parfaitement plastique ou il n'y a pas de dilatance lorsque le matériau atteint la plasticité, c'est souvent le cas pour les argiles ou pour les sables de densité faible ou moyenne sous contraintes assez fortes. [27]

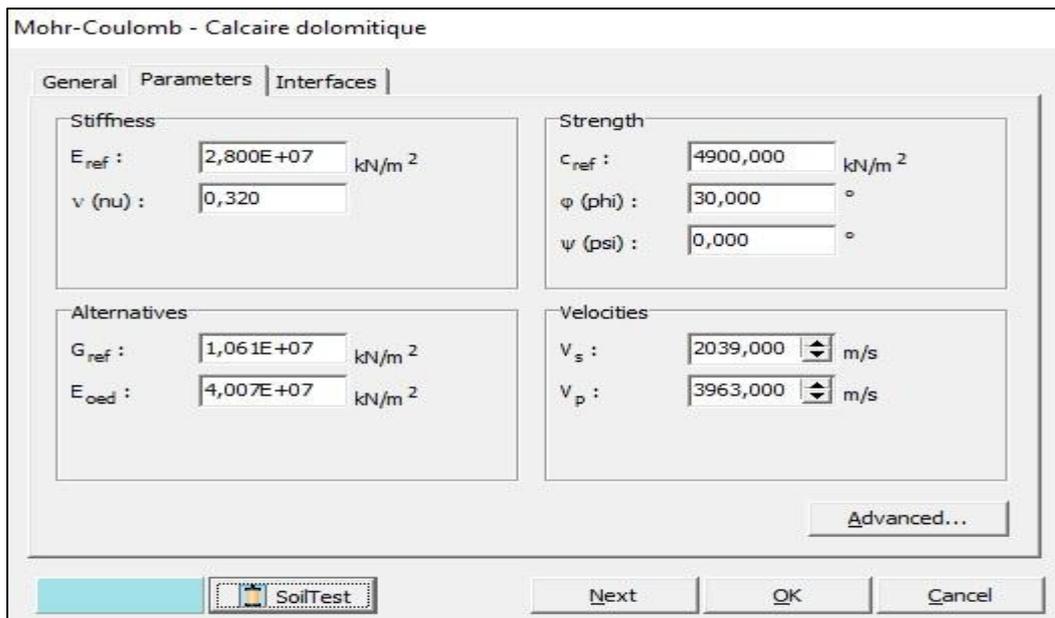


Figure IV.11 : Fenêtre des paramètres de Mohr-Coulomb. [PLAXIS 8.6]

IV.2.6.2. Calcul du coefficient de sécurité (Phi-c-réduction)

Le processus Phi-C-Réduction constitue un type de calcul à part entière. Il s'effectue en réduisant les paramètres de résistance du massif, il doit être sélectionné lorsque l'utilisateur souhaite avoir un coefficient de sécurité globale pour une situation donnée. [6]

IV.3. Conclusion

Les méthodes numériques, qui permettent la simulation de construction des ouvrages souterrains sont nombreuses. La MEF est nous permet d'étudier la stabilité des excavations souterraines, puisqu'elle traite le massif rocheux comme un milieu discontinu.

Vu la complexité de calcul par cette méthode, le code de calculs « PLAXIS 8.6 » est l'un des programmes qui nous permettent de résoudre ce type de problèmes.

Chapitre V

Application Des Systèmes de Classification Et Modélisation de La Zone D'Etude

V.1. Introduction

Afin de classier le massif de la mine de Chaâbet El-Hamra et de vérifier sa stabilité ainsi que la nécessité d'utilisation d'un soutènement au niveau des ouvrages souterrains de la mine, une évaluation des paramètres géotechniques ; RMR, GSI et Q-système sera exposé, cette évaluation s'appuie sur des données et mesures obtenues sur terrain pendant notre stage pratique. Nous essayerons de confirmer cette évaluation par une modélisation numérique à l'aide du logiciel « PLAXIS 8.6 ».

V.3. Classification géomécaniques du massif de Chaâbet El-Hamra

Dans cette partie, on applique les formules des systèmes de classification à partir des mesures des différents paramètres obtenus sur terrain lors du stage pratique. Ces mesures sont résumées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau V.1 : Mesures de la Recoupe II - Profil 13, bloc B5-3 - ↗ Travaux NW

	Orientation	Epaisseur	Espacement(cm)	Rugosité	Altération	Remplissage
1	N135-70NE	2(mm)	(1-2) 57	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
2	N130-70NE	2(mm)	(2-3) 11	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
3	N135-70NE	3(mm)	(3-4) 06	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
4	N135-70NE	5(mm)	(4-5) 08	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
5	N135-70NE	3(mm)	(5-6) 10	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
6	N135-70NE	2(mm)	(6-7) 27	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
7	N135-70NE	5(mm)	(7-8) 17	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
8	N135-70NE	4(mm)	(8-9) 26	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
9	N135-70NE	5(mm)	(9-10) 82	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
10	N135-70NE	2(mm)	(10-11) 35	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
11	N135-70NE	4(mm)	(11-12) 38	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
12	N150-87NE	20(cm)	(12-13) 57	Légèrement rugueuse	Non altéré	Dolomie(B) +Argile
13	N135-70NE	10(mm)		Lisse	Non altéré	Calcite

Humidité → Milieu sec
Dimensions → L= 4m H= 2.8m

L'observation du front de taille de la recoupe II- profil 13, bloc B5-3, nous montre la présence de 13 discontinuités d'une même famille, ces discontinuités ont des espacements qui varient de 8cm à 82cm, elles sont caractérisées par une rugosité légère, des parois non altérées avec un remplissage cimenté en calcite.



Figure V.1 : Front de taille-Recoupe II- Profil 13, bloc B5-3 (Chaâbet El-Hamra)

Tableau V.2 : Galerie - profil 13 - bloc B5-3 ↗ Travaux NW

	Orientation	Epaisseur	Espacement(cm)	Rugosité	Altération	Remplissage
1	N130-70NE	0(mm)	(1-2) 48	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
2	N130-70NE	2(mm)	(2-3) 46	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
3	N130-70NE	2(mm)	(3-4) 40	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
4	N130-70NE	10(mm)	(4-7) 39	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
5	N130-70NE			Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
6	N130-70NE			Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
7	N130-70NE	10(mm)	(7-8) 16	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite

8	N130-70NE	10(mm)	(8-9) 16	Légèrement rugueuse	Non altéré	Calcite
9	N130-70NE	15(mm)	(9-10) 28	Légèrement rugueuse	Non altéré	Quartz+calcite
10	N130-70NE	20(mm)		Légèrement rugueuse	Non altéré	Quartz+calcite

L'observation du front de taille d'une galerie au niveau du profil 13, bloc B5-3, nous montre la présence de 10 discontinuités qui ont la même orientation que celles au niveau de la Recoupe II, ces discontinuités ont des espacements qui varient de 16cm à 48cm, elles sont caractérisées par une rugosité légère, des parois non altérées avec un remplissage cimenté en calcite, et parfois quartzitique.

Figure V.6 : Front de taille-Galerie- Profil 13, bloc B5-3 (Chaâbet El-Hamra)



Figure V.2 : Front de taille-Galerie- Profil 13, bloc B5-3 (Chaâbet El-Hamra)

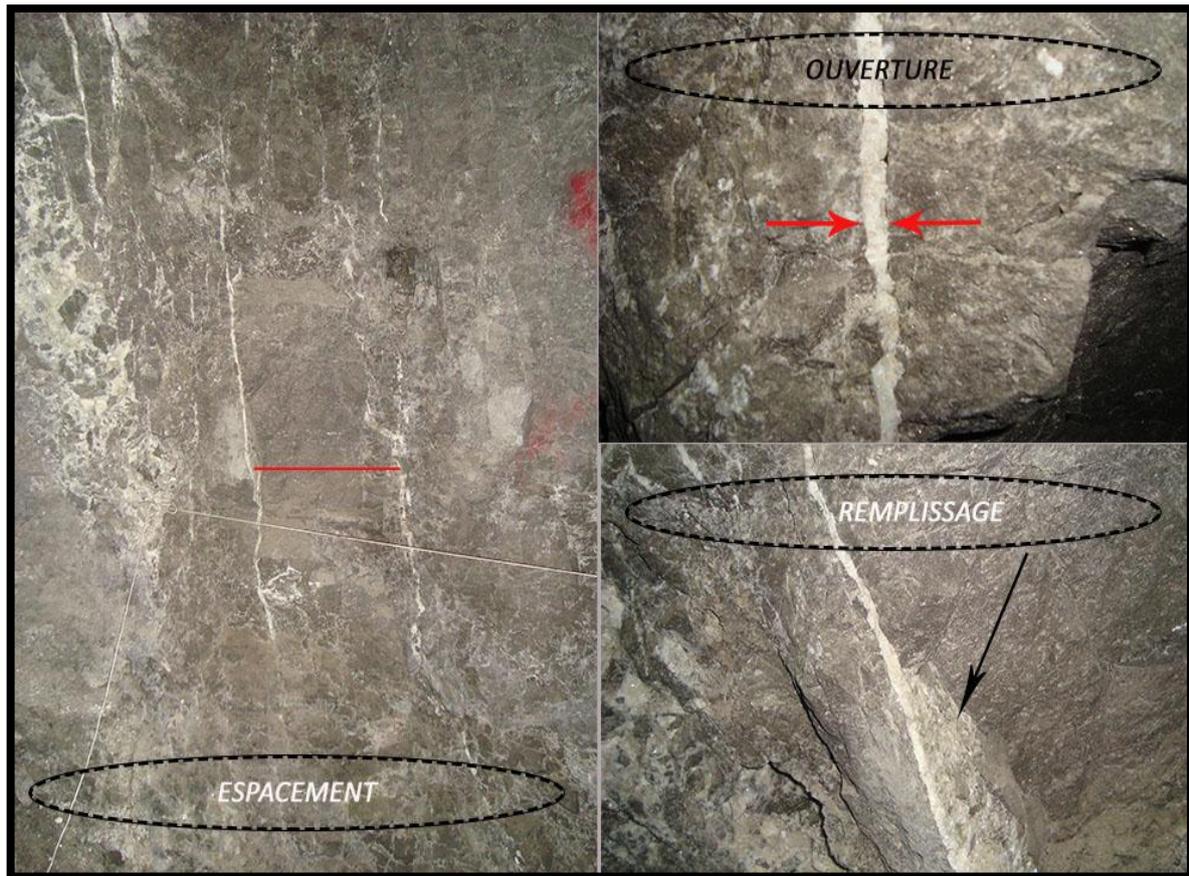


Figure V.3: Quelques descriptions des discontinuités (Chaâbet El-Hamra)

V.3.1. Classification selon le RMR

$$RMR = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + B$$

Les résultats de la classification géomécaniques de BIENIAWSKI (RMR) la recoupe II - Profil 13 - ↗ Orientation SE sont les suivantes :

Tableau V.3.1 : Classification selon RMR.

A		Valeur	Note	
A1	1 : La résistance à la compression uniaxiale (MPa)	97	7	
A2	2 : Rock Quality Designation RQD (%)	97	20	
A3	3 : Espacement des discontinuités (mm)	200-600	10	
A4	4 : Conditions des Discontinuités	Continuité (m)	3-10	3
		Ouverture (mm)	<5	1
		Rugosité	Légèrement rugueuse	3
		Remplissage (mm)	<5	4
		Degré d'altération	Non	6
A5	5 : Les eaux souterraines	Sec	15	
RMR définitif		69		
Description		Bon Rocher		
Classe du rocher		II		

Les résultats de la classification géomécaniques de BIENIAWSKI (RMR) la Galerie - Profil 13 - ↗Orientation SE sont les suivantes :

Tableau V.3.2 : Classification selon RMR.

A		Valeur	Note	
A1	1 : La résistance à la compression uniaxiale (MPa)	97	7	
A2	2 : Rock quality designation RQD (%)	95	20	
A3	3 : Espacement des discontinuités (mm)	200-600	10	
A4	4 : Conditions des discontinuités	Continuité (m)	3-10	3
		Ouverture (mm)	<5	1
		Rugosité	Légèrement rugueuse	3
		Remplissage	<5	4
		Degré d'altération	Non	6
A5	5 : Les eaux souterraines	Sec	15	
RMR définitif		69		
Description		Bon Rocher		
Classe du rocher		II		

Selon la classification RMR pour les deux ouvrages : (classe II)

V.3.2. Classification selon le Q-Barton

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

Les résultats de la classification géomécaniques de Barton (Q-system) de la recoupe II - profil 13- ↗ Orientation SE

Tableau V.4.1 : Classification selon Q-system.

Paramètres	Note
RQD	95.73
Jn	2
Jr	2
Ja	0.75
Jw	1
SRF	1
Q-system	127.64
Classe du rocher	Extrêmement bonne

Les résultats de la classification géomécaniques de Barton (Q-system) de la galerie - profil 13- ↗ Orientation SE

Tableau V.4.2 : Classification selon Q-system.

Paramètres	Note
RQD	97.08
Jn	2
Jr	2
Ja	0.75
Jw	1
SRF	1
Q-system	129.33
Classe du rocher	Extrêmement bonne

V.3.3. Classification selon le Geological Strength Index (GSI)

Pour déterminer le GSI il faut calculer (RMR') & (Q') :

$$RMR' = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + 15$$

$$Q' = \frac{RQD}{Jn} \times \frac{Jr}{Ja}$$

Après le calcul de RMR' et Q'. Le GSI se détermine comme suite :

Si $RMR' > 23$  $GSI = RMR' - 5$

Si $RMR' \leq 23$  $GSI = 9(\log Q' + 44)$

Les résultats de la classification géomécaniques selon le Geological Strength Index (GSI) de la recoupe II - profil 13- ↗ Orientation SE

Tableau V.5.1 : Classification selon GSI.

Paramètres		Valeur
RMR'		69
Q'		127.64
GSI	GSI = RMR' - 5	64
Classe de la roche		Bon Rocher

Les résultats de la classification géomécaniques selon le Geological Strength Index (GSI) de la galerie - profil 13- ↗ Orientation SE

Tableau V.5.2 : Classification selon GSI.

Paramètres		Valeur
RMR'		69
Q'		129.33
GSI	GSI = RMR' - 5	64
Classe du rocher		Bon Rocher

V.4. Modélisation numérique de la zone d'étude avec Plaxis 8.6

Sur cette partie, on a opté pour une modélisation numérique avec le logiciel Plaxis 8.6 grâce à une approche numérique, afin de pouvoir vérifier et confirmer les résultats obtenus par l'application des formules des systèmes de classification géomécanique sur le massif de Chaâbet- El- Hamra.

V.4.1. Description de zone d'étude

La partie prise pour projeter les calculs se trouve dans le profil 13 bloc **B5-3**, la zone d'étude est l'ensemble des chambres et des piliers de section $(8 \times 3) \text{ m}^2$ et $(4 \times 3) \text{ m}^2$ respectivement, creuser dans la couche minéralisée.

La couverture du terrain encaissant au-dessus de cette zone est d'environ 150 m.

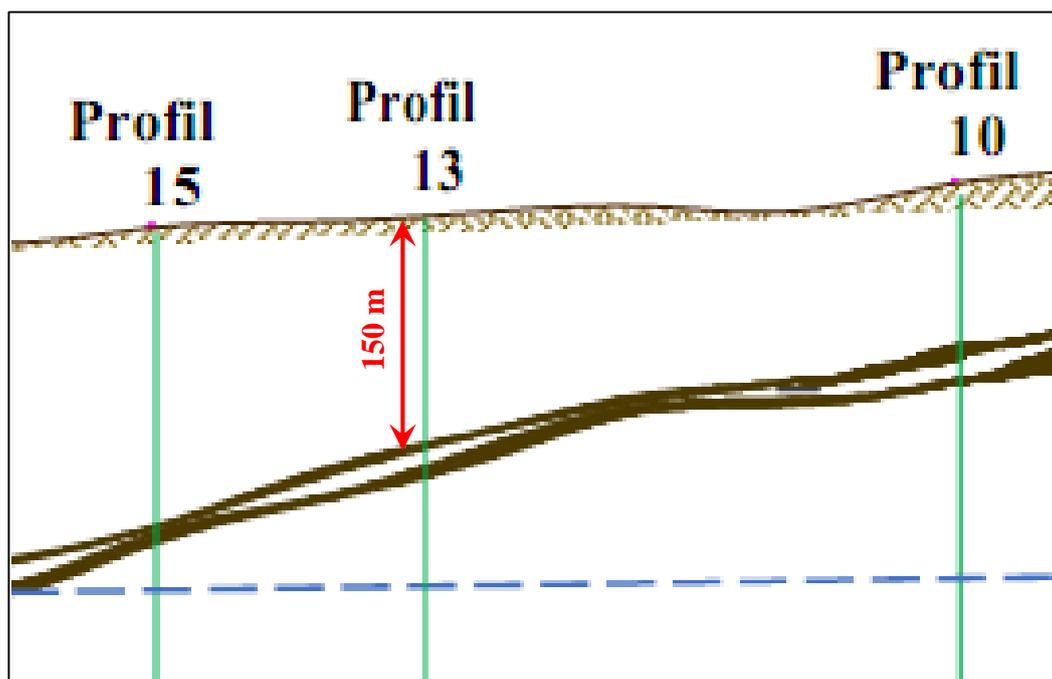


Figure V.4: Coupe longitudinale au niveau de profil 13. [34]

V.4.2. Présentation de la procédure de simulation

V.4.2.1. Caractéristiques géométriques du massif

Le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb a été choisi pour la simulation de notre projet. Il sera modélisé par un modèle géométrique 2D. Il mesure 200 m de largeur sur 200 m de profondeur.

La géologie du site est composée principalement de deux types des roches, le calcaire dolomitique et la dolomie. Ce modèle est présenté sur la figure suivante :

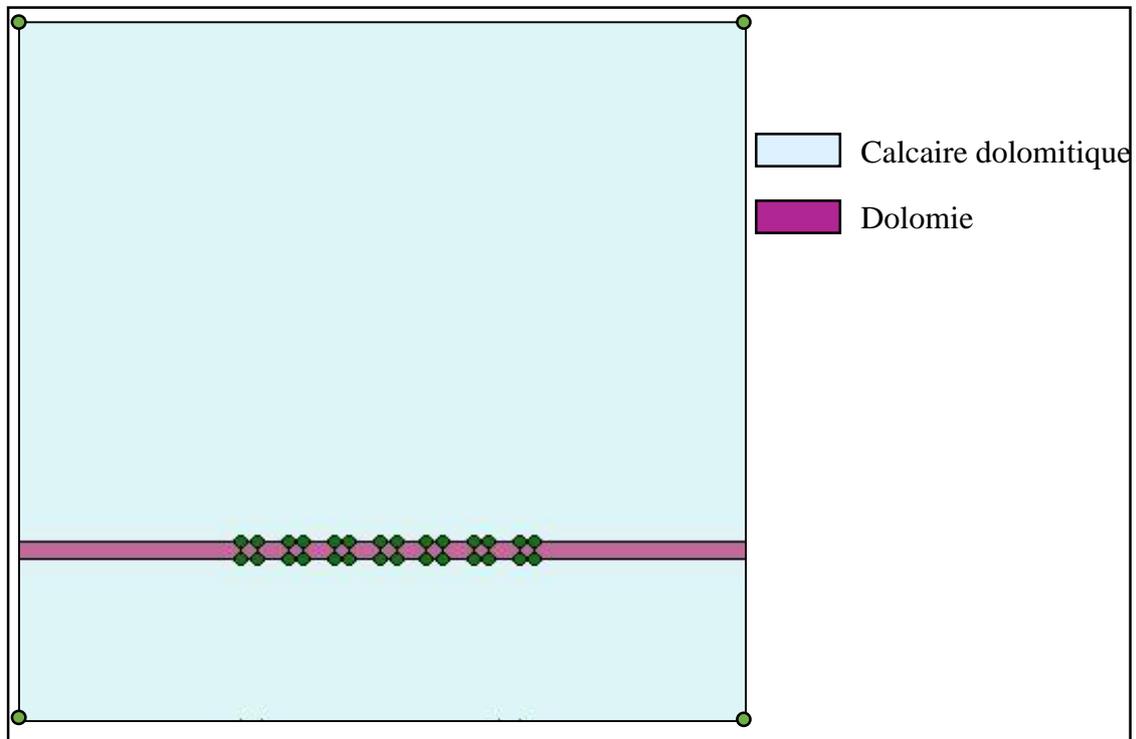


Figure V.5: La coupe transversale du massif. [Boite de de dialogue de PLAXIS 8.6]

Tableau V.6 : Paramètres géotechniques du sol

Paramètres du sol	Désignation	Calcaire dolomitique	Dolomie
Poids volumique apparent	γ_{unsat} [KN/m ³]	25	29
Poids volumique saturé	γ_{sat} [KN/m ³]	26	30
Module d'Yong	E [MPa]	28×10^6	45×10^6
Cohésion	C [MPa]	49×10^2	51.92×10^2
Coefficient de poisson	N	0.3	0.3
Angle du frottement interne	φ°	30	35
Angle du dilatation	Ψ°	0	0

V.4.2.2. Géométrie de la section à étudier

Les dimensions de la section à étudier sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau V.7 : Géométrie de la section à étudier.

Section	Nombre	Hauteur (m)	Largeur (m)	Surface (m ²)
Chambre	6	3	8	24
Pilier	7	3	4	12

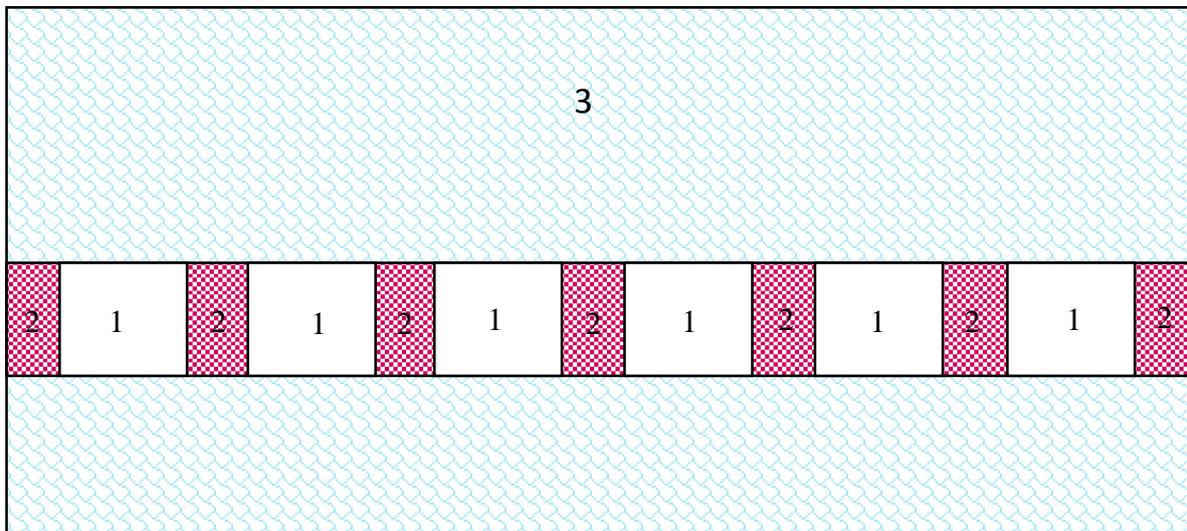


Figure V.6: Modèle géométrique.

1-Chambres, 2-Piliers, 3-Roche encaissante.

V.4.3. Modélisation numérique

V.4.3.1. Conditions aux limites

Pour tenir compte de l'évolution des déplacements avec la profondeur et minimiser l'influence des conditions aux limites, le front du modèle numérique est bloqué dans les trois directions (X, Y, Z), en utilisant la fonction « Standard Fixities ».

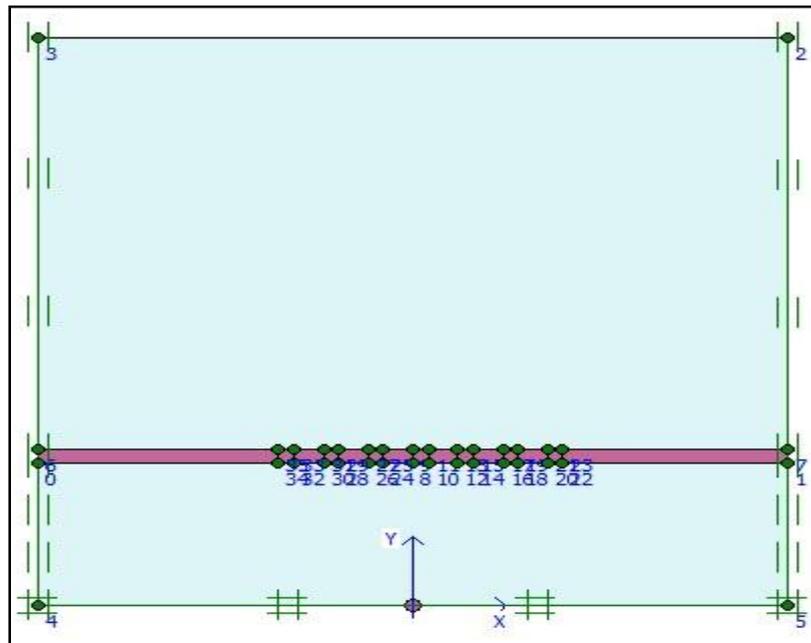


Figure V.7: Génération des conditions aux limites [Boîte de dialogue de PLAXIS 8.6].

Le maillage est généré en 2D dans un plan (OXY), Le maillage se fait par des éléments à 15 nœuds, et notre ensemble (sol + structure) est constitué 819 d'éléments et 1821 de nœud. Le logiciel effectue les calculs des contraintes sur 2640 points.

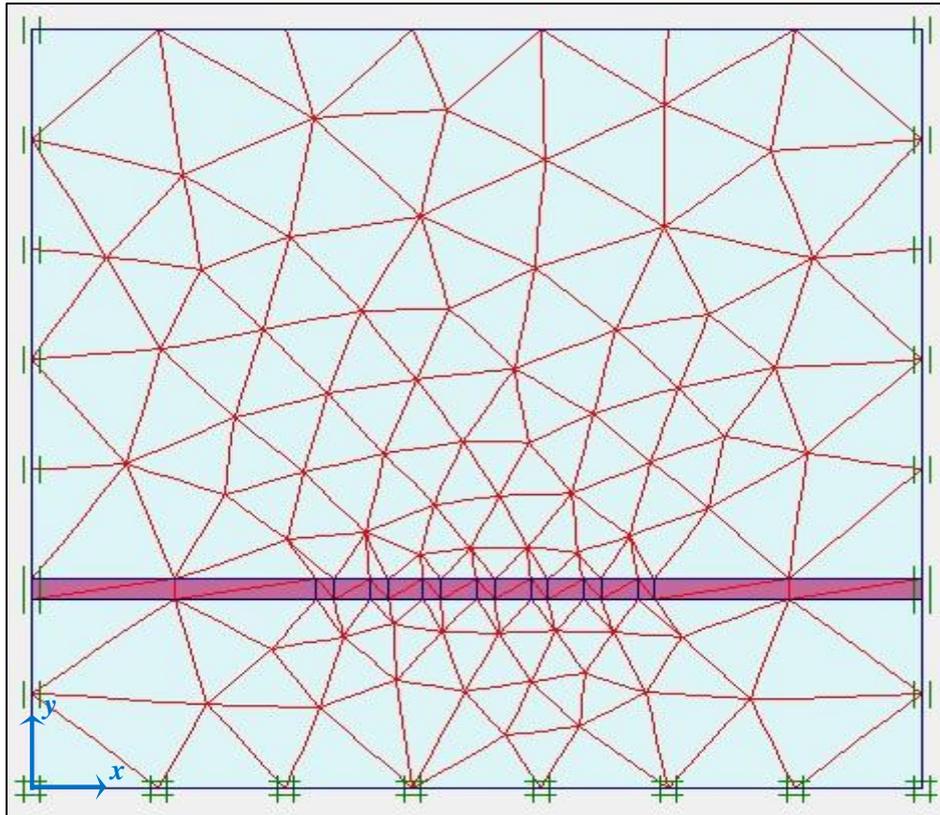


Figure V.8: Génération du maillage en 2D [Boîte de dialogue de PLAXIS 8.6]

V.4.3.2. Conditions initiales

On doit spécifier les conditions initiales constituées de deux modes différents :

a) Le premier mode est pour gérer la pression interstitielle initiale (condition hydraulique).

- Aucune nappe n'indique au niveau de la zone du tunnel.
- Le poids volumique de l'eau : $\mathbf{W}_{\text{water}} = 10 \text{KN/m}^3$;
- Ce paramètre permet de distinguer les contraintes effectives et pressions interstitielles ;
- La pression interstitielle $P = 0.00 \text{KN/m}^2$.

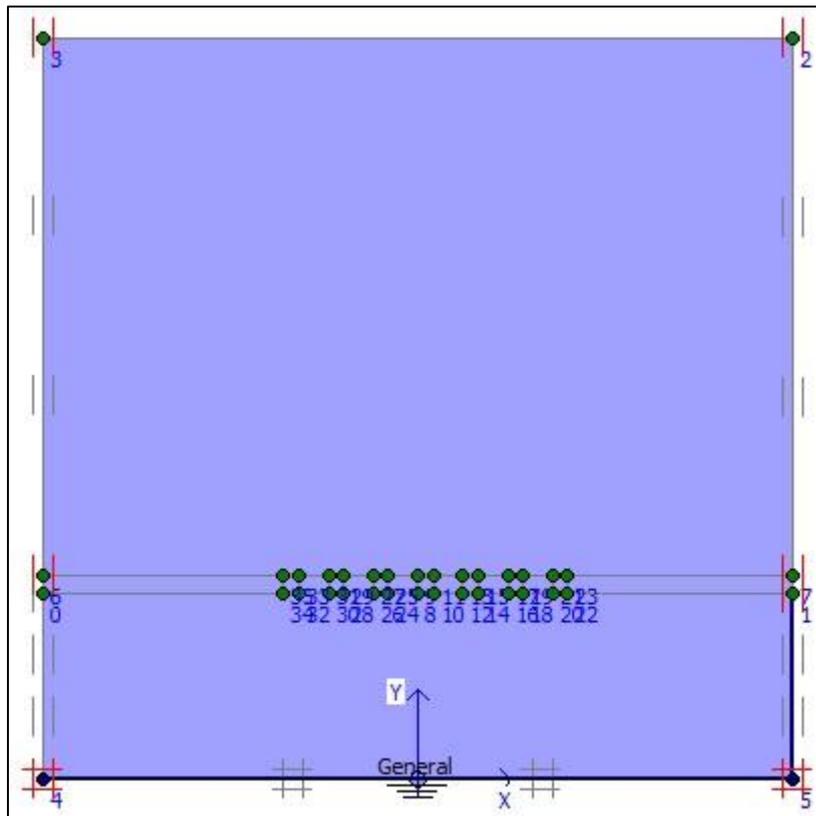


Figure V.9: conditions hydrauliques [Boite de de dialogue de PLAXIS 8.6 Input].

b) L'autre est pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effective

- La contrainte effective maximale $\sigma_{\text{eff}} = 5 \times 10^3 \text{ KN/m}^2$.

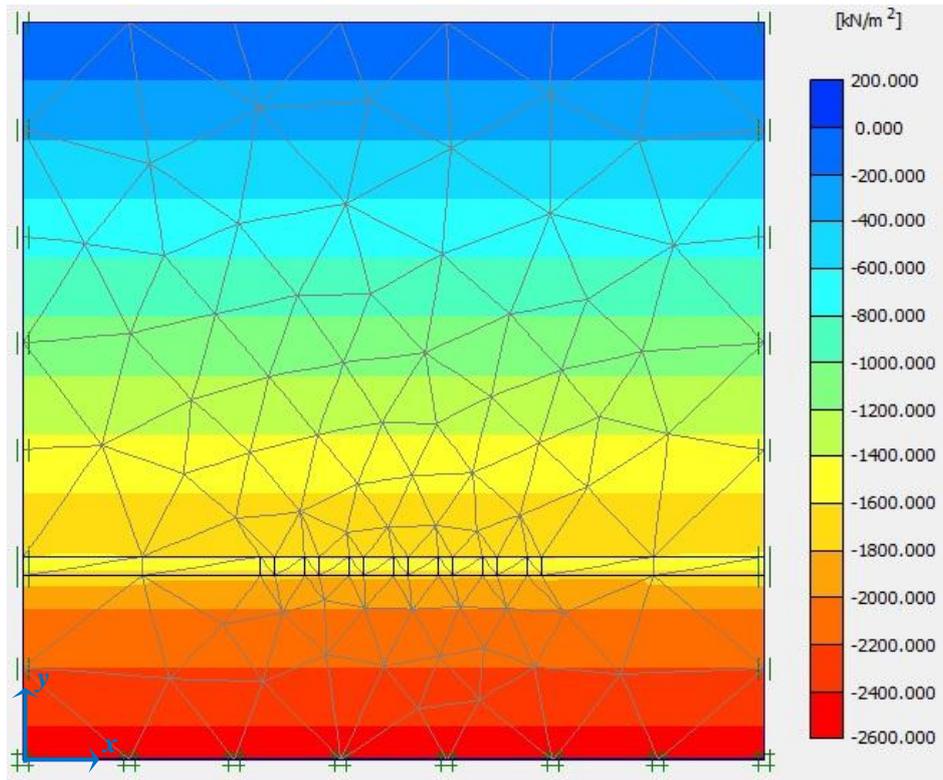


Figure V.10: le champ des contraintes effectives [Boite de dialogue PLAXIS 8.6 Input]

➤ Le coefficient de pression du terre $K_0 = \sigma_h / \sigma_v \rightarrow K_0 = [0.426 \rightarrow 0.5]$.

σ_h : les contraintes horizontale ;

σ_v : les contraintes verticales .

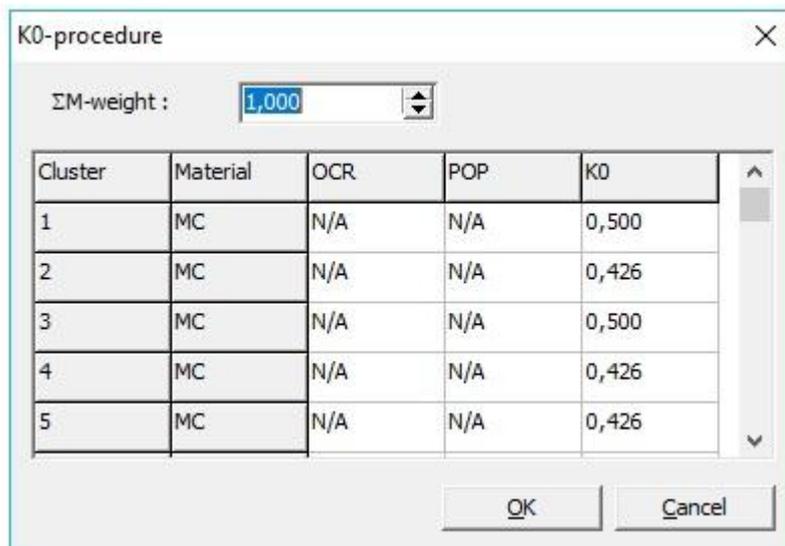


Figure V.11: Le coefficient de pression du terre K_0 [Boite de dialogue PLAXIS 8.6 Input]

V.4.3.3. Exécution de l'excavation des chambres

Après avoir introduit tous les paramètres de l'ensemble (sol+structure), on lance l'application des calculs « calculation » : les calculs se font selon plusieurs phases, chacune représente un pas d'avancement.

- Phase 1 : L'état initial.
- Phase 2 : L'excavation d'une chambre de section verticale (8×3) m².
- Phase 3 : L'excavation d'une autre chambre de même section verticale, donc on a deux chambres avec un pilier entre elles de section verticale (4×3) m².
- Phase 4 : L'excavation d'une 3^{ème} chambre, toujours avec un pilier entre la 2^{ème} et la 3^{ème} chambre de même section verticale.
- Phase 5 : L'excavation d'une 4^{ème} chambre, toujours avec un pilier entre la 3^{ème} et la 4^{ème} chambre de même section verticale.
- Phase 6 : L'excavation d'une 5^{ème} chambre, toujours avec un pilier entre la 4^{ème} et la 5^{ème} chambre de même section verticale.
- Phase 7 : L'excavation d'une 6^{ème} chambre, toujours avec un pilier entre la 5^{ème} et la 6^{ème} chambre de même section verticale.

V.4.3.4. Les différentes phases du calcul

Les différentes phases du calcul sont représentées au figure IV. ? ci-dessous :

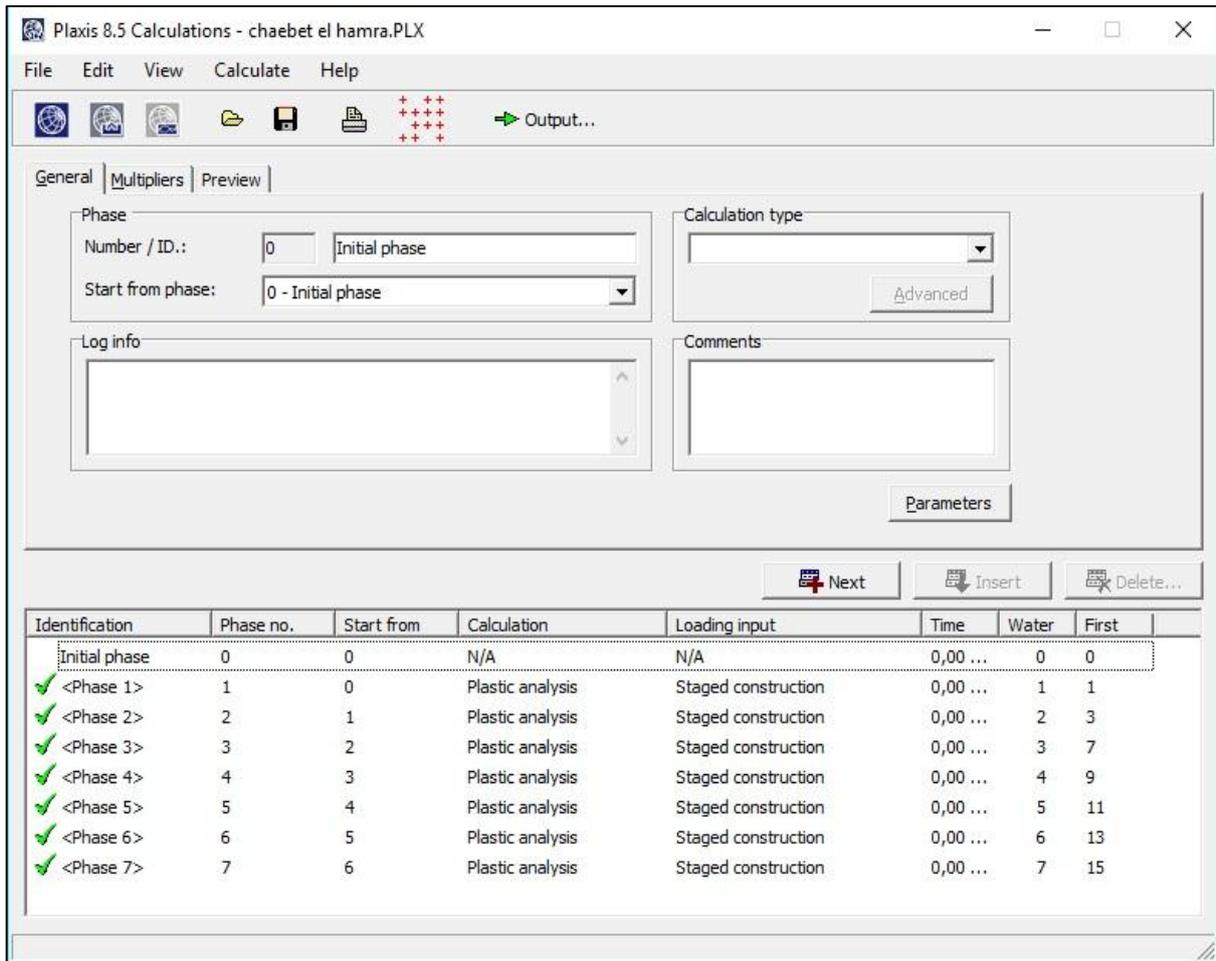


Figure V.12: Phases des calculs [Boite de dialogue PLAXIS 8.6 Input]

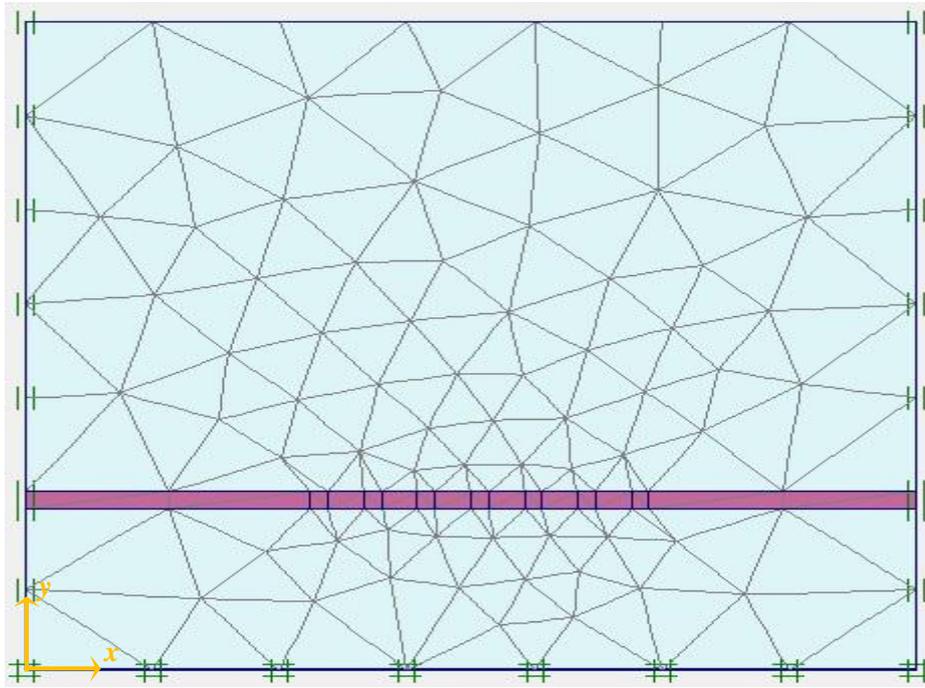
V.4.4. Calcul de la déformation (déplacements) dus à l’excavation des chambres

Le calcul des déformations se fait d’une manière itérative, pour chaque chambre excavée, et suivent les deux axes (OX, OY), pour qu’on obtienne à la fin, la valeur du déplacement total du massif, et celles des contrainte effectives et réelles.

Dans notre étude, nous nous intéressons à interpréter les résultats obtenus pour les phases 1, 3, 5 et 7 pour décrire les mouvements horizontaux (OX) et verticaux(OY).

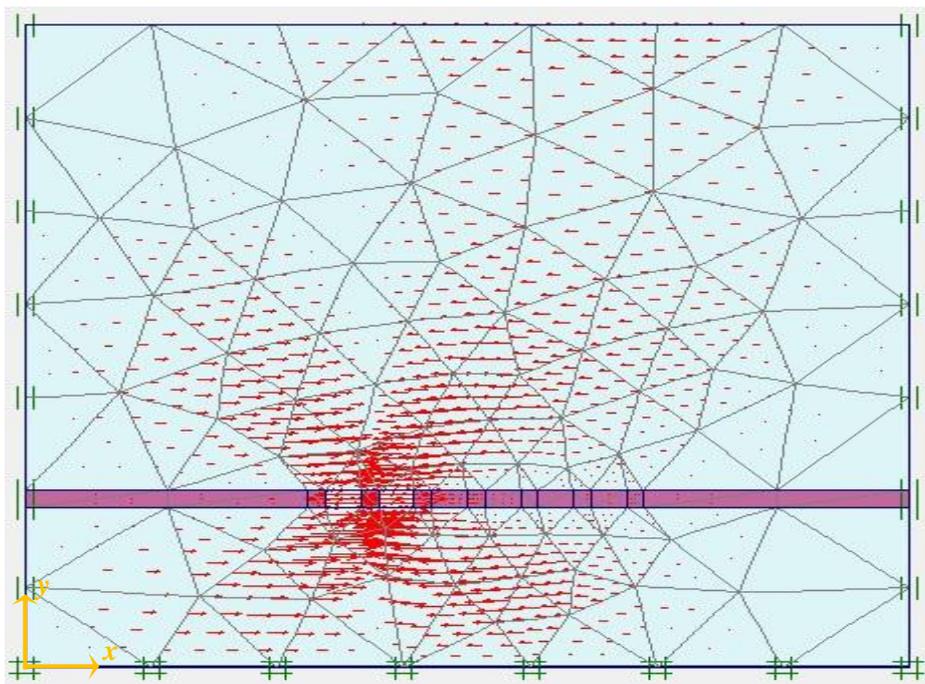
V.4.4.1. Calcul et comparaison des déplacements horizontaux (U_x) entre les phases choisies

Phase 1:



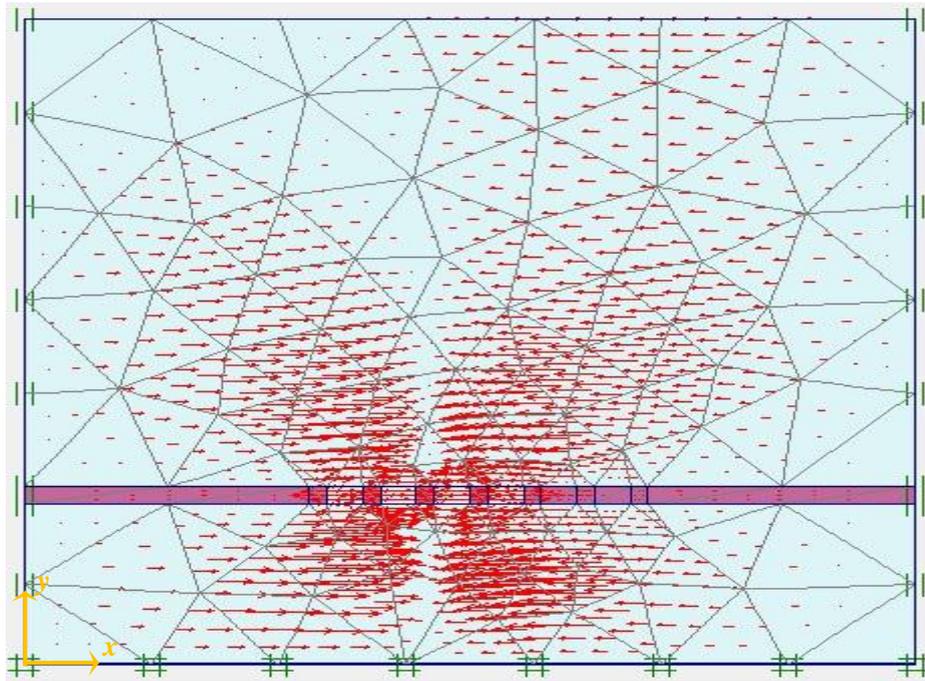
$$U_x = 386.23 \times 10^{-12} \text{ m}$$

Phase 3:



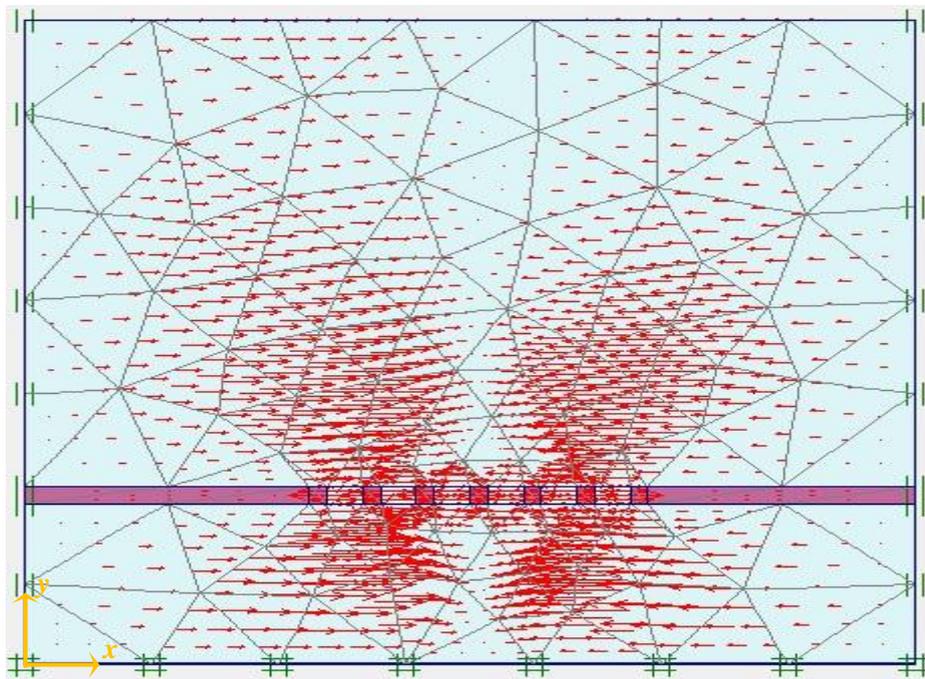
$$U_x = 159.4 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Phase 5:



$U_x = 171.14 \times 10^{-6} \text{ m}$

Phase 7:

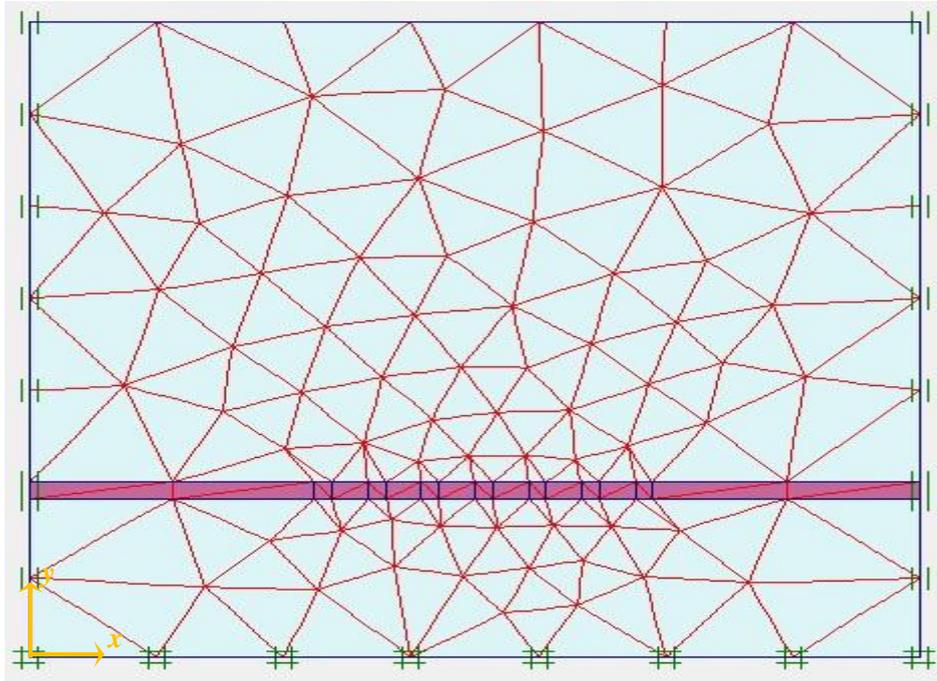


$U_x = 180.56 \times 10^{-6} \text{ m}$

- ✓ D'après les résultats obtenus dans les différentes phases, on remarque que les déplacements horizontaux (U_x) sont presque nuls.

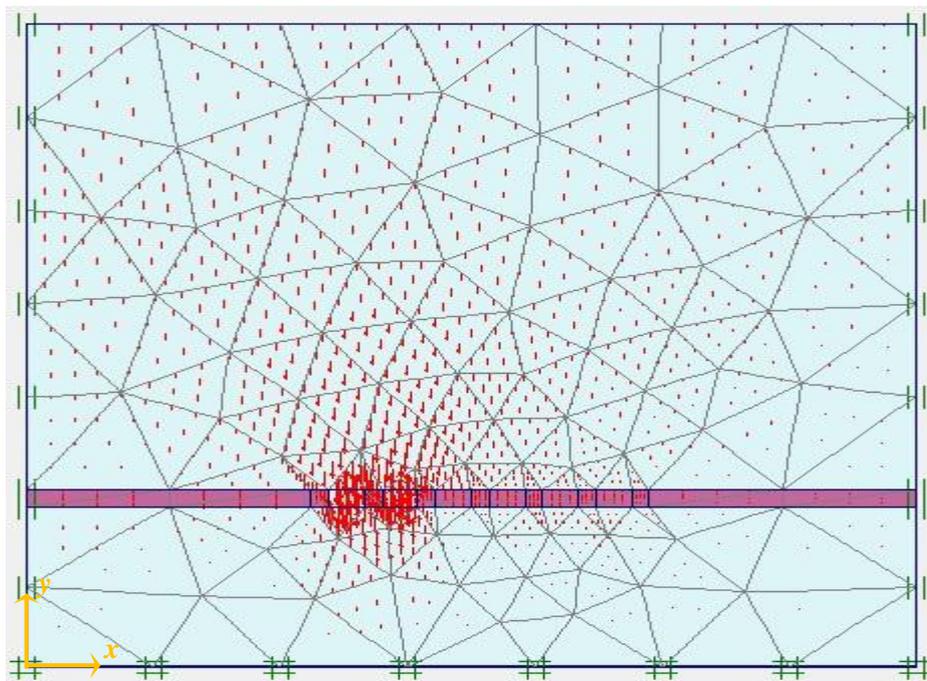
V.4.4.2. Calcul et comparaison des déplacements verticaux (U_y) entre les phases choisies

Phase 1:



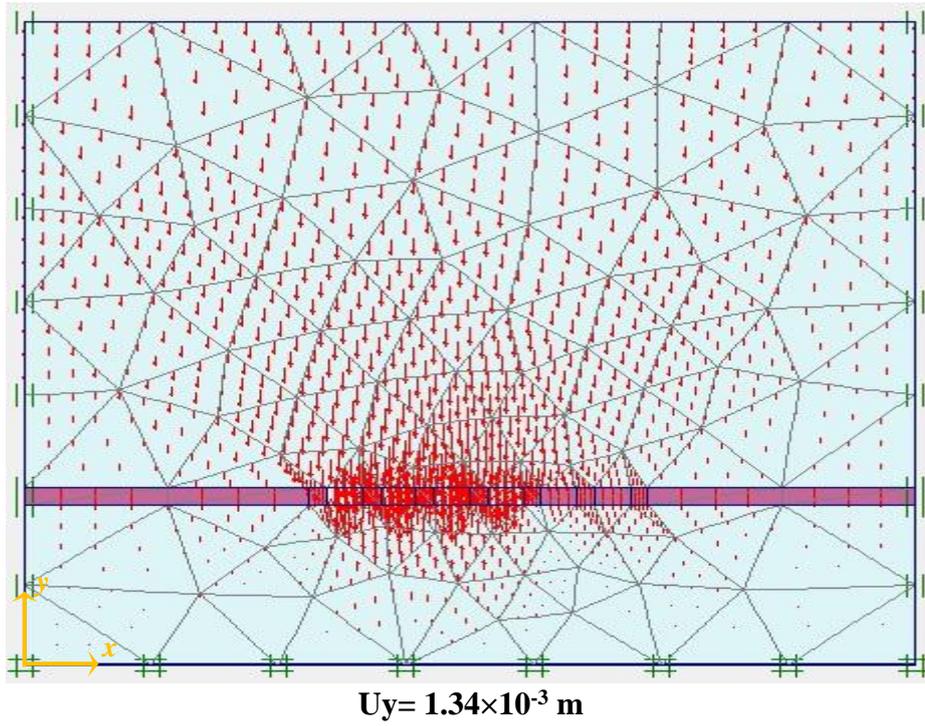
$U_y = 1.42 \times 10^{-9} \text{ m}$

Phase 3:

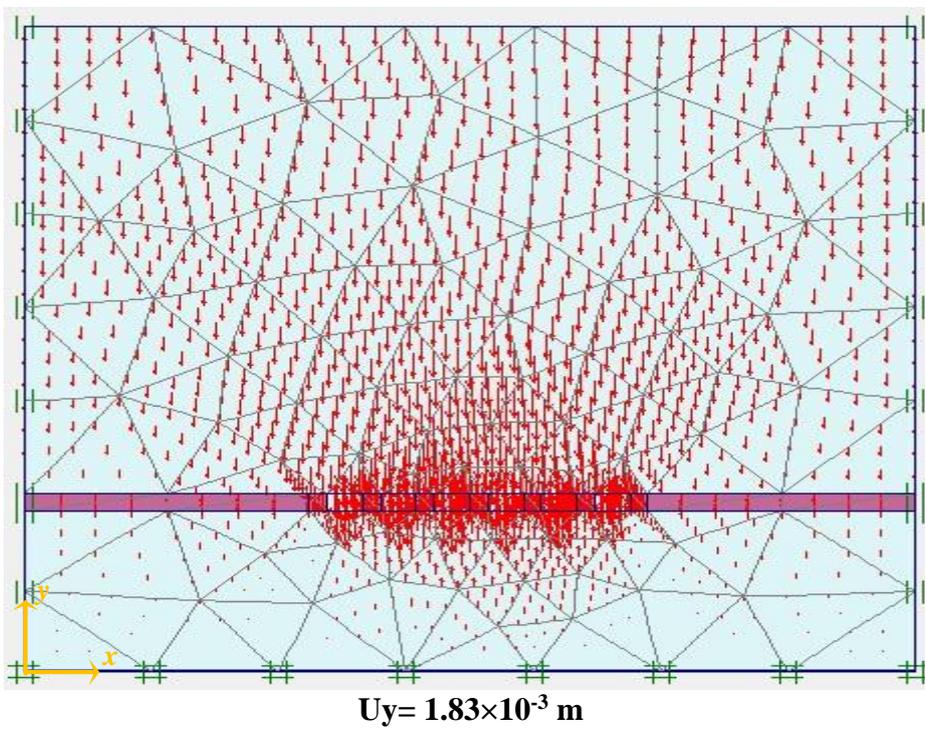


$U_y = 1.34 \times 10^{-3} \text{ m}$

Phase 5:

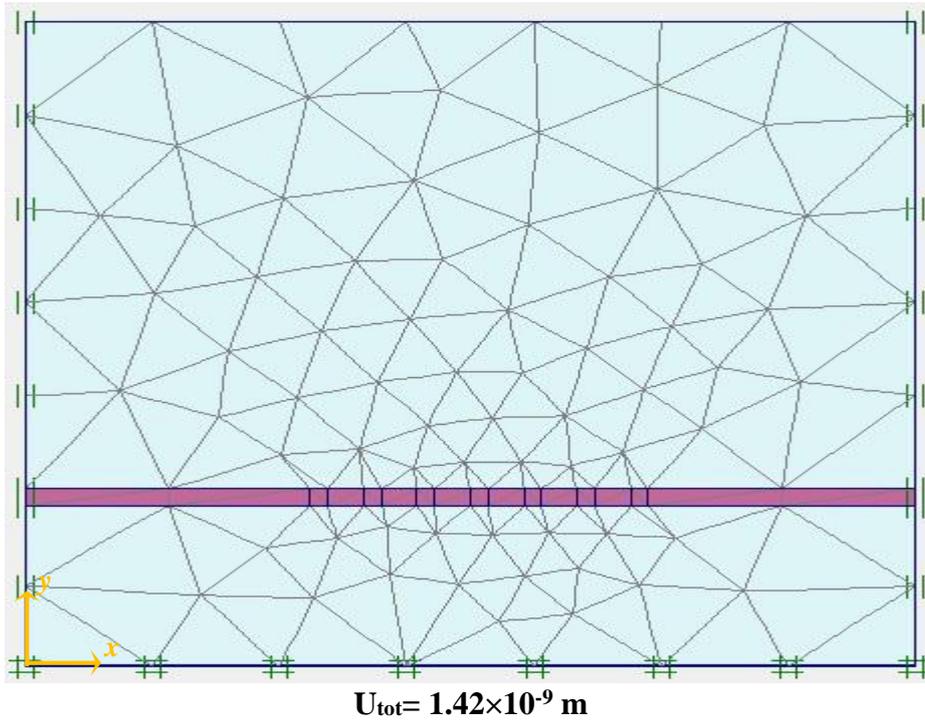


Phase 7:

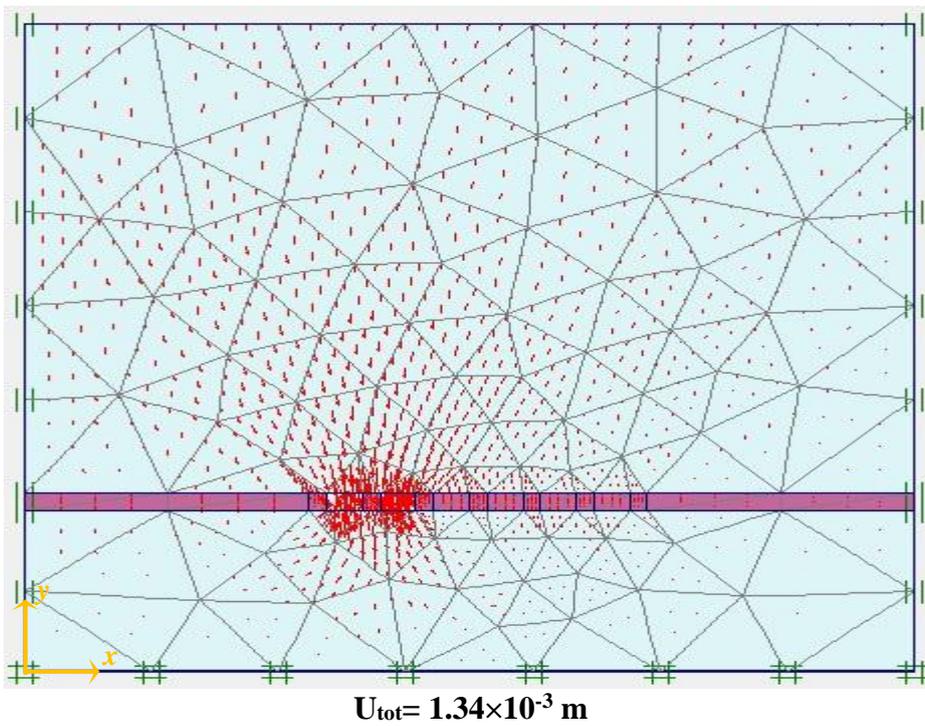


V.4.4.3. Calcul et comparaison des déplacements totaux (U_{tot}) entre les phases choisies

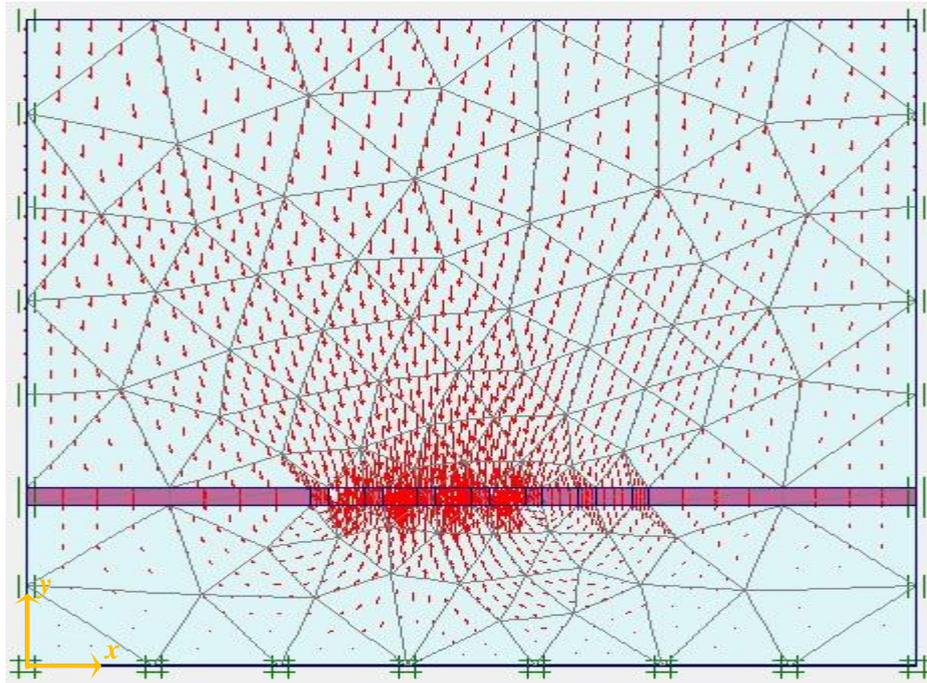
Phase 1:



Phase 3:

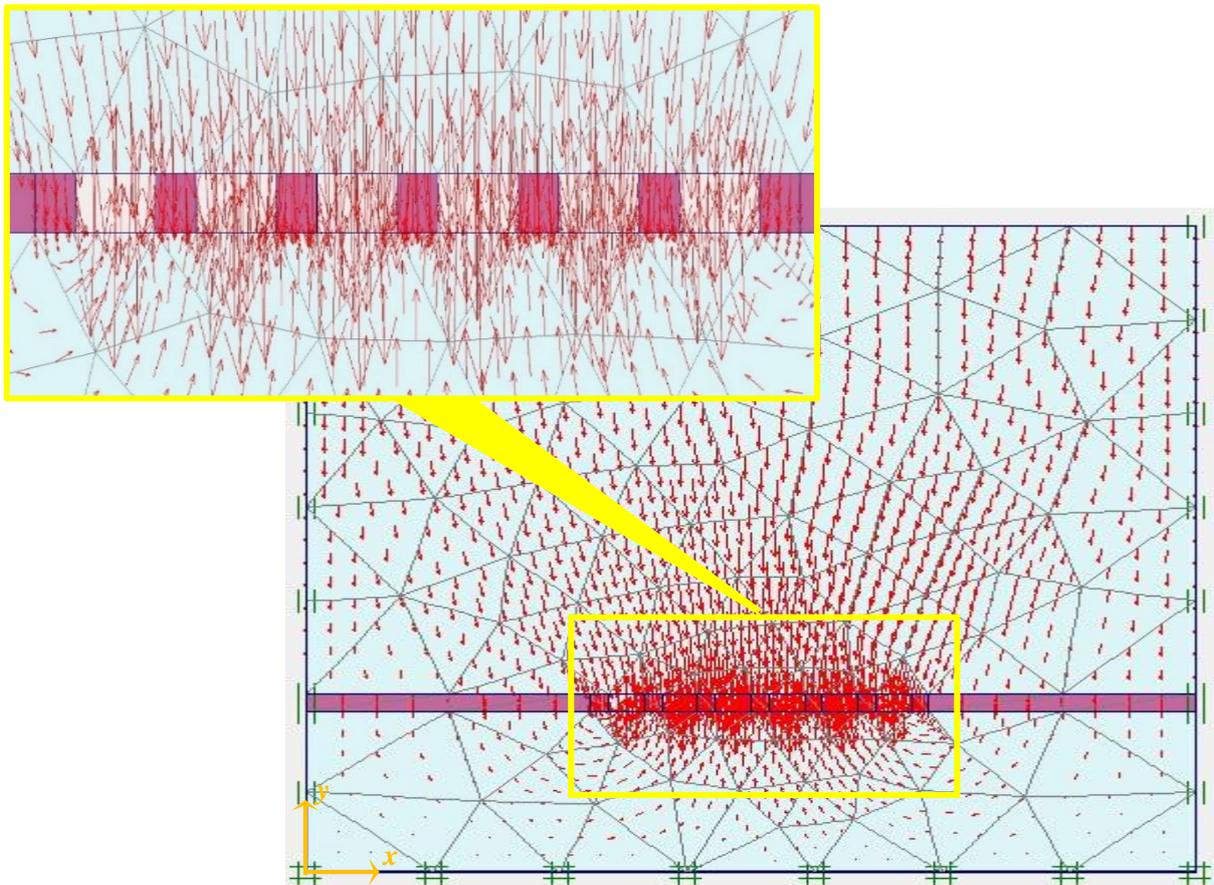


Phase 5:



$U_{tot} = 1.63 \times 10^{-3} \text{ m}$

Phase 7:



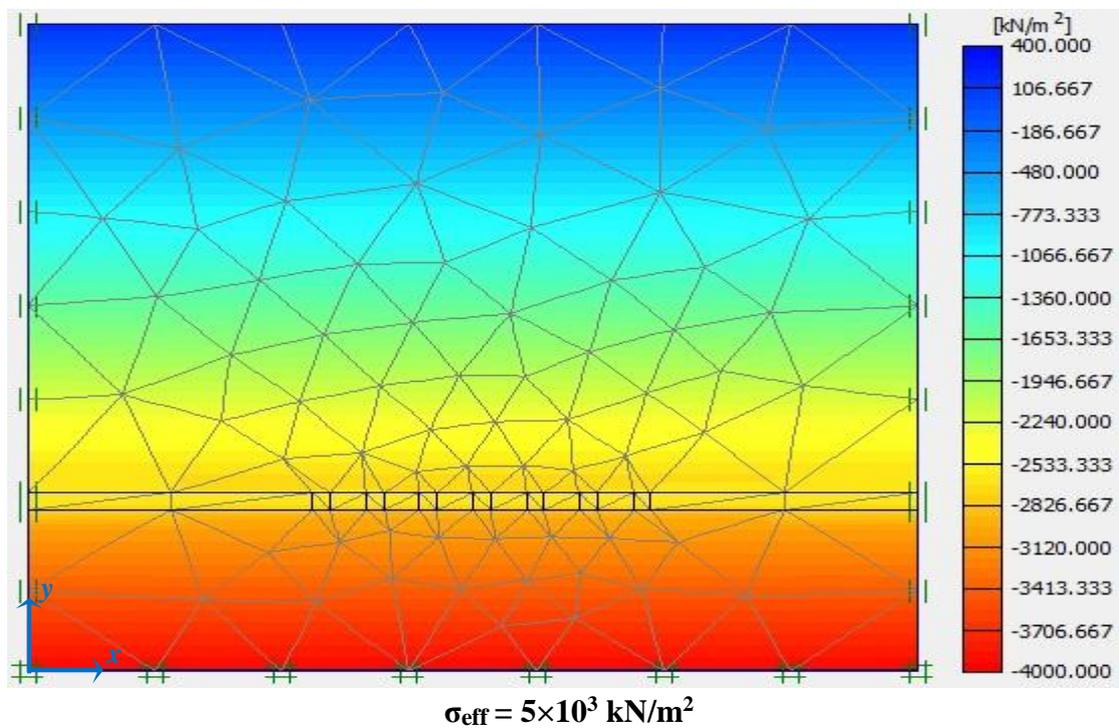
$U_{tot} = 1.83 \times 10^{-3} \text{ m}$

D'après les résultats obtenus dans les différentes phases, on remarque que les déplacements totaux U_{tot} dans les premières phases sont très petits (à l'échelle nanométrique), mais ils augmentent au fur et à mesure de l'avancement d'excavation jusqu'à ce qu'ils atteignent une valeur maximale de $U_{tot} = 1.83 \times 10^{-3}$ m qui reste dans la fourchette de déformation petite (à l'échelle millimétrique).

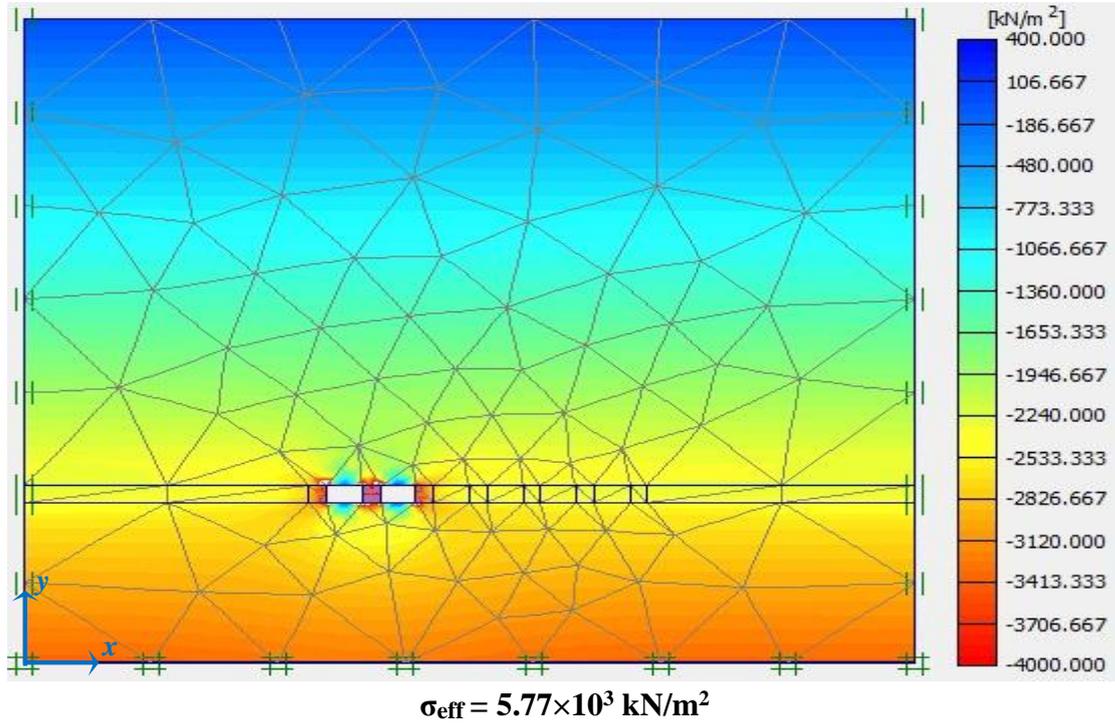
On peut remarquer aussi que les déplacements totaux (U_{tot}) et verticaux (U_y) sont presque égaux, vu à la valeur négligeable des déplacements horizontaux (U_x).

V.4.5. Calculs des contraintes effectives (σ_{eff})

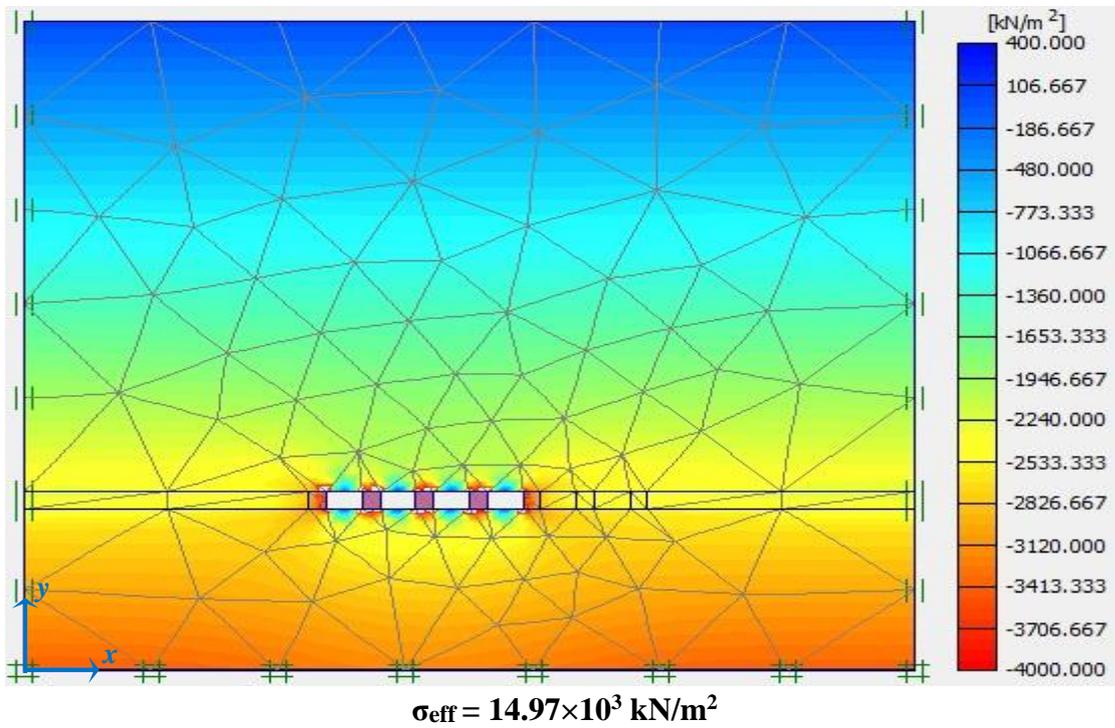
Phase 1:



Phase3:



Phase 5:



Phase 7 :

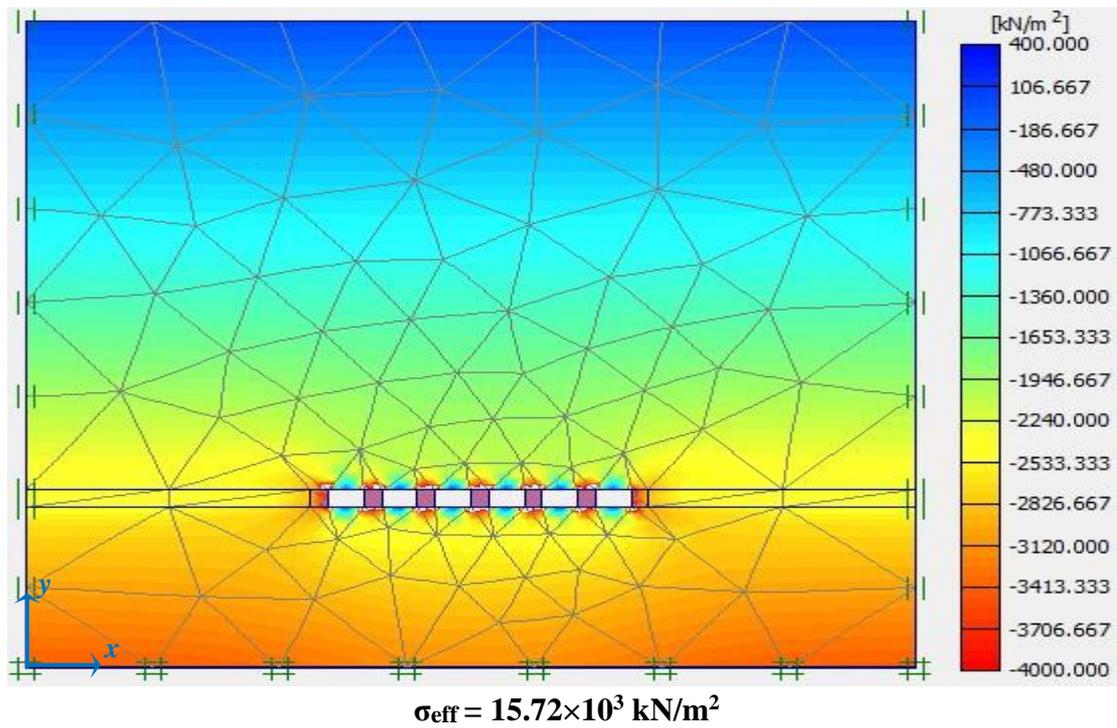


Tableau V.8 : Résultats des déplacements et contraintes dus à l'excavation des chambres.

	Désignation (Unité)	Phase 1	Phase 3	Phase 5	Phase 7
Déplacement horizontal	U_x (m)	386.23×10^{-12}	159.4×10^{-6}	171.14×10^{-6}	180.56×10^{-6}
Déplacement vertical	U_y (m)	1.42×10^{-9}	1.34×10^{-3}	1.63×10^{-3}	1.83×10^{-3}
Déplacement totaux	U_{tot} (m)	1.42×10^{-9}	1.34×10^{-3}	1.63×10^{-3}	1.83×10^{-3}
Incrément horizontal	dU_x (m)	193.11×10^{-12}	92.11×10^{-6}	90.31×10^{-6}	82.83×10^{-6}
Incrément vertical	dU_y (m)	710.32×10^{-12}	686.45×10^{-6}	719.61×10^{-6}	710.67×10^{-6}
Incrément total	dU_{tot} (m)	710.32×10^{-12}	687.76×10^{-6}	719.99×10^{-6}	710.76×10^{-6}
Contrainte effective maximal	σ_{eff} (kN/m²)	5×10^3	5.77×10^3	14.97×10^3	15.72×10^3
Contrainte total maximale	σ_{tot} (kN/m²)	5×10^3	5.77×10^3	14.79×10^3	15.72×10^3

V.5.Conclusion

Dans cette partie de notre travail, on a classifié le massif de la mine Chaâbet El-Hamra par les systèmes Q-Barton, RMR et GSI. Et on a pu établir un model correspondant à une excavation souterraine comme un objet de notre étude en utilisant le programme PLAXIS 8.6,

Cette modélisation prend en considération les paramètres suivants :

- La géométrie et les dimensions des excavations exécutées ;
- Les paramètres et les caractéristique (géologique et géotechnique) du sol.

Cette modélisation nous a montré que l'avancement des travaux d'exploitation entraine une augmentation de la charge au-dessus de l'excavation, ceci a une influence sur les deux valeurs, les déplacements totaux (U_{tot}), et les contraintes maximales (σ_{tot}).

Les résultats obtenus des calculs nous ont permis de quantifier les contraintes agissant sur notre structure et les déplacements qui sont créé avec, et nous avons vérifié les conditions pour la réalisation des travaux d'exploitation en sécurité, ceci nous aide à arriver à l'objectif de ce travail, qui consiste à déterminer la stabilité du massif de Chaâbet El-Hamra lors de la réalisation de ouvrages souterrains au niveau de la mine, et ceci sans la nécessité d'un soutènement pendant les travaux.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Notre travail consiste à classifier le massif rocheux de Chaabet-El Hamra qui contient une minéralisation zincifère, qui fait l'objet d'une exploitation souterraine.

La classification géomécanique consiste à quantifier un massif rocheux par une note empirique décrivant sa qualité par série de termes allant d'une très bonne roche à une roche très médiocre.

Dans notre étude, nous avons étudié, par étapes toutes les procédures qui nous ont amenées à atteindre le but de notre travail qui consistait à :

- Classifier notre massif suivant le système RMR de BIENIAWSKI : pour cela on a déterminé tous les paramètres géomécanique qui restent fiable, à partir desquels nous avons déterminé la classe du massif qui est un bon rocher (classe II).
- Classifier le massif suivant l'indice Q de Barton et le système GSI : ces classifications nous ont mené au même résultat que celle du RMR de BIENIAWSKI.
- Vérifier les résultats par une modélisation numérique grâce à l'application « PLAXIS 8.6 input) : cette modélisation confirme le résultat final des classifications précédentes.
- Le massif de Chaabet-El Hamra ne présente pas de nécessité d'utilisation de soutènement à l'exception de quelque zone touchée par des failles majeures et cela par précautions par rapport à d'éventuelles activités séismiques.

Références bibliographiques

- [1] **Evgueni POROKHOVOÏ [1995]**, « Stabilité A Long Terme Des Talus De Mines A Ciel Ouvert Dans Les Massifs De Roches Basiques Et Ultrabasiques », Thèse doctorat d'Ecole nationale des ponts et chaussées. France.
- [2] **AICHOOR Seifeddine & BOUZAHRI Ayoub, [2016]**, « Caractérisation du massif rocheux et l'étude de la stabilité de la flanc nord-ouest de Kef Essnoun », mémoire de fin d'études de l'Université de Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [3] **Thi Than NHAN HOANG [2010]**, « Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé : application à la réalisation du tunnel de St Béat (France31) », Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est. France.
- [4] **Jean-Louis DURVILLE et Hubert HÉRAUD [1995]**, « Description des roches et des massifs rocheux », Document C 352, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 249, rue de Crimée 75019 Paris. France.
- [5] **KEITA Alpha Mamoudou Talibé [2017]**, « Caractérisation et modélisation d'une phase de creusement d'un tunnel (cas du Tunnel d'Ait Yahia Moussa - wilaya de Tizi-Ouzou) », mémoire de fin d'études de l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [6]. **BERBAR Ferhat & BENCHICHA Ilyes [2017]**, « Caractérisation et modélisation d'une d'excavation d'un tunnel par la méthode des éléments finis Cas du Tunnel de Ait Yahia Moussa- Dra El Mizan- Tizi-Ouzou », mémoire de fin d'études de l'Université de Abderrahmane Mira de Bejaia.
- [7]. **BOUAFIA A et MIR M, [2010]**, « Introduction à la Mécanique des Sols ». Cours et applications corrigées, Collection-Les manuels de l'Etudiant.pp.30.
- [8]. **Fine J, [1998]**, « Le soutènement des galeries minières », Les presses de l'Ecole des Mines de Paris, pp. 14-44.
- [9]. **AFTES, [2003]**, « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains ». Référence GT1R1F1.
- [10]. **ZHAO J, [2008]**, ' Mécanique et propriétés des massifs rocheux', 2^{ème} partie, Cours de Mécanique des roches. Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.

- [11]. **S. AMRANI [2011]**, « Etude de Stabilité des Talus de la Carrière de Meftah (Blida) » Mémoire de fin d'études d'école nationale polytechnique. Alger.
- [12] **Baton N. R. & Choubey V., [1977]**, «The shear strength of rock joints in theory and practice», edition Rock Mech.
- [13] **BROCH & FRANKJIN [1972]**, « Int. J. of Rock Mech. And Min. Sc ».
- [14] **John A. Hudson & John P. Harrison [1997]**, « Engineering rock mechanics (an introduction to the principles) »
- [15] **Schroeder Ch., [2010]**, « Etude de stabilité des parois rocheuses, (Revue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR)) ».
- [16] **CFMR, [2000]**, « Manuel de mécanique des roches, Tome 1 ; Fondement, Ecole des Mines de Paris ».
- [17] **Hervé LE BISSONNAIS, Fabien BINET, Julian MARLINGE, [2017]**, « Mécanique des roches appliquée aux ouvrages souterrains », Ecole des ponts ParisTech.
- [18] **Hudson J. A., [1993]**, « Comprehensive rock engineering - principles, practice and Projects », Rock Testing and Site Characterization, oxford – Pergamon Press -, Vol 3.
- [19] **BEMANI YAZDI. P, [2009]**, « Modélisation de la stabilité des massifs rocheux avec prise en compte de l'endommagement des joints et des effets hydromécaniques », Thèse doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Paris-Est.
- [20] **Jehan Rondot, [2007]**, « Modèles d'astrolèmes d'après le déplacement des masses rocheuses », Canadian Journal Of Earth Vol 44.
- [21] **Djibril Sow, [2015]**, « Variabilité spatiale de la résistance au cisaillement des discontinuités des fondations rocheuses de barrages », Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
- [22] **Ziane Karim [2016]**, « Etude et Caractérisation Géomécanique du Massif de Kherrata - Cas du tunnel 4 », mémoire de fin d'étude, université Abderrahmane mira-Bejaia.
- [23] **DEERE D.U [1977]** « The shear strength of Rock joints in Theory and practice » - Rock Mech. Engng. Geol.
- [24] **BIENIAWSKI, Z.T [1974]** Geomechanics classification of rock masses and its application in tunnelling. Adv. in rock mech.
- [25] **HOEK, E. BROWN, E, T [1995]**. « Practical estimates of rock mass strength ». Int Rock Mech, Min Sci.

- [26] **Barton [1973]** Barton N. (1973) Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engineering Geology.
- [27] **Hoek et Brown [1977]** Practical estimates of rock mass strength. Int J Rock Mech Min Sci
- [28] **L’Ahmadi Azzeddine, [2006]**, « Etudes paramétrique de l’interaction entre ouvrage : tunnel-bâtiment-excavation », Mémoire de Magistère de l’université EL HADJ Lakhdar.Btna.
- [29] **CHALHOUB, M [2006]**, « Apports des méthodes d’homogénéisations numériques à la classification des massifs rocheux fracturés », Thèse de Doctorat, Ecole nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [30] **Toufik KHEFFACHE [2007]**, « Modélisation du creusement d’un tunnel en milieu urbain cas de métro d’Alger », Mémoire de Magister de l’université Abderrahmane Mira-Bejaïa
- [31] **Ihcene LAMRI [2008]**, « Etude du comportement d’un sol cohérent sous chargement monotonique et cyclique », Mémoire Magister de l’université 20 AOUT 1995-SKIKDA.
- [32] **François MARTIN ; BOURIAD ; Gardel et al, [janvier-2012]**, « mécanique des roches et travaux souterrains, cours et exercices corrigés », huitième édition.
- [33] **Redouane CHEBBINE et Othmane KISMOUN**, « Etude d’un tronçon de tunnel sous oued El-Harrach », Mémoire d’Ingénieur l’Ecole Nation Polytechnique, Alger.
- [34] **ENOF [2017]** « Plan d’exploitation 2017 », Rapport annuel d’unité de Kherzet-Youcef (Mine de Chaâbet El-Hamra, Ain Azel, Sétif).
- [35] **AFNOR [1994]** « L’association française de normalisation »