



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Larbi Tébessi –Tébessa-
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département :des Sciences de la Terre et de l'Univers



Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Science de la Terre et l'Univers

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème :

Les instabilités de la mine de Djebel Onk : Les causes et les remèdes

Présenté par :

Bekkar Hanane

Laouar Fouzia

Devant le jury :

Fahdi chams eddin	Professeur	Université de Tébessa	Président
Boumezbeur Abderrahmane	Professeur	Université de Tébessa	Rapporteur
Mouici Ridha	M.C «B»	Université de Tébessa	Examineur
Dr. Aoun Mounira	M.C «B»	Université de Tébessa	Examineur

Date de soutenance : 06/07/2020

Note : **Mention :**

Remerciement

*Nous remercions d'abord le bon **Dieu** qui nous a donné la volonté et le courage d'accomplir ce travail de recherche.*

*Un remerciement particulier à notre établissement de recherche, **l'Université Larbi Tébessi de Tébessa, Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie des, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.***

*Un grand merci particulièrement à mon directeur de mémoire professeur **Abderrahmane Boumezbeur**, qui proposé ce sujet de mémoire. Il nous a guidées et nous avons fait bénéficier de sa grande expérience et de sa haute connaissance scientifique. Ses directives, ses critiques, ses idées et ses encouragements ont très largement contribué à l'élaboration de ce travail. L'immense gratitude que nous lui dois ne pourra jamais être exprimé par les quelques mots. Nous espérons être ici chaleureusement merci.*

*Nous remercions ensuite tous les membres de nos jurys qui ont accepté de consacrer de leur temps pour participer à cette mémoire. Tout d'abord **Pr. FEHDI Chemseddine** qui nous a fait l'honneur de Présider le jury. Merci également à **M. Mouici Ridha, Mme Aoun Mounira** d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous voudrions remercier chaleureusement tous les enseignants du département des sciences de la terre et l'univers : **Dr. Guefaifia Omar** le chef de département de sciences de la terre et de l'univers, **Dr. J. Athmania, Dr. M. Jabri, Dr. B. Djamel.***

*Un grand merci pour le personnel technique du complexe minier de Djebel Onk en particulier **Mr MAKHLOUF Brahim, Mr. Rahal Abid, Mr. Mohamed Ali, Mr. Toufik , Mme Azzi Latifa.***

*On n'oublie pas **nos parents** pour leur contribution, leur soutien et leur patience.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous **nos proches et amis**, qui nous ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.*

Merci à tous et à toutes.

ملخص:

ترجع معظم الحركات في التضاريس الصخرية إلى هندسة المنحدر والاتجاه النسبي للانقطاعات. تشكل هذه الظاهرة الطبيعية خطرًا طبيعيًا يصبح خطرًا على الإنسانية. عند وجود قضية اجتماعية واقتصادية. تؤثر خصائص الكتلة الصخرية بشكل مباشر على نوع الحركة. من الضروري إجراء دراسة جيولوجية وجيوتقنية لتمييز وتصنيف الكتلة صخرية. يقدم هذا العمل أولاً منهجية تحديد خصائص وسلوك كتلة صخرية كاف السنون - تبسة ، التي تواجه مشكلة الانهيارات الأرضية. هدفنا هو تمييز وتصنيف الكتلة الصخرية لرواسب الفوسفات في كاف السنون باستخدام أنظمة تصنيف جيوميكانيكية مثل RQD و RMR و SMR من أجل تحديد جودة الصخور في هذه الكتلة.

طرق تحليل الاستقرار هي وسائل لتحديد مجالات عدم الاستقرار من أجل اعتماد نهج لتجنبها أو الحد من آثارها؛ يعتبر الاستخدام المشترك للعديد من الأساليب التحليلية مفيدًا للغاية لضمان النتائج. تجلت حالة من عدم الاستقرار من خلال انهيار أرضي كبير على المنحدر الشمالي لحفرة كاف السنون - تبسة - المفتوحة في عام 2007. بعد ذلك، تم وضع تدابير وقائية متتالية. في هذه الدراسة، تم شرح الوصف الجيولوجي لمختلف التكوينات التي تمت مواجهتها والدراسة الهيدروجيولوجية للمنطقة بالإضافة إلى وضع التشغيل في موقع تعدين كاف السنون مفصل.

يتم استخدام طريقة التوازن الحدي مع الطرق المختلفة المدمجة في برنامج GEOSTUDIO (géo-slope) لدراسة استقرار المنحدر. كما تم استخدام برنامج Plaxis8.2 لدراسة الاستقرار باستخدام طريقة العناصر المحدودة، حيث تظهر كلتا الطريقتين أن المنحدر غير مستقر.

الكلمات المفتاحية: الكتلة الصخرية، الانقطاع ، منجم كاف السنون – تبسة ، الانزلاق ، تحليل الاستقرار، توازن الحد.

Abstract:

Most movements in rocky terrain are due to the geometry of the slope and the relative orientation of the discontinuities. This natural phenomenon constitutes a natural hazard which becomes a risk for humanity when a socio-economic issue is present. Rock mass properties directly influence the type of movement. Geological and geotechnical study is required to characterize and classify a rocky massif. This work established first presents the methodology for calculating the properties and behavior of the rock mass Mine Kef Essnoun –Tébessa which meets the problems of landslides, our goal is to characterize and classify the rock mass of Mine Kef Essnoun –Tébessa through géomechanics classification system such as RQD and RMR to determine the quality of the rocks of this massif.

The stability analysis methods are means to identify areas of instability to adopt an approach to avoid or reduce their effects; the combined use of several analytical approaches is very beneficial for the insurance results. A case of instability was manifested by a major landslide on the open pit northern slope of the quarry Kef Es Senoun -Tébessa- in 2007. Following this, consecutive safeguards have been put in place. In this study the geological description of the various formations encountered and the hydrogéological study of the area and the operating mode of the mining site Kef Es Senoun are detailed.

The limit equilibrium with different methods included in GEOSTUDIO program (geo-slope) is used to study slope stability. Also, the Plaxis8.2 software was used to study stability by the finite element method. Both methods show that the slope is unstable.

Keywords: rock mass, discontinuity, Mine Kef Essnoun –Tébessa, Slip, analyzes stability, ultimate equilibrium.

Résumé :

La plupart des mouvements dans les terrains rocheux sont dus à la géométrie du talus et l'orientation relative des discontinuités. Ce phénomène naturel constitue un aléa naturel qui devient un risque pour l'humanité, quand un enjeu socio-économique est présent. Les propriétés du massif rocheux influent directement sur le type de mouvement. Une étude géologique et géotechnique est nécessaire pour caractériser et classifier un massif rocheux. Ce travail présente d'abord la méthodologie de détermination des propriétés et du comportement du massif rocheux de Mine Kef Essnoun –Tébessa qui rencontre le problème des glissements de terrains. Notre but est de caractériser et classifier le massif rocheux de gisement de phosphate de Kef Essnoun grâce aux systèmes de classification géomécaniques tels que le RQD, RMR et SMR à fin de déterminer la qualité des roches de ce massif.

Les méthodes d'analyse de la stabilité sont des moyens pour cerner les zones d'instabilité afin d'adopter une démarche pour les éviter ou réduire leurs effets ; l'utilisation conjointe de plusieurs approches d'analyse est très bénéfique pour l'assurance des résultats. Un état d'instabilité s'est manifesté par un important glissement de terrain sur le versant nord de la carrière à ciel ouvert de Kef Es Senoun -Tébessa- en 2007. Suite à cela, des mesures de protection consécutives ont été mises en place. Dans cette étude la description géologique des différentes formations rencontrées et l'étude hydrogéologique de la région ainsi que le mode d'exploitation du site minier de Kef Es Senoun sont détaillés.

La méthode d'équilibre limite avec les différentes méthodes intégrées sur le programme GEOSTUDIO (géo-Slope) est utilisée pour étudier la stabilité de talus. Egalement, le logiciel Plaxis 8.2 a été utilisé pour étudier la stabilité par la méthode des éléments finis. Les deux méthodes montrent que le talus est instable.

Mots clefs : massif rocheux, discontinuité, Mine Kef Essnoun –Tébessa, Glissement, analyse de la stabilité, équilibre limite.

Table de matière

-Remerciements	
ملخص	I
-Abstract	II
-Résumé.....	III
-Table des matières.....	IV
-Liste des tableaux.....	V
-Liste des figures.....	VI
-Liste des symboles.....	VII
-Introduction générale.....	1

CHAPITRE I: GEOLOGIE REGIONALE ET LOCALE

I-1. Introduction.....	3
I-2. Généralité.....	3
I-2.1. Historique succinct de la recherche minière de Djebel Onk.....	3
I-3. Situation géographique.....	4
I-3.1. Situation géographique régionale de Djebel Onk.....	4
I-3.2. Situation géographique local de Kef Essnoun	6
I-4. Contexte géologique.....	7
I-4.1. Contexte géologique régional de Djebel Onk.....	7
I-4.1.1. STRATIGRAPHIE.....	8
I-4.1.2. Tectonique.....	11
I-4.1.3. Paléogéographie.....	13
I-4.1.3.1. Période de sédimentation marine.....	13
I-4.1.3.2. Période de sédimentation continentale.....	14
I-4.2. Contexte géologique local de Kef Essnoun.....	16
I-4.2.1. STRATIGRAPHIE.....	17
I-4.2.2. Tectonique.....	19
I.5. Conclusion.....	20

Chapitre II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

II.1. Introduction.....	21
II-2. Caractérisation des massifs rocheux.....	21
II.2.1. Structure des massifs rocheux.....	22
II.2.2. Matrice rocheuse.....	23
II.2.3. PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUE DES ROCHES.....	23
II.2.3.1. Les propriétés physiques des roches.....	24
II.2.3.2. Les propriétés mécaniques des roches.....	28

II.2.4. PROPRIETES STRUCTURALS (les discontinuités)	35
II.2.4.1. Description des discontinuités.....	35
II.2.4.2. Morphologie d'une discontinuité.....	36
II.2.4.3. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux.....	38
II.2.4.4. Types de discontinuités.....	38
II.2.4.5. Caractéristiques des discontinuités.....	40
II.2.4.6. La projection stéréographique des discontinuités.....	46
II.5. Conclusion.....	47

Chapitre III:

Classification des massifs rocheux

III.1. Introduction.....	48
III.2. Systèmes de classification des massifs rocheux.....	48
❖ Les différents systèmes de classification.....	55
❖ Les buts des systèmes de classification des massifs rocheux.....	50
III.2.1 Systèmes du RQD (Rock Quality Designation).....	50
a. Classification de massifs rocheux par RQD.....	51
III.2.2 Système RMR (Rock Mass Rating)	53
III.2.3 Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)	53
III.3. Commentaires sur les systèmes de classification.....	57
III.4. Calcul du RMR de base pour la roche masse de Quartier de Kef Es Sennoun.....	58
III.4.1. La résistance à la compression uniaxiale (R_{cs}).....	58
III.4.2. Rock Qualité désignation (RQD).....	59
III.4.3. L'espacement des joints.....	61
III.4.4. Nature des joints : (Condition of discontinuities).....	61
III.4.5. Venue d'eau : (Ground water conditions).....	62
III.5. Calcul du SMR pour la roche masse de Quartier de Kef Es Sennoun.....	64
III.6. Conclusion.....	66

Chapitre IV

Stabilité des talus rocheux

IV.1. Introduction.....	67
IV.2. Role des discontinuités dans les glissements rocheux.....	69
IV.2. Les glissement planaires.....	69
IV.2.2. La rupture en diedre (wedgfailure).....	71
1) Analyse de la rupture du coin.....	72
IV.2.3. Rupture circulaire.....	73
1) Conditions du glissement circulaire et méthodes d'analyse.....	74
2) Forme de la surface de glissement.....	74
3) Analyse de stabilité pour la rupture circulaire.....	75
IV.4. Approche numérique à l'analyse de stabilité.....	76
IV.5. Analyse du glissement de terrain de Kef Esnoute et conditions de son apparition.....	77
IV.5.1. Caractéristique du glissement.....	78
IV.5.2. Identification du terrain glissé.....	78
IV.5.3. Localisation de la surface de glissement.....	78

IV. 5. 4. Principaux facteurs déclenchant le mouvement.....	80
1) Facteurs géologiques.....	80
2) Facteurs techniques.....	80
IV. 6. Calcul de stabilité par le logiciel Geo-Slope (Geostudio) module SlopeW.....	81
IV.7. Méthodes de calcul de la stabilité des talus.....	87
IV.7.1. Définition du facteur de sécurité F_s.....	88
IV .8. Calcul de la stabilité.....	88
IV.8.1. Paramètres de calculs.....	88
IV.9. Etude de stabilité par (Géo-slope) situation de la carrière avant le glissement de 2007.....	89
IV.10. Approche numérique à l'étude de la stabilité du glissement par le logiciel Plaxis.....	90
IV.10.1. Application au dressant de Kef Es Senoun Dj Onk.....	94
IV.11. Conclusion.....	96
Conclusion générale.....	97
Bibliographie.	

Liste des tableaux

Tableau N°	Titre	Page
II.1.	Echelle de dureté de Mohs.	25
II.2	Classification des discontinuités en fonction d'ID (d'après B.R.G.M.- Guide de prospection des matériaux de carrière).	26
II.3	Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.	29
II.4	Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.	30
II.5	Description de l'espacement des discontinuités (Zhao. J, 2008).	41
II.6	Classification des discontinuités selon leur extension (Zhao. J, 2008).	44
II.7	Description des discontinuités selon la mesure des ouvertures (Zhao. J, 2008).	45
III.1	Systèmes de classification des massifs rocheux (Bieniawski, 1993;Palmström, 1995).	48
III.2	Qualité de la masse rocheuse selon sa valeur RQD (tiré de Deere, 1968).	51
III.3	Classification RMR (Bieniawski, 1989).	52
III.4	Valeur du paramètre de réduction A6 selon l'orientation du tunnel par rapport à l'indication du pendage, (Bieniawski, 1989).	53
III.5	Qualité du massif rocheux selon le RMR (Bieniawski, 1976).	53
III. 6	Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985).	56
III.7	Description des classes SMR (Romana, 1985).	57
III.8	les valeurs de la résistance à la compression des différentes lithologies.	58
III.9	Valeur du RQD pour Les sondages N° 10 et 19.	60
III.10	Valeur du RQD pour les sondages N° 06 et 38.	60
III.11	Classification RMR du faciès calcaire Yprésien-Lutétien.	62
III.12	Classification RMR du calcaire phosphaté.	62
III.13	Classification RMR du phosphate.	63
III.14	Classification RMR du faciès Marne schistifiées (profondeur 149 – 179m).	63

III.15	Classification RMR du faciès Danien-montien.	64
III.16	Classification RMR du massif rocheux de Kef.	64
III.17	Valeurs calculées selon la méthode de (Romana et al..).	64
III.18	SMR du faciès de calcaires Yprésien-Lutétien.	65

III.19	SMR du faciès de calcaires phosphate.	65
III.20	SMR du faciès de phosphate.	65
III.21	SMR du faciès de marne schistifiées.	65
III.22	SMR du faciès de calcaire Danien-Montien.	65
III.23	Classification SMR des différents faciès.	65
IV.1	Les Paramètres géotechniques.	88

Liste des figures

Figure N°	Titre	Page
I.1	La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers : Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (D'après SO.NA.R.E.M., 1978).	05
I.2	Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk (D'après Priant et Cortial, 1993). FERFOS.	06
I.3	Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk – Algérie orientale – (Cielensky et Benchemine, 1987). FERFOS	08
I.4	Carte géologique De jebel Onk (SOMIPHOS).	11
I.5	Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa–Métlaoui–Dj. Onk (Aissaoui, 1984).	13
I.6	situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région du djebel On à l'intérieur du bassin phosphate de Gafsa, Métlaoui et dj. Onk (Prian et Cortiel, 1993).	15
I.7	Carte géologique de Kef Essnoun, (SOMIPHOS).	16
I.8	Coupe géologique du gisement de Kef Essnoun dans la partie des dressants, (SOMIPHOS).	17
I.9	Coupes géologiques à travers le gisement de Kef Essnoun, (SOMIPHOS).	18
I.10	Structure de la couche de phosphate dans la zone de Kef Essnoun et localisation des sondages carottés (Prian et Cortiel, 1993).	20
II.1	Structure d'un massif rocheux (Zhao. J, 2008).	23
II.2	Diagramme contrainte-déformation.	27
II.3	Disposition expérimentale.	28
II.4	Schéma de la compersion uniaxiale.	28
II.5	Essai de traction directe.	29
II.6	Dispositif expérimental.	30
II.7	Schéma de la Traction indirecte.	30
II.8	Cisaillement simple avec une surface de cisaillement.	31
II.9	Cisaillement simple avec deux surfaces de cisaillement.	32
II.10	Cisaillement simple avec une surface cylindrique.	32
II.11	Cisaillement par torsion.	33
II.12	Cisaillement par compression.	34
II.13	Courbe représentative de τ en fonction de σ_n .	34
II.14	Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban (M. Chalhoub).	36
II.15	Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux.	37

II.16	joint de stratification (photo prise d'un gradin de Kef Es Sennoun).	38
II.17	Une faille verticale d'un massif (Kef Es Sennoun) .	39
II.18	Réseau de diaclases sur les dalles de calcaires Yprésien-Lutitien du gradin de Kef Es Sennoun.	39
II.20	Définition de la direction et du pendage d'un plan, (Zhao. J, 2008).	40
II.21	Mesure de l'espacement (Zhao. J, 2008).	41
II.22	Mesure de la fréquence des discontinuités (Hudson, 1993).	42
II.23	Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC) (Barton et Choubey, 1977).	43
II.24	Persistance de différents ensembles de fractures (Zhao. J, 2008).	43
II.25	Fissure ouverte et remplie (Schroeder, 2010).	44
II.26	Epaisseur déformable d'un joint Matériau remplissant totalement ou partiellement la discontinuité (nature et épaisseur).	45
II.27	Essais de cisaillement sur "joint" rocheux (Zhao. J, 2008).	46
II.28	Représentation stéréographique, (Zhao. J, 2008).	47
III.1	Carotte de sondage dans une caisse de forage (Zhao J., 2008).	50
III.2	Orientation d'une pente de type plane.	54
III.3	Carotte de sondage 38 dans la partie Est de Kef Es Sennoun.	59
IV.1	Geometry type de talus d'une mine à ciel ouvert.	67
IV.2	Analysis of the stability of sloes in open pit mines (Hoek and Brown 1978).	68
IV.3	Photo montrant un glissement planaire.	69
IV.4	Geometry of slope exhibiting plane failure.	70
IV. 5	Rupture de coin typique impliquant un glissement sur deux joints persistants avec une ligne d'intersection coupant le talus au pied de la paroi rocheuse et un plan supérieur qui forme une surface de relachement.	71
IV. 6	Geometric conditions for wedge failure.	72
IV.7	Resolution of forces to calculate factor of saftey of wedge.	73
IV.8	Rupture circulaire dans une roche granitique fortement altérée (Duncun 2008, autoroute en Californie.	73
IV.9	La forme des surfaces de glissement typiques.	75
IV.10	Photo montre la situation morphologique du gisement de Kef Es Senoun (Kadri et Bougdal 2007).	77

IV.11	photo représente les caractéristiques du glissement de Kef Es Sennoun.	78
IV.12	Coupe géologique NNO-SSE du gisement de phosphate de Kef Es Senoun (Mezam 2015) (SOMIPHOS).	79
IV.13	La roche masse brisée et intensivement cassée suite au glissement.	79
IV.14	Les menus disponibles sur logiciel SLOPE/W.	81
IV.15	Fenêtre de définir les unités et l'échelle.	82
IV.16	Fenêtre d'affichage des informations sur la tranche.	82
IV.17	Fenêtre d'insérer les caractéristiques mécaniques des différentes couches.	83
IV.18	Fenêtre de dessiner des régions.	83
IV.19	Schéma du problème.	84
IV.20	Création d'un nouveau projet sur SLOPE/W.	84
IV.21	Choix de type du facteur de sécurité.	85
IV.22	Spécification des surfaces de rupture.	85
IV.23	Barre d'outils du logiciel SLOPE/W.	85
IV.24	Création des matériaux dans l'outil SLOPE/W.	86
IV.25	Vérification des données insérées.	86
IV.26	Résolution du problème.	87
IV.27	Définition d'une analyse transitoire.	87
IV.28	Surface de rupture.	87
IV.29	Coupe avant glissement.	89
IV.30	le modèle géométrique et le choix des entres-sortie avant glissement.	89
IV.31	la surface du glissement.	90
IV.32	Fenêtre de Plaxis 8.2 dans la phase Input.	91
IV.33	Fenêtre de saisie des propriétés de matériaux (Plaxis).	92
IV.34	Exemple de maillage, (Logiciel Plaxis).	92
IV.35	Génération des conditions hydrogéologiques.	93
IV.36	Module output (plaxis 8.2).	93

IV.37	Exemple d'une présentation graphique des résultats contrainte-déplacement.	94
IV.38	Model géologique de la mine avant exploitation.	94
IV.39	Simulation de l'opération d'excavation.	95
IV.40	Evaluation du F_s par (Plaxis 8.5) output.	95

Notations

E : Est.

N : Nord.

O : Ouest.

S : Sud.

RC: La résistance à la compression. [kgf/cm²]

n : La porosité.

ρ_s : masse volumique. [G/cm³]

M_s : la masse du matériau sec. [G]

V_s : le volume des grains après broyage. [CM³]

V_t : le volume de l'échantillon. [CM³]

M_h : la masse naturelle. [G]

M_{Sat}: la masse de l'échantillon saturée. [G]

ρ_s: dépend de la porosité de la roche, par contre **ρ_s** ne dépend que de la minéralogie.

W : La teneur en eau.

M_w: est la masse d'eau.

M_t: est la masse totale de l'échantillon.

M_s : est la masse sèche des grains solides.

S_r : Le degré de saturation.

V_w : volume de l'eau dans l'échantillon. [CM³]

V_v : volume des vides. [CM³]

ID : Le degré de fissuration des roches.

L : longueur de la partie étudiée du massif. [M]

n : nombre de fissures sur la partie mesurée.

E: Module de Young. [KN/m²]

σ : est la contrainte.

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.

R_t: Résistance à la traction. [kgf/cm²]

P_{max} : valeur finale atteinte par l'effort appliqué.

A₀: surface transversale.

F_{max} : la charge maximale appliquée.

D et **L** : dimensions de l'éprouvette cylindrique.

τ : est la résistance au cisaillement.

σ_N : est la contrainte normale.

[KN/m²]

C : La cohésion.

Φ :L'angle de frottement interne.

Ψ :Angle de dilatance.

[°]

λ : La fréquence des discontinuités.

Fs : Coefficient de sécurité.

Abréviations

S.D.O : Société du Djebel Onk.

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières.

FERPHOS : Entreprise nationale du fer et du phosphate.

SONAREM : Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières.

RQD: Rock Quality Designation.

JRC: Joint Roughness Coefficient.

RMR: Rock Mass Rating.

SMR: Slope Mass Rating.

GSI: Geological Strength Index.

*Introduction
générale*

Introduction générale

Les problèmes liés à la stabilité des talus dans les mines à ciel ouvert sont devenus de plus en plus compliqués en raison des profondeurs accrues auxquelles les mineurs ont pu arriver. La stabilité des gradins et des talus ont plus d'influence sur la productivité et la longévité d'une mine, les instabilités qui peuvent survenir portent d'énormes dommages au personnel et aux équipements.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons à la problématique d'instabilités de la mine de Djebel Onk reste une des questions principales qui se pose lors d'exploitation des gisements qui résulte des activités d'extraction par la constitution d'ouvrages miniers, la conception optimale de ces ouvrages doit intégrer les concepts de sécurité du travail.

L'étude d'instabilité des talus ou des gradins d'exploitation à ciel ouvert de la mine de phosphate de Kef-Essnoun (Djebel El-Onk) pour laquelle un glissement de terrain s'est produit le 08 Septembre 2007 ; a montré la grande importance de l'étude détaillée de tous les facteurs géologiques, géométriques, la lithologie, les conditions hydrogéologique et géotechniques du massif. Ce glissement a été caractérisé par un mouvement de terrain de très grande ampleur par son volume de 7,7 Millions m³. En 2013, des fissures ont été observées dans l'épaulement de la paroi nord. Celles-ci pourraient être des signes d'un glissement potentiel qui le renforcera par les remblais de stérile en bas de talus pour une étude éventuelle de la stabilité du site en question.

Afin de justifier l'instabilité de la mine de Djebel Onk, nous avons décidé de diviser le travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre est une description de la zone d'étude : localisation et géologie. L'objectif est de présenter les conditions géologiques et le plan d'exploitation du gisement de Kef Essnoun.

Le second chapitre il traite essentiellement les caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux et les discontinuités et leurs Classification.

Le troisième chapitre est destiné à l'application des systèmes de classification empirique (RQD, RMR et SMR) pour mieux caractérises les massifs rocheux de Kef-Essnoun.

Dans le dernier chapitre, nous abordons les différents types d'instabilités, et en particulier les glissements de terrains, leurs types et causes, et l'analyse de stabilité, Pour l'étude de la stabilité nous avons utilisé la méthode d'équilibre limite ou nous avons fait les calculs par le

Introduction générale

logiciel Géoslope (Slope /w).le logiciel plaxis 8.2 à été utilisé pour étudier la stabilité du dressant par la méthode des éléments finis.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale qui souligné l'apport de notre travail.

CHAPITRE I :
Géologie régionale et locale

I-1. Introduction

L'industrie phosphatée algérienne est née à la fin du XIX^{ème} siècle avec la découverte et la mise en exploitation de plusieurs gisements à l'Est du pays (El Kouif, Mzaita, Ras El Oued, Bordj El Ghedir). En 1962 commença l'exploitation du plus grand gisement algérien de phosphate, Le Djebel Onk.

Les phosphates de la région du Djebel Onk font partie d'une succession d'assises sédimentaires, développées dans l'Est et le Sud-est constantinois (Algérie), Elle présente une série tertiaire au passage entre le Paléocène et l'Eocène inférieur.

I-2. Généralité

La région de Djebel Onk est située dans la partie orientale des monts de appartenant à l'atlas saharien. Djebel Onk est un massif montagneux de calcaire dont le flanc sud plonge rapidement sous le dépôt du Miocène et du Quaternaire.

Le gisement de phosphate est de nature sédimentaire stratiforme constitue le prolongement vers l'Ouest des phosphates localisés dans le territoire Tunisien. Le gisement appartient à une formation tahitienne dont la base est caractérisée par l'apparition du premier dépôt de phosphate important mais fortement argileux à ses couches succèdent les marnes noires puis l'assise de phosphate principale qui fait approximativement 30 m de puissance et d'une formation nature carbonatée.

I-2.1. Historique succinct de la recherche minière de Djebel Onk

Selon le rapport de l'EREM rédigé par Cieslinski et al., de 1985 à 1987 :

- Les phosphates Algériens ont été découverts à Boughari par Thomas Ph., en 1873.
- Dans la période (1907 -1908) Joleau à découvert le gisement de Djebel Onk. Des informations plus complètes ont été présentées par Dussert.
- En 1924, Dussert D., fournit des coupes lithologiques détaillées des gîtes de phosphate de la zone du Djebel Onk.
- En 1931 les phosphates de Djebel Onk font l'objet d'une première concession par la compagnie des phosphates de Constantine qui a été le principal producteur en Algérie. Par la suite, une filiale est fondée : Société du Djebel Onk (S.D.O) en 1936.
- En 1951 et 1952, Visse étudie pour la S.D.O, le gisement de phosphate du Djebel Djemi Djema dont il reprend avec beaucoup de détails la stratigraphie et évalue les réserves dans toute la zone du Djebel Onk.
- De 1961 à 1963, des essais de prospection radiométrique aéroportée sont effectués au-dessus du gisement de Djebel Onk.

- En 1963, les études géologique et minière précédant l'exploitation du gisement de Djemi Djema ont été réalisées par la société SERMI, pour la S.D.O. Parallèlement, la société française SOFREMINEs rédige un avant-projet d'exploitation du gisement de Kef Essnoun.
- En Février 1965, l'exploitation du gisement du Djemi Djema fut débutée.
- De 1971 à 1974, les travaux de recherche et de prospection sur les phosphates dans l'Est de l'Algérie ont été relancés par la SONAREM en s'appuyant d'abord sur un levé Aéroradiométrique, puis par une campagne de prospection et d'évaluation du district minier du Djebel Onk, afin de mettre en évidence des réserves complémentaires et de mieux caractériser les gisements connus.
- En 1986, le gisement de Kef Essnoun a été reconnu en détail par l'EREM grâce à 32 sondages carottés réalisés à la maille de 250 x 300 m et 22 tranchées réalisées dans les dressants.
- En Novembre 1989, l'entreprise FERPHOS fait connaître son cahier des charges pour des études de développement du complexe minier de Djebel Onk.
- En Avril 1992, signature du contrat entre l'entreprise FERPHOS et le consultant BRGM/SOFREMINEs concernant le rassemblement des éléments techniques et économiques permettant d'arrêter un projet de développement de l'exploitation des gisements de phosphate de Djebel Onk.
- En 1993, BRGM a fourni un rapport d'expertise géologique de tous les gisements de Djebel Onk.
- En 1999, ORGM a fourni un rapport d'exploration de la partie Nord du gisements de Bled El Hadba .
- En 2015, BRGM a fourni un rapport de recherche géologique complémentaire du gisement de Bled El Hadba.
- En 2016 et 2017 DMT (bureau d'étude allemand) a réalisé une étude pluriannuelle des gisements de Djebel Onk Sud et Bled El Hadba.

I-3. Situation géographique

I-3.1. Situation géographique régionale de Djebel Onk

Djebel Onk se situe dans le Nord- Est de l'Algérie, dans l'extrémité orientale des monts de Nemenmcha, derniers chainons de l'Atlas Saharien. Il constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux Constantinois et le domaine Saharien. Les terrains sont semi-désertiques à faible population (Cieslinski et al., 1985, 1987 ; Prian , Cortiel, 1993).

Du point de vue administratif, la région appartient à la wilaya de Tébessa, éloignée d'environ 100km au Sud et à 20km de la frontière Algéro-Tunisienne, reliée à Bir El Ater (Daira) par une route goudronnée (RN 16).

Topographiquement, le massif de Djebel Onk forme un ensemble de calcaire de 20km de longueur qui culmine à 1198m (Djebel Tarfaya) ; les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635m. Les terrains sont entaillés par de nombreuses vallées d'oueds prenants source du flanc Nord du secteur et qui se rejoignent plus au Sud. En général, ces oueds sont secs à l'exception en périodes hivernales (Prian, Cortiel, 1993).

Ces coordonnées LAMBERT sont :

X= 981,500 ----- 984,500 Y= 165,000 ----- 170,000



Figure I.1-La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers : Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (D'après SO.NA.R.E.M., 1978).

La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers :

- Gisement de Djemi Djema, (Sud du massif du Djebel Onk) ;
- Gisement de Kef Essnoun, (Sud du massif du Djebel Onk) ;
- Gisement de Djebel Onk Nord, (nord du centre minier de Djemi Djema) ;
- Gisement d'Oued Betita, (Sud-est du centre minier du Djemi Djema) ;
- Gisement de Bled El Hadba, (Sud-est de Djebel Onk).

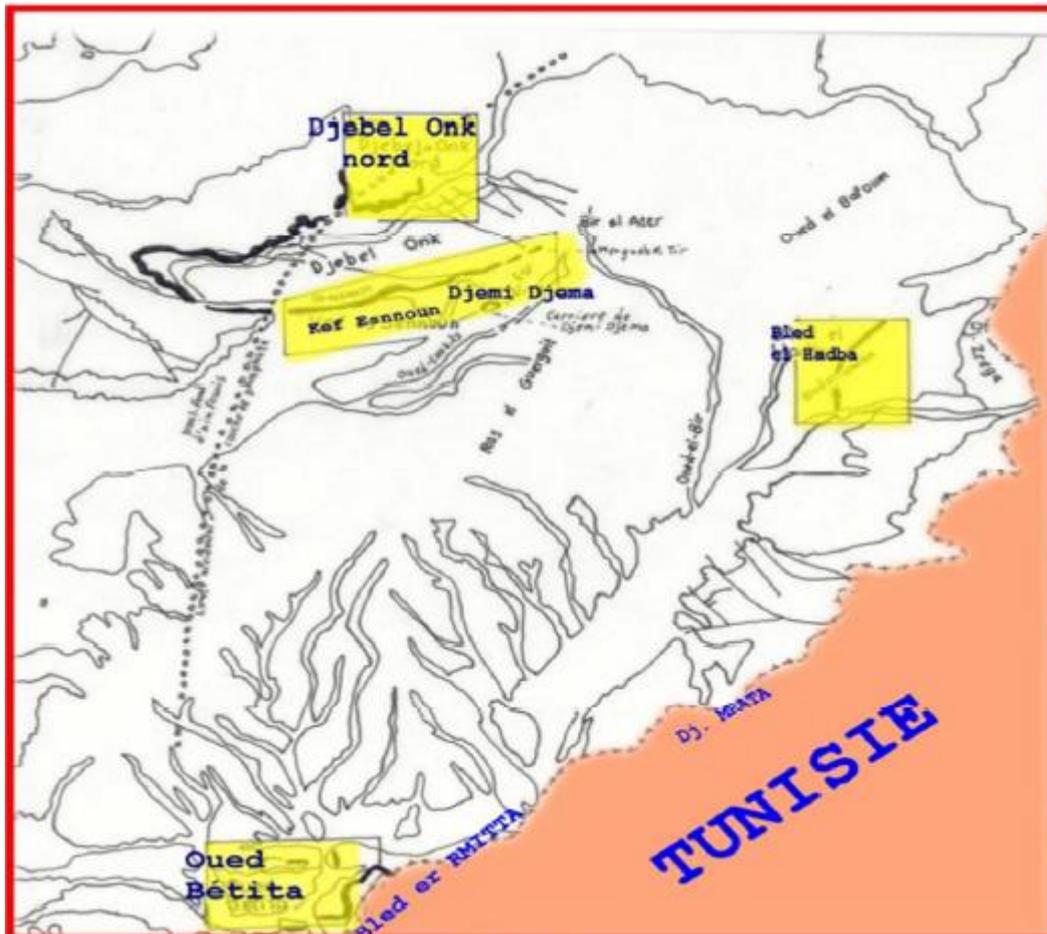


Figure I.2-Carte de situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk

(D'après Priant et Cortial, 1993). FERFOS

I-3-2. Situation géographique local de Kef Essnoun

Selon le rapport de l'EREM réalisé par Cieslinski et al., de 1985 à 1987, le gisement de Kef Essnoun est situé au Sud du massif du Djebel Onk à 4 km de la ville de Bir El Ater, le siège administratif de la région (Daïra) est à 2 km à l'Ouest du gisement de Djemi Djema entre le Djebel Fouris et le Djebel Tarfaye. Sa superficie, circonscrite par les sondages de reconnaissance, est de 2.1Km², soit 2.7Km de longueur sur 0.8Km de largeur.

Topographiquement, la zone du gisement, située au pied de Djebel Kef Essnoun, constitue un plateau descendant en pente douce vers le Sud-Ouest. Les cotes topographiques varient de 720m au Sud –Ouest à 810m au Nord-Est (dressant Nord).

Les coordonnées de ce gisement sont les suivantes (les coordonnées Lambert):

$x = 951.500$ et $y = 168.0$ à 170.0 .

I-4. Contexte géologique

I-4.1. Contexte géologique régional de Djebel Onk

Les gisements de phosphates de la région de Djebel Onk sont d'âge Thanétien supérieur. La couche phosphatée a une épaisseur de l'ordre de 30 m. Ces terrains sont structurés régionalement en une suite d'anticlinaux et synclinaux fortement assymétriques et faillés dans leurs flancs, d'axes N80°E au Djebel Onk (**Figure I.1**).

I-4.1.1. STRATIGRAPHIE

La stratigraphie de la région de Djebel Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurante de la région comprend une succession stratigraphique allant du Crétacé supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien). Cette série marine est d'environ 500 m d'épaisseur. Elle est recouverte en discordance par une épaisse série sabloargileuse continentale d'âge Miocène, puis Quaternaire comblant les structures synclinales et fossilisant les série d'âge anté-miocènes (**Figure I.4**).

I-4.1.1.1 – Crétacé

Ce sont les sédiments les plus anciens au coeur de l'anticlinal du Djebel Onk. Tectoniquement, ces formations sont très accidentées. Seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent.

a) Maestrichtien

Les sédiments de cet âge sont représentés par des calcaires blancs massifs avec des intercalations marneuses au coeur de l'anticlinal de Djebel Onk. Le sommet est marqué par une surface ferruginisée et taraudée.

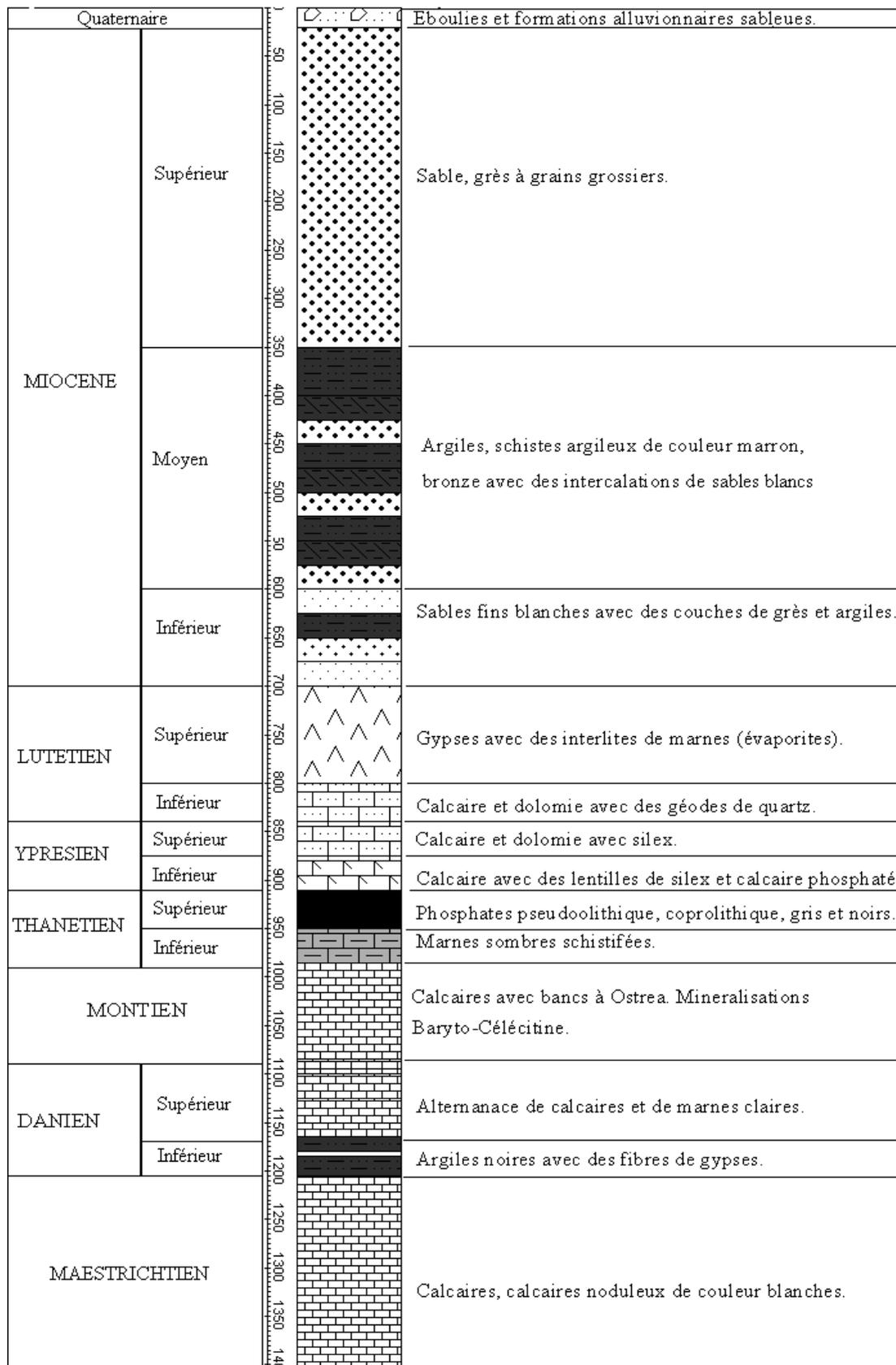


Figure I.3-Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk – Algérie orientale – (Cielensky et Benchernine, 1987). (FERFOS).

I-4.1.1.2– Paléocène

Il est représenté par des sédiments marins assez épais (350 m).

a) Danien

Le Danien est subdivisé lithologiquement en deux sous étages : inférieur et supérieur.

_ Danien inférieur

Il est représenté par des argiles marneuses et schisteuses, de couleur grise foncée au brun vert, intercalé par des marnes dures et irrégulières. L'ensemble est traversé par des filons de gypse. L'épaisseur du Danien inférieur est de 30 à 40 m.

_ Danien supérieur

Il est formé par des calcaires durs blancs, très fins souvent à cassures conchoïdales, intercalées de marnes, argileuses et schisteuses. L'épaisseur varie d'une dizaine de centimètre à un mètre.

b) Montien

Il est représenté par des calcaires détritiques à lumachelles avec des intercalations de marnes et de dolomie ainsi qu'une faible quantité de silex rencontrée. Il renferme de nombreux niveaux à huîtres de différentes couleurs. L'épaisseur moyenne est de 100 m.

c) Thanétien

C'est l'horizon porteur de la minéralisation phosphatée principale. Il se subdivise en deux sous étages.

_ Thanétien inférieur

Le Thanétien inférieur est représenté par des marnes grises foncées à noires schisteuses. Dans la partie inférieure, on note la présence des conglomérats et de minces lits phosphatés ainsi que deux niveaux de marnes à faunes. Au sommet apparaissent des intercalations phosphatées atteignant jusqu'à 2m, surmontées par des calcaires et des marnes à gros gastéropodes. La puissance varie de 30 à 40 m.

_ Thanétien supérieur

C'est la couche exploitable dans les gisements de Djebel Onk. Il débute par un niveau dolomitique à gastéropode, la couche phosphatée est de 30m d'épaisseur en moyenne.

Cette couche d'âge Thanétien supérieur se caractérise par des variations au terme de l'épaisseur d'un gisement à l'autre dans le bassin de Djebel Onk, notant à titre d'exemple; dans la zone du Djemi-Djema où la couche de phosphate est de l'environ 30 m d'épaisseur, situé entre une série de marnes noires feuilletées au mur, et une formation de dolomie, puis de calcaire à silex en toit. Dans la zone de Djebel Onk Nord, le faisceau phosphaté est moins

épais (17 m, au maximum), et il se réduit progressivement vers l'ouest, jusqu'à disparaître complètement (biseau stratigraphique) (Prian et Cortiel, 1993).

I-4.1.1.3 – Eocène**a) Yprésien**

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et il a une épaisseur de 32m, on note :

_ Yprésien inférieur

Il est représenté par des dolomies et calcaires dolomitiques. Des intercalations de phosphates très dolomitiques sont bien observées, on note la présence de nombreux débris de silex noirs.

_ Yprésien supérieur

Il est constitué par une alternance de calcaires, calcaires dolomitiques et marnes.

b) Lutétien

Les formations de cet étage recouvrent en concordance les séries yprésiennes.

Elles sont répandues dans la région de Djebel-Onk (270 m d'épaisseur). On distingue de bas en haut :

_ Lutétien inférieur

Il est caractérisé par une diminution remarquable des calcaires qui sont remplacés par les marnes blanches crayeuses. On note l'existence de géodes de quartz et de nodules de silex, avec une faune caractéristique (Hemither Sitea Moracano). Sa puissance varie de 40 à 50 m.

_ Lutétien supérieur

Ce faciès est évaporitique; il est constitué de gypse et d'argile verdâtre, argile phosphatée verte et bancs de calcaire. A la base, on distingue l'argile verte phosphatée et des bancs de calcaire d'une épaisseur de 10 m. Au sommet, des argiles vertes avec banc de gypse intercalé. Son épaisseur est de 65 m. La faune caractéristique est Ostréa Multicostata et Cardia Placunoides.

I-4.1.1.4 – Miocène

Il est représenté par un complexe de roches terrigènes, de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes. On distingue trois formations lithologiques :

a) Miocène inférieur

Il est représenté essentiellement par des conglomérats, des sables avec des lits minces d'argile siliceuse. La teinte est clair, grise blanchâtre. Sa puissance est de 200 m.

b) Miocène moyen

Il est essentiellement argileux de couleur marron, parfois schisteux, avec des intercalations de sables à grains fins et moyens. Sa puissance atteint 250 m.

c) Miocène supérieur

C'est une série sablo-argilo-conglomératique. Sa puissance atteint 350 m.

I-4.1.1.5- Quaternaire

Les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région. Elles sont essentiellement représentées par des éboulis de pente, de dépôts sableux, des graviers, de dépôts éoliens, alluviaux et fluviaux.

I-4.1.2. Tectonique

la région de Djebel Onk appartient à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien. La série supérieure éocène, du bassin de Djebel Onk – Gafsa – Mélaoui, est structurée en une suite d'anticlinaux et synclinaux dissymétriques, généralement faillés dans leurs flancs, d'axe le plus souvent SW-NE, et décrochés par des accidents transverses N 120° à N 140° E.

Les anticlinaux de Djebel Onk, Djebel Djemi-Djema et Oued Bétita sont localisés à la bordure de la flexure Sud-Atlasique qui correspond à une zone d'affleurement entre le domaine Atlasique mobile et la plate-forme Saharienne stable. Ils appartiennent à la branche Nord de la flexure Sud Atlasique de direction E-W.

L'anticlinal de djebel Onk prolonge des monts de Nememcha jusqu'à l'Est en périclinal sous les formations du Miocène d'une direction E-NE. Cet anticlinal est asymétrique au flanc méridional avec un pendage de 80° et un flanc septentrional de 10°.

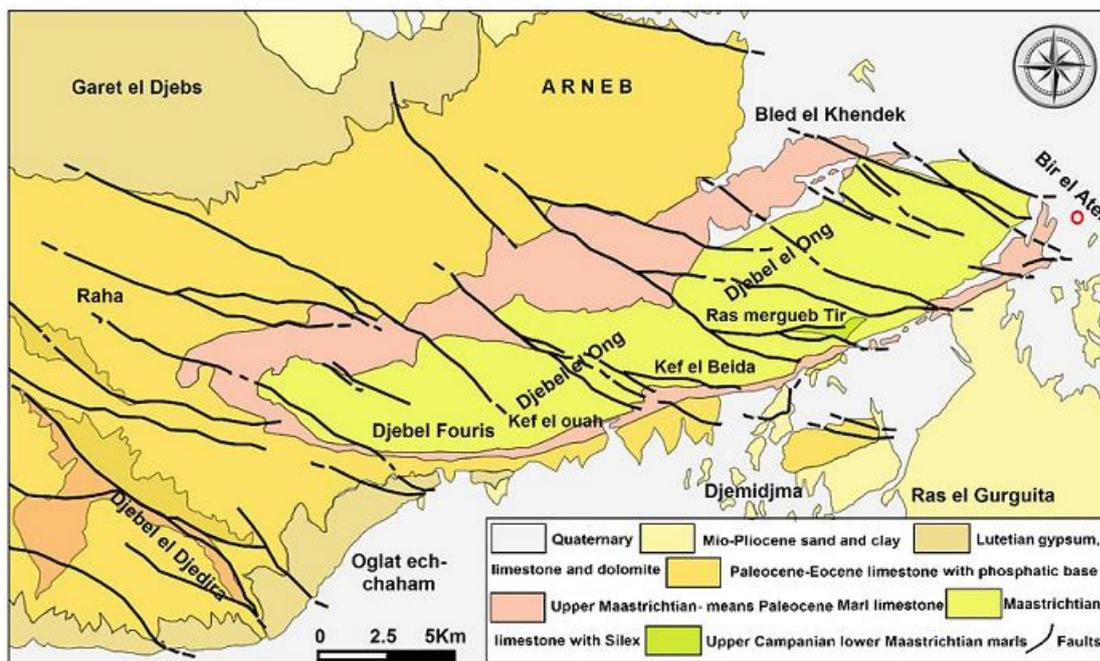


Figure I.4-Carte géologique de djebel Onk (SOMIPHOS).

A. Chronologie des phases de déformations de cette structuration:

Trois phases tectoniques d'ampleur très inégales ont marqué leurs empreintes sur la région de Djebel Onk :

❖ Tectonique Paléocène – Eocène (syndimentaire)

Une phase compressive NW-SE contemporaine à la sédimentation Paléocène, s'exprime par des ondulations et des failles syndimentaires. Cette tectonique précoce, induit des lacunes de sédimentation dans la série Paléocène – Eocène et conduit à l'édification des dispositifs paléogéographiques en hauts-fonds et sillons qui vont contrôler la sédimentation des phosphates. Ces déformations précoces peuvent être liées à la montée diapirique des évaporites triasiques, notamment au Paléocène – Eocène.

❖ Tectonique post – Eocène moyen et anté – Miocène

Contemporaine à l'émersion de la série au Lutétien supérieur, la phase majeure des plissements des Aurès et des déformations distensives transverses (N120° à N150°) induisant un début de destruction de la série crétacé supérieure à éocène en petits horsts et grabens, allongés suivant la direction N170°E qui vont être affectés par la pénéplanation et l'érosion différentielle anté – Miocène. Ces plissements sont, en majorité, antérieurs aux dépôts des sables Miocènes. C'est à la faveur de cette phase tectonique qu'apparaît l'anticlinal de Djebel Onk.

❖ Tectonique tardi – Miocène, post – Burdigalienne à Pliocène – Pléistocène

C'est la phase majeure du plissement de l'Atlas Tunisien. Les plissements de la série Crétacé supérieur, Paléocène, Eocène et Miocène, en grandes structures antiformes et syn formes, jouent en horsts et grabens dans les structures antérieures. Ils forment vers le Sud et sur le flanc inverse des méga plis de Djebel Onk et Djemi Djema (comportement en dressant).

Cette tectogenèse est responsable de la structure actuelle de la région de Djebel Onk.

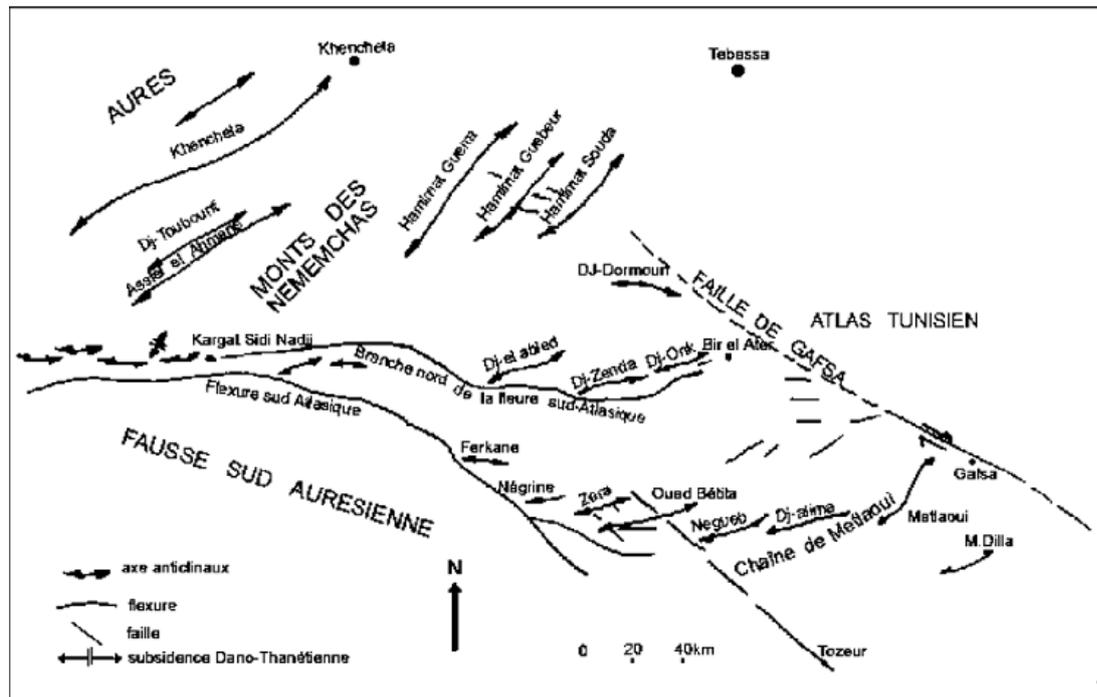


Figure I.5- Carte structurale de la région de Djebel Onk à l'intérieur du bassin de Gafsa-Métlaoui-Dj. Onk (Aissaoui, 1984).

I-4.1.3. Paléogéographie

Au Paléocène supérieur-Eocène inférieur, la région de Djebel Onk appartenait à la partie occidentale du bassin de Gafsa-Metloui-Djebel Onk. Il se différencierait cependant par une subsidence plus marquée, ce qui explique le tonnage énorme de phosphate accumulé, mais aussi les teneurs moyennes en phosphate tricalcique plus faibles que celles enregistrées dans le gisement de Metloui (Ranchin, 1963-a). Ce sillon, occupé par une mer épicontinentale peu profonde, était situé entre l'île ou dôme de Kassarine au Nord, le môle de la Djeffera au Sud et au haut fond de Dj. Fouris à l'Ouest (Fig. 12).

La région a, au cours de son histoire géologique, plusieurs étapes de développement, bien marquées dans les sédiments. Cette évolution fut comme suit :

I-4.1.3.1. Période de sédimentation marine

Cette période de sédimentation qui débute à la fin du développement du bassin géosynclinal couvrant l'Afrique du Nord et allant du Maestrichtien à l'Eocène supérieur. Le Maestrichtien se caractérise par une subsidence lente et une sédimentation calme. A la limite entre le Maestrichtien et le Danien, on note un changement de faciès, précurseur de mouvements orogéniques mettant fin au cycle de sédimentation géosynclinal. La profondeur du bassin diminue alors d'une manière brusque, ce qui reflète dans les roches par une sédimentation argilo-carbonatée qui dure pendant tout le Danien.

Le Montien est une période de lente subsidence et de sédimentation assez calme. La mer est alors peu profonde, les bancs d'huîtres s'y déposaient en masse et ils sont caractéristiques pour les eaux peu profondes.

Au Thanétien inférieur, la profondeur du bassin a de nouveau diminué. On a alors un apport important de substance argileuse et des sédiments argilo-marneux qui indique une fermeture progressive du domaine de sédimentation et une tendance régressive de régime marin. Par contre, le Thanétien supérieur se caractérise par un apport considérable de sédimentation phosphatée qui témoigne d'une réouverture du domaine sédimentaire et du retour des influences transgressives. A la fin de sédimentation phosphatée principale, une phase régressive se produit à nouveau, elle est matérialisée par des remaniements de phosphate, puis localement par un horizon conglomératique à galets de dolomie formé en milieu marin sans indice d'émersion.

La présence de dolomie est l'indice d'une saturation de l'eau de mer proche des conditions qui permettent le dépôt des faciès à évaporites. Elle souligne le caractère régressif de ces faciès phosphatés (Ranchin, 1963-a). Cette phase régressive est suivie, régionalement, par la transgression yprésienne (calcaire à silex) qui déborde largement les limites des formations précédentes. Au Lutétien, on note une lente diminution de la profondeur du bassin, ce qui a conduit à la formation de hauts-fonds et de lagunes et au dépôt d'évaporites. Les variations d'épaisseur, ainsi que l'homogénéité ou l'hétérogénéité de la couche phosphatée elle-même traduisent cette paléogéographie diversifiée. Ainsi, la couche de phosphate, calée entre les marnes noires du mur et les dolomies du toit, est la plus épaisse au niveau des gisements de Djemi-Djema (30 m) et de Kef Es Sennoun (proche de 50 m) qui caractérisent le sillon subsidant.

I-4.1.3.2. Période de sédimentation continentale

A partir du Lutétien supérieur, les terrains s'émergent. L'Oligocène n'a pas laissé de traces du fait de l'érosion anté-miocène. Alors que le Miocène-Pliocène fut une période d'intense sédimentation continentale marquée par les sables, les argiles et les conglomérats. Tandis que le Quaternaire se caractérise par les produits d'érosion qui se déposent sur les flancs et les vallées. Ce sont les colluvions, les alluvions et les éboulis de pente. Des traces d'une glaciation au Pléistocène de courte durée très nette sont bien conservées au Djebel Onk.

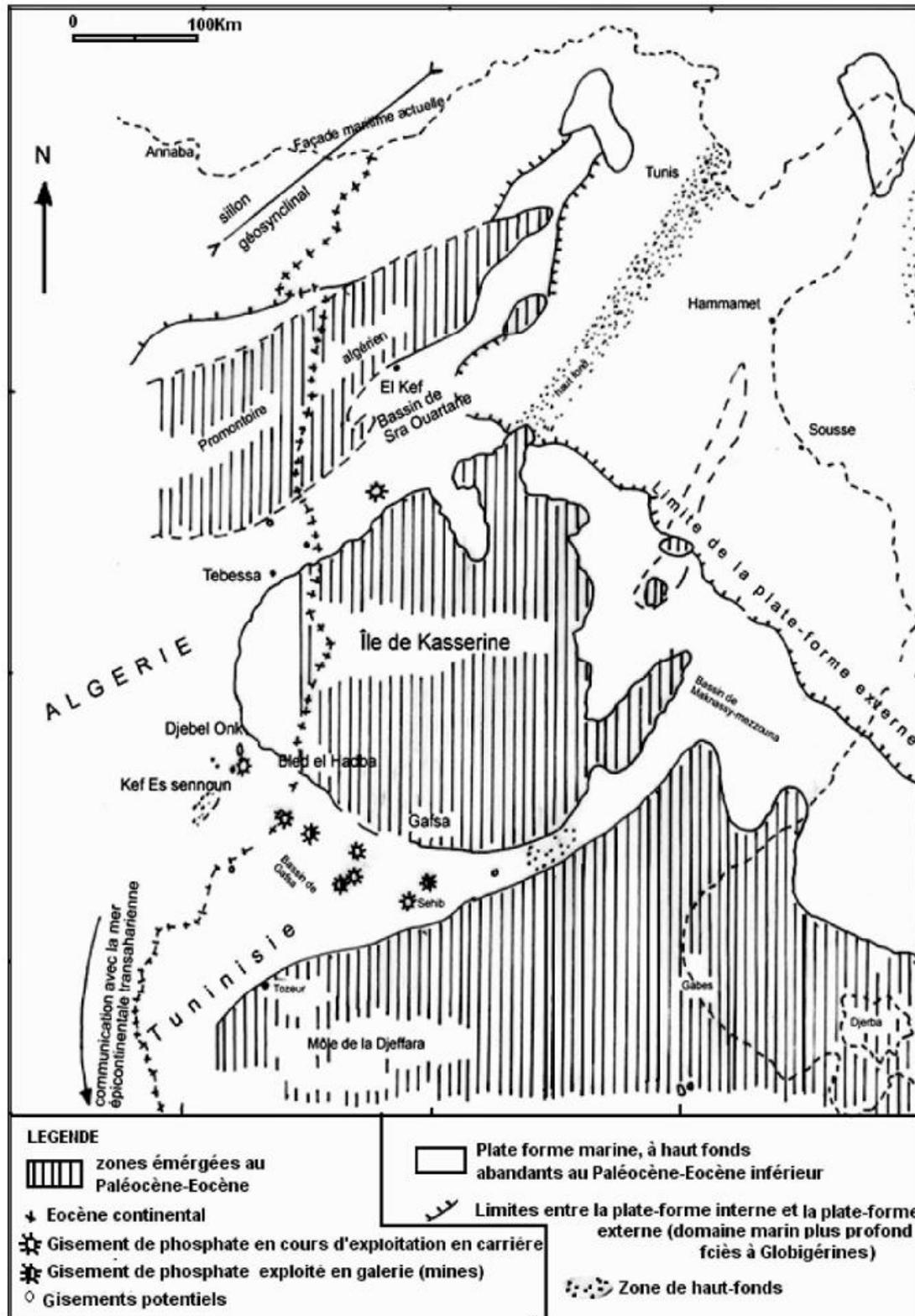


Figure I.6- situation paléogéographique des gisements de phosphates de la région du djebel On à l'intérieur du bassin phosphate de Gafsa, Mélaoui et dj. Onk (Prian et Cortiel, 1993).

I-4.2. Contexte géologique local de Kef Essnoun

La géologie du gisement de Kef Essnoun a été résumée par Cielensky et al., de 1985 à 1987. Kef Essnoun est situé dans le prolongement de la retombée méridionale de la flexure antiforme du Djebel Onk dont la structuration majeure est due à la tectonique post-Miocène. La géologie du gisement de Kef Essnoun est relativement simple. Les réserves géologiques totales de Kef Essnoun ont été estimées à 317 millions tonnes de minerai à 26.53% P₂O₅ et 2.61% MgO dont 168 millions tonnes de réserves prouvées, 50 Mt de réserves probables (zone de rupture de pente, au Sud de la table) et 99 Mt possibles dans les parties les plus profondes du gisement.

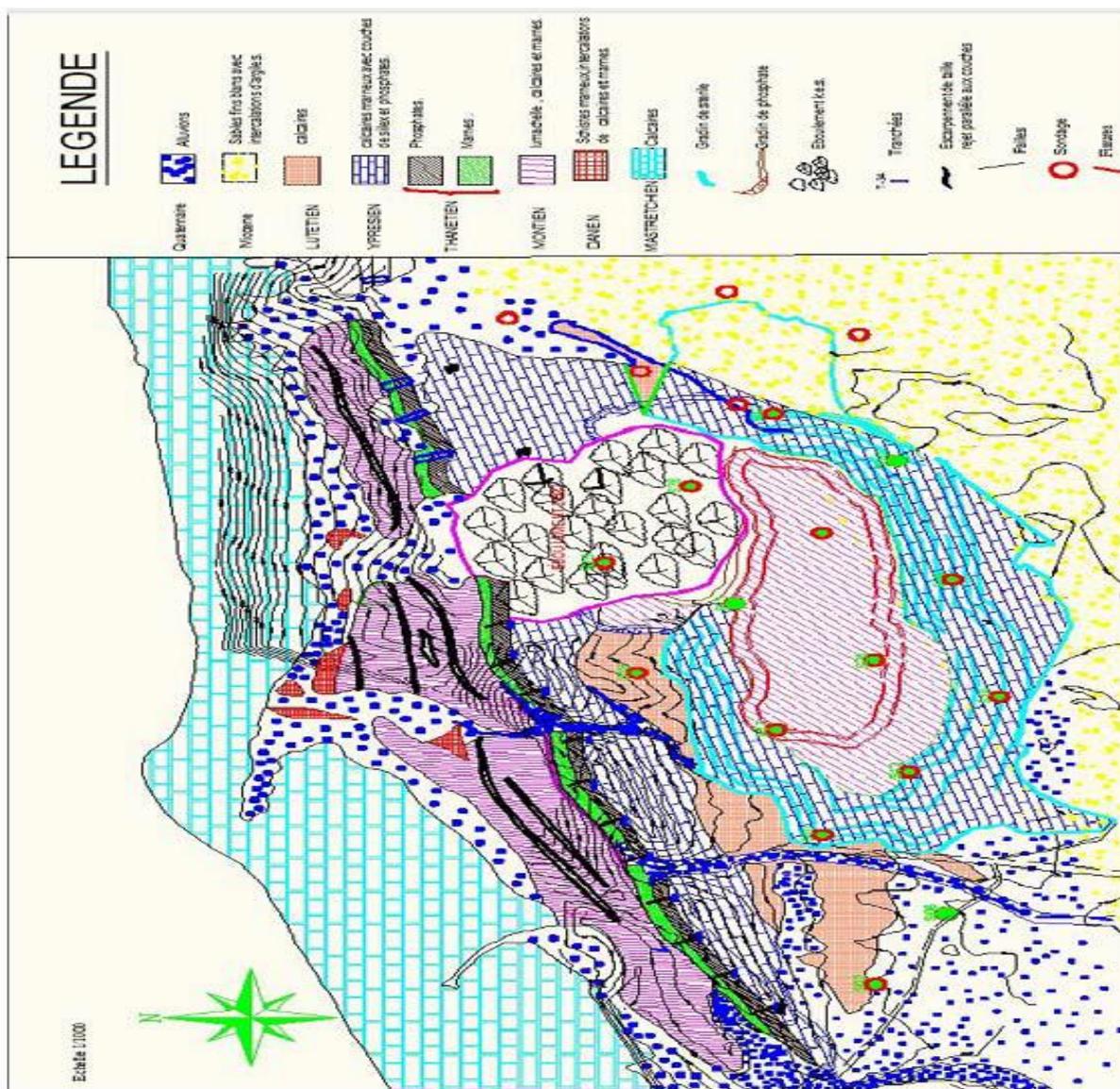


Figure I.7-Carte géologique de Kef Essnoun, (SOMIPHOS).

I-4.2.1. STRATIGRAPHIE

Toute la succession lithologique de Djebel Onk est rencontrée à Kef Essnoun mais s'indifférencie, cependant, par une épaisseur verticale plus importante du faisceau phosphaté (jusqu'à 53 m dans certains sondages).

Le gisement de Kef Essnoun est constitué de bas en haut par la succession lithologique suivante (Cielensky et al., 1985, 1987) :

- ✓ Des formations du Thanétien inférieur (le mur du faisceau phosphaté) sont représentées par des marnes feuilletées, sombres dans lesquelles s'intercalent localement, dans la partie inférieure, deux niveaux de phosphates dolomitiques d'épaisseur infra métrique .
- Le faisceau phosphaté, appartenant au Thanétien supérieur est constitué par une couche unique de phosphate sans intercalation stérile.
- ✓ Au toit du faisceau phosphaté, apparaît la série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien, au-dessus de laquelle se dépose localement les calcaires Lutétien, puis les sables du Miocène et en dernier les dépôts récents du Quaternaire constitués essentiellement d'alluvions.

L'épaisseur totale du recouvrement stérile varie de 40 m au nord à 198m au sud.

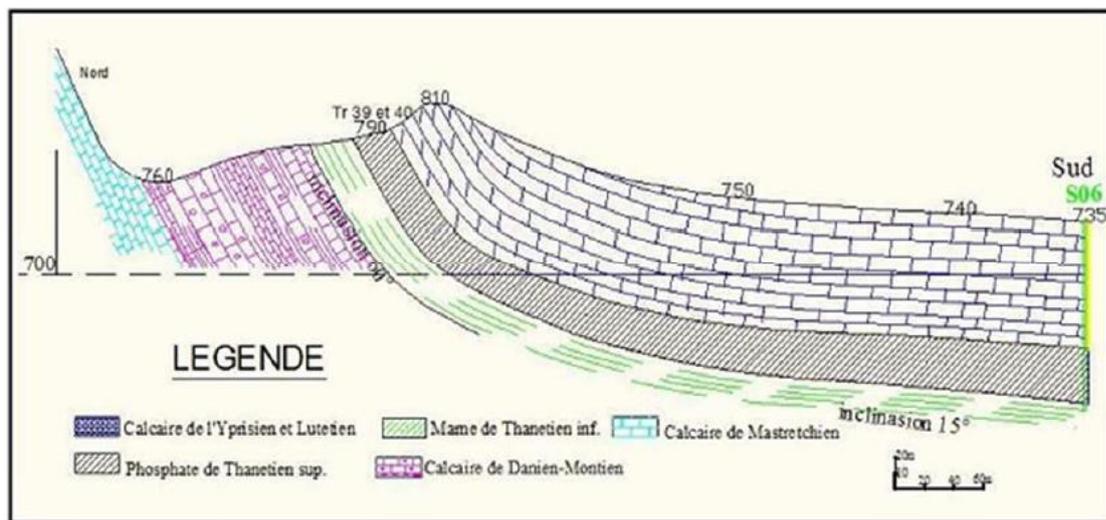


Figure I.8-Coupe géologique du gisement de Kef Essnoun dans la partie des dressants(SOMIPHOS).

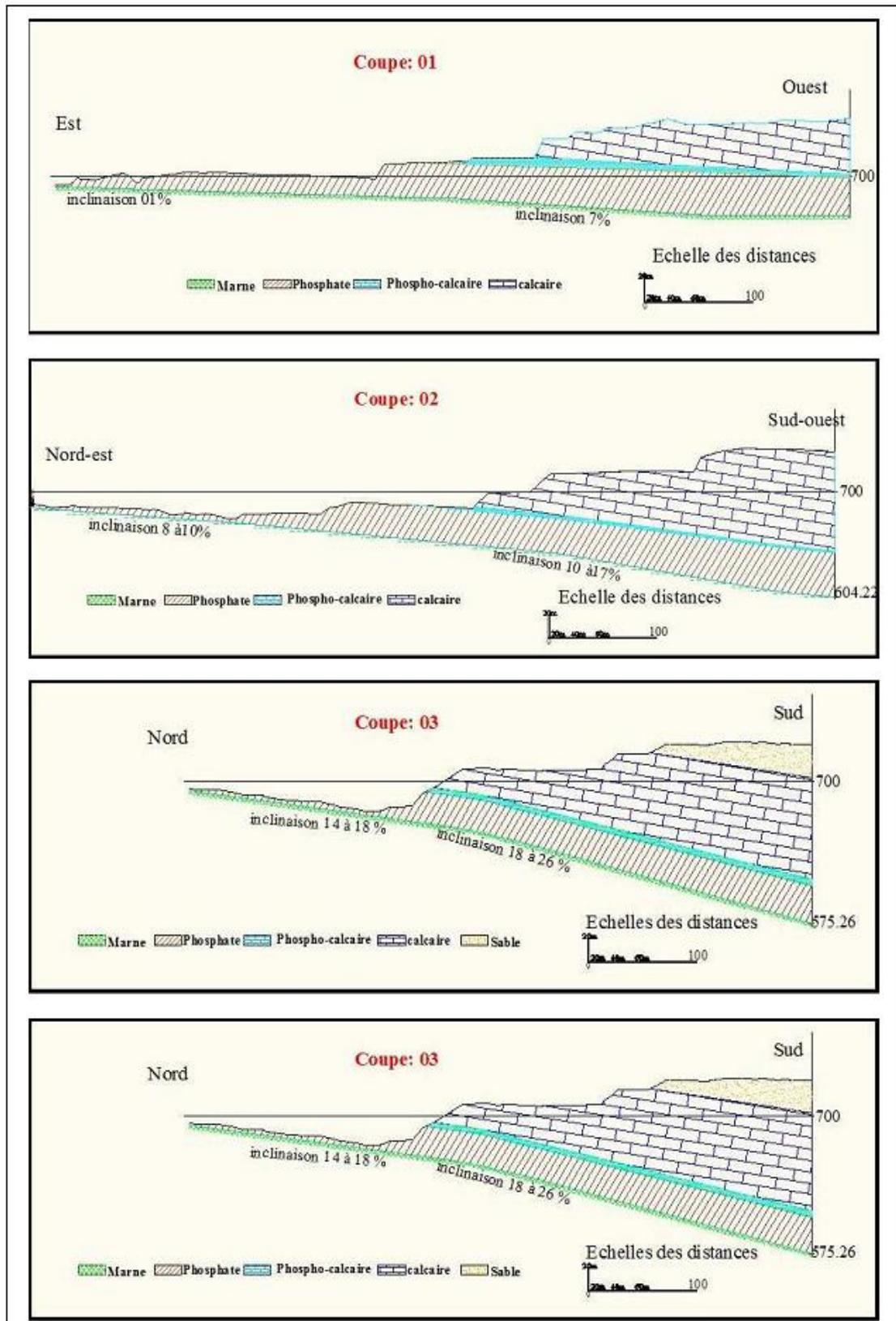


Figure I.9-Coupes géologiques à travers le gisement de Kef Essnoun (SOMIPHOS).

I.4.2.2. Tectonique

La tectonique de Kef Essnoun a été décrite par Cieslinski et al., (1985,1987), Prian et Cortiel, (1993) :

Le gisement de Kef Essnoun est caractérisé par une structure simple, qui se présente sous forme d'une table monoclinale à pendage régulier, sous un angle de 5 à 10° vers le Sud.

Au sud de la table, on aperçoit une zone de rupture de pente où le pendage des couches atteint 20°. Une série de trois failles majeures de direction NNO-SSE traversent le gisement mais n'engendrent pas de déformations majeures sur la géométrie de la couche phosphatée.

Par contre, dans la zone des dressants de Kef Essnoun, allongée N 75° E, la tectonique souple et cassante a entraîné un changement brusque du pendage de la couche phosphatée affleurant où l'angle de pendage est sub-vertical ou fortement incliné vers le Sud-est ou le Nord-ouest.

Ces dressants, représentés par les formations du Paléocène (Danien, Montien et Thanétien) et de l'Eocène inférieur (Yprésien) correspondant à la zone de flexure faille du flanc inverse de l'anticlinal de Djebel Onk.

Au Nord-est des dressants, la série est renversée et la couche de phosphate plonge suivant un angle de 30° à 60° vers le Nord-ouest.

Par contre dans la partie centrale des dressants, la couche de phosphate est en série normale et plonge vers le sud.

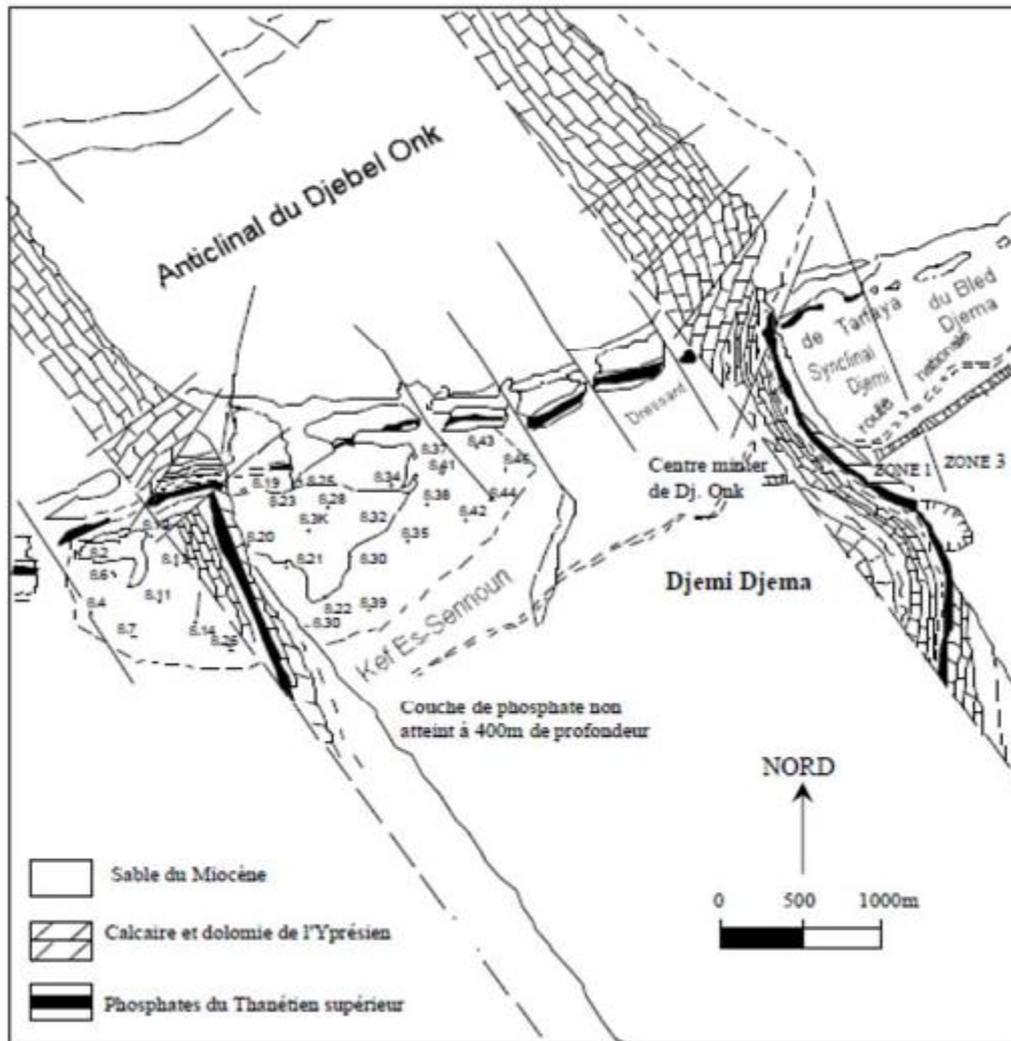


Figure I.10-Structure de la couche de phosphate dans la zone de Kef Essnoun et localisation des sondages carottés (Prian et Cortiel, 1993).

I.5. Conclusion

Le gisement de Kef Essnoun est situé sur le flanc méridional de l'anticlinal de Djebel Onk. Il est caractérisé par un faciès phosphaté d'une épaisseur atteignant les 50m et un recouvrement de stérile constitué généralement par une série calcaire-dolomitique à silex de l'Yprésien et surmonté localement par les calcaires de Lutétien puis par les sables du Miocène et les alluvions du Quaternaire. Son épaisseur totale varie de 40 m à 198 m. De plus, la région est caractérisée par un réseau hydrographique généralement sec.

Le choix des paramètres d'exploitation de la mine de Kef Essnoun dépend généralement des caractéristiques des terrains et de la sécurité du travail. L'étude de ses caractéristiques concernant les conditions géologiques, hydrogéologiques et les paramètres d'exploitation ont permis d'obtenir une image aussi complète que possible sur les caractéristiques des massifs rocheux traversés afin d'évaluer leurs stabilités.

CHAPITRE II :
Caractéristiques
géomécanique
des massifs rocheux

II.1. Introduction

Le but essentiel de la caractérisation des massifs rocheux est de fournir à l'ingénieur des données qualitatives et quantitatives nécessaires pour décrire la structure et évaluer les propriétés mécaniques et hydrauliques des massifs à l'échelle des volumes sollicités par des ouvrages (Antoine, 1992).

Les masses rocheuses sont constitués de la matrice rocheuse ou la roche intact et des discontinuités (failles, fractures, fissures, joints). Les propriétés géotechniques de la roche intacte sont souvent au-delà des exigences des projets de génie civil. Quand la roche intacte est affectée par des discontinuités, elle perd beaucoup de ses propriétés. Il est cependant, impératif quand on travail dans les massifs rocheux de prendre en considération les propriétés de la roche intacte et des discontinuités. Les propriétés des discontinuités sont la direction, le pendage, la longueur, espacement, rugosité, ouverture, conditions des épontes, et matériaux de remplissage.

La caractérisation des massifs rocheux est souvent fait selon les recommandations de la société internationale de mécanique des roches (ISRM suggested Methods.1978).

II-2. Caractérisation des massifs rocheux

En géologie, une roche est un assemblage naturel de grain minéraux collés les uns aux autres ou liés avec un ciment ou noyer dans une matrice. Les roches sont des matériaux solides.

En géotechnique une roche est définie sur la base de certaines propriétés telles que :

- La dureté de la roche, qui peut s'exprimer par le paramètre de résistance à la Compression simple de l'échantillon ;
- Le caractère et le degré d'altération, de fracturation et la solubilité de la roche;
- L'aptitude au gonflement, la plasticité, etc.

Ainsi Fissenko (1965) propose de partager les roches en 5classes :

- ✓ Les roches dures, avec R_c (résistance à la compression) > 80 MPa, peu altérables, non gonflantes : les roches magmatiques et métamorphiques et certains calcaires et grès, pas fracturés, pas ou peu altérés .
- ✓ Les roches semi dures, avec $8 < R_c < 80$ MPa, fracturées, intensivement altérables, non gonflantes, non plastiques : roches magmatiques et métamorphiques altérées, grès argileux, schistes, argilites, pélites, marnes, conglomérats calciques, calcaires détritiques, charbons.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécanique des massifs rocheux

- ✓ Les roches faibles (argileuses), avec $R_c < 8$ MPa, gonflantes, plastiques, très fortement altérables : roches magmatiques et métamorphiques très fortement altérées ou complètement désintégrées, ainsi que les roches de la seconde classe altérées, toutes les argiles, loess, sables argileux, les limons, craies, certaines alluvions et moraines ;
- ✓ Les roches non cohérentes, sans cohésion, l'angle de frottement et l'angle de Talus naturel étant de $28-38^\circ$, non plastiques, non gonflantes : les zones caillouteuses au pied des talus des roches des deux premières classes, graviers et sables purs ;
- ✓ Les vases, les tourbes, et les sols mouvants, avec une cohésion < 20 KPa, le frottement interne absent en état saturé.

II.2.1. Structure des massifs rocheux

La roche a une structure discontinue. Elle peut être assimilée à un milieu composé d'éléments continus plus ou moins homogènes, de forme géométrique quelconque ; la matrice rocheuse, et de fines zones situées entre ces éléments continus, qualifiées de 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.

En règle générale, on considère la succession suivantes (Calembert et al.,1978) :

- Minéraux, considérés comme éléments de base, postulés non-affectés de discontinuités;
- Matériaux rocheux constitués de minéraux séparés par des micros discontinuités;
- Massifs rocheux constitués de matériaux rocheux séparés par les macros discontinuités.

Les caractéristiques d'un matériau à une échelle donnée dépendent de celles des constituants et de celles des discontinuités.

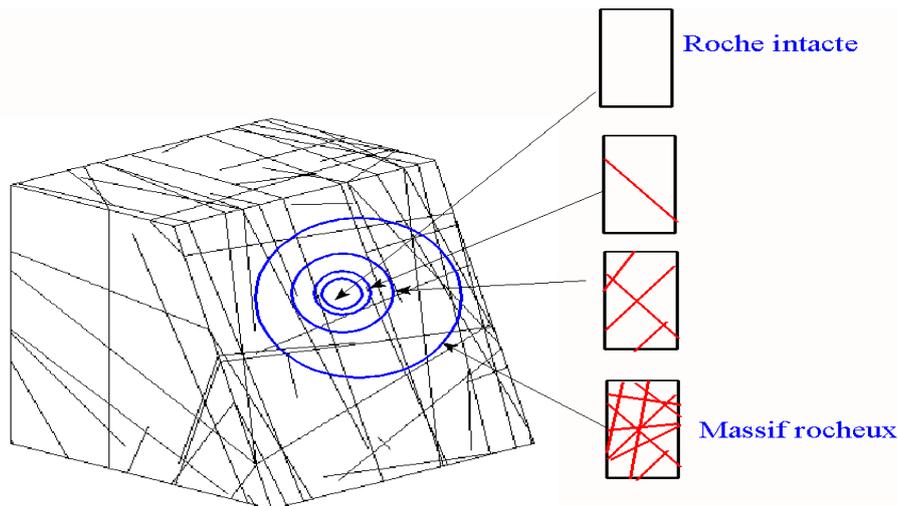


Figure II.1- Structure d'un massif rocheux (Zhao. J, 2008).

II.2.2. Matrice rocheuse

La matrice rocheuse est définie comme un volume de roche intacte qui possède des propriétés homogènes et non coupée par des discontinuités. La matrice rocheuse fait ainsi 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.

II.2.3. PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUE DES ROCHES

La reconnaissance des massifs rocheux permet d'appréhender les problèmes qui peuvent se poser lors de l'étude d'un projet de construction ou lors de l'expertise de sinistres. La reconnaissance des propriétés d'un terrain constitue le lien entre la cause d'un sinistre et les remèdes que l'on se propose de mettre en place.

Les propriétés physico-mécaniques des roches et des sols sont une source capitale dans la compréhension de son comportement dont la complexité est avérée. Ces dernières ont une grande influence sur la stabilité des talus et des pentes.

Les propriétés physico-mécaniques et technologiques des roches ont une grande influence sur la stabilité des terrains. Parmi les propriétés physiques, les plus importantes sont : la masse volumique, la porosité et l'humidité. Les propriétés mécaniques sont : la résistance au cisaillement, la résistance à la traction et la résistance au cisaillement, l'angle de frottement interne et la cohésion.

II.2.3.1. Les propriétés physiques des roches

- a. La porosité
- b. La masse volumique
- c. La teneur en eau
- d. Le degré de saturation
- e. La dureté
- f. Le degré de fissuration des roches
- g. Module de Young:
- h. L'abrasivité
- i. L'altérabilité

a. La porosité

C'est le rapport du volume des vides V_v de la roche au volume total V_t :

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

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

Selon la porosité, les roches sont classées en :

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

b. La masse volumique

C'est la masse de l'unité de volume de la roche (g/cm^3). Suivant l'état du matériau, on définit : ρ_s la masse volumique absolue ou masse volumique du solide, ρ_h la masse volumique naturelle, ρ_d la masse volumique sèche et ρ_{sat} la masse volumique saturée.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad ; \quad \rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad ; \quad \rho_h = \frac{M_h}{V_t} \quad ; \quad \rho_{\text{sat}} = \frac{M_{\text{Sat}}}{V_t} \quad (2)$$

avec :

- M_s la masse du matériau sec ; g
- le volume des grains après broyage ; cm^3

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

- V_t le volume de l'échantillon ; cm^3
- M_h la masse naturelle ; g
- M_{Sat} la masse de l'échantillon saturée ; g.

ρ_d dépend de la porosité de la roche, par contre ρ_s ne dépend que de la minéralogie.

c. La teneur en eau

C'est le rapport de la masse d'eau M_w , à la masse du solide sec.

$$W = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \quad (3)$$

- M_w est la masse d'eau.
- M_t est la masse totale de l'échantillon.
- M_s est la masse sèche des grains solides.

d. Le degré de saturation

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

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (4)$$

- V_w : volume de l'eau dans l'échantillon, cm^3
- V_v : volume des vides, cm^3

e. La dureté

La dureté d'un minéral est due à la structure du cristal lui-même et comment les atomes qui le forment, à l'échelle microscopique, sont organisés. Plus ces atomes sont liés fortement entre eux, plus le minéral sera dur. C'est donc une propriété propre au minéral, et elle permet de le reconnaître. Certains minéraux peuvent changer de couleur, mais pas de dureté. La mesure de la dureté permet donc de reconnaître un minéral.

Le scientifique, Friedrich Mohs, a eu l'idée de choisir dix minéraux, et de les classer du plus tendre au plus dur ; ils sont numérotés de 1 à 10, et servent d'échelle : c'est ce que l'on appelle l'échelle de Mohs :

Minéral	Talc	Gypse	Calcite	Fluorine	Apatite	Orthose	Quartz	Topaz	Corindon	Diamant
Dureté	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tableau.II.1-Echelle de dureté de Mohs.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

Il existe aussi des pointes de métal numérotées, et créées spécialement pour cela : chacune a une dureté égale à un des minéraux de l'échelle de Mohs : ils sont très pratiques pour mesurer la dureté, surtout quand le scientifique travaille en exploration sur le terrain.

Cette mesure de la dureté est essentiellement réservée aux pierres calcaires. La détermination de la largeur d'une rayure fournit pour chaque matériau une valeur chiffrée de la dureté. Ceci présente l'avantage de pouvoir mettre en relation les valeurs de dureté avec celles se rapportant à des caractéristiques physiques et mécaniques .

f. Le degré de fissuration des roches

Les fissures ou les discontinuités sont la clef du comportement des roches et des massifs rocheux. On peut les définir comme des vides plats dont le rapport de l'épaisseur à la longueur est de l'ordre de 10 à 3. Sous l'effet des charges, ces fissures se referment progressivement, donc avec un changement de géométrie et, comme pour les sols, avec une non-linéarité entre efforts et déformations, du moins tant que les fissures ne sont pas complètement fermées, ce qui se produit à des pressions variables selon les roches et leur état de fissuration, mais qui peut être de l'ordre de 25 à 50 Mpa pour un calcaire (soit la pression géostatique correspondant à une profondeur de 1000 à 2000 m).

La présence des fissures a une importance considérable (à l'échelle du joint de grains). L'indice de fissuration est égal à la distance moyenne entre les fissures :

$$ID = \frac{L}{n}(5)$$

- L : longueur de la partie étudiée du massif (en m).
- n : nombre de fissures sur la partie mesurée.
- Le tableau II-2 donne une classification des roches en fonction des valeurs de ID.

Classe	Interval moyen entre discontinuités	Densité des discontinuités
ID1	>200	Très faible
ID2	60 à 200	Faible
ID3	20 à 60	Moyenne
ID4	6 à 20	Forte
ID5	< 6	Très forte

Tableau .II.2-Classification des discontinuités en fonction d'ID (d'après B.R.G.M.- Guide de prospection des matériaux de carrière).

g. Module de Young:

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte.

La loi d'élasticité est la loi de Hooke:

$$\sigma = E * \epsilon \quad (6)$$

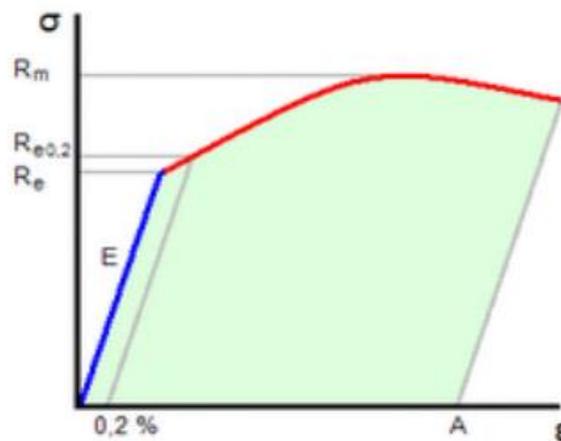


Figure II.2-Diagramme contrainte-déformation.

- σ : est la contrainte (en unité de pression).
- E : est le module de Young (en unité de pression).
- ϵ : est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).

h. L'abrasivité :

L'abrasivité caractérise la capacité d'une roche à provoquer l'usure d'un outil tel que pièce de concasseur, taillant de forage, molette ou pic de machine foreuse. Cette propriété est importante pour les travaux d'exploitation des matériaux rocheux, en souterrain comme à ciel ouvert. Elle dépend à la fois de la teneur en minéraux durs (quartz notamment) et de la résistance de l'assemblage des grains (cohésion de la roche).

i. L'altérabilité :

On appelle altérabilité la sensibilité d'une roche aux modifications du milieu environnant.

L'altération physico-chimique traduit la capacité de gonflement, de délitage ou de dissolution d'une roche. Divers essais existent pour quantifier l'altérabilité d'une roche ; aucun cependant ne s'est véritablement imposé.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

En France, pour la réutilisation en terrassement des matériaux rocheux, a été défini un coefficient de dégradabilité, fondé sur l'évolution granulométrique de granulats après des cycles d'immersion-séchage conventionnels : l'essai met bien en évidence le caractère évolutif des roches marneuses ou schisteuses.

II.2.3.2. Les propriétés mécaniques des roches :

- a. La résistance à la compression
- b. La résistance à la traction
- c. La résistance au cisaillement
- d. La cohésion et l'angle de frottement interne

Les caractéristiques mécaniques des roches sont: la résistance à la compression, à la traction, à la flexion, au cisaillement, les déformations, l'élasticité, la plasticité, le module de Young (module d'élasticité), le coefficient de poisson, l'angle de frottement interne, la cohésion, la vitesse de propagation longitudinale et transversaleetc.

a. La résistance à la compression :

Elle est déterminée lors des essais de compression simple. Dans cet essai, l'échantillon est pris sous la forme d'une carotte (éprouvette cylindrique), d'élancement L/D (L : hauteur, D : diamètre) 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. On appelle résistance à la compression (notée σ_c) la contrainte maximale supportée par l'échantillon avant la rupture lors d'un essai de compression. Elle est donnée par la formule suivante :

$$RC = \frac{F}{S} [\text{en kgf/cm}^2] \quad (7)$$

- F : effort (charge) maximale atteinte (juste avant la rupture).
- S : section ou surface sur laquelle on applique l'effort F .



Figure II.3. Dispositif expérimental.

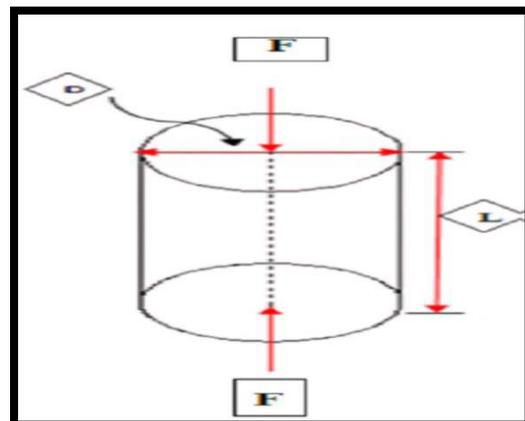


Figure II.4. Schéma de la compression uniaxiale.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

Le **tableau. II.3** donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la compression proposée par la société internationale de mécanique des roches.

Roches	Faiblement résistantes	moyennes	Très résistantes	résistantes
σ_c (MPa)	< 5	20	60	> 60

Tableau. II.3- Classification des roches en fonction de la résistance à la compression.

b. La résistance à la traction

- **Traction simple (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 décohésion des échantillons des roches massives.
- $R_t = \frac{P_{\max}}{A_0}$ [en kgf/cm²] (8)

Avec:

P_{\max} = valeur finale atteinte par l'effort appliqué.

A_0 = surface transversal

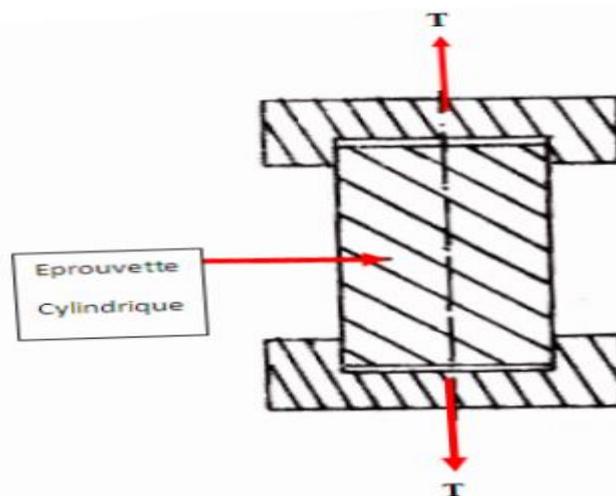


Figure II.5. Essai de traction directe.

- **Essai brésilien (L'essai de résistance à la traction indirecte):** C'est l'essai de traction le plus commun pour les roches (essai à la traction indirecte). Pour réaliser cet essai, on utilise une éprouvette de longueur à peu près égale au diamètre. L'éprouvette

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

est placée entre les plateaux de la presse puis elle est chargée. La contrainte de traction est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_t = \frac{2F_{\max}}{\pi DL} [\text{en kgf/cm}^2] \quad (9)$$

avec :

- F_{\max} la charge maximale appliquée
- D et L : dimensions de l'éprouvette cylindrique.



Figure II.6. Dispositif expérimental

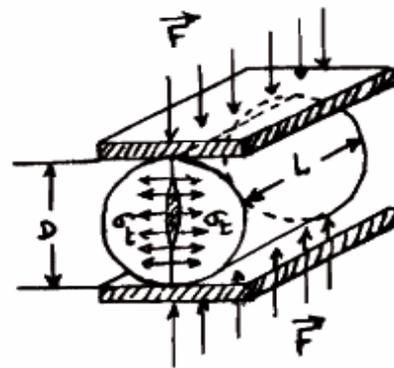


Figure II.7. Schéma de la Traction indirecte.

Le tableau II.4. donne une classification des roches en fonction de leur résistance à la traction.

Roches	Faiblement résistantes	moyennes	Très résistantes	résistantes
σ_t (MPa)	0.40	1.50	4.00	> 20

Tableau II.4. Classification des roches en fonction de la résistance à la traction.

La contrainte de traction est fonction de la contrainte de compression : $\sigma_c = k \cdot \sigma_t$

Avec $3 < k < 10$ (dans la pratique, on prend $k = 10$).

c. La résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement représente la contrainte tangentielle limite avant la rupture dans un essai de cisaillement.

On distingue :

- Cisaillement simple
- Cisaillement par torsion
- Cisaillement par compression

✓ Cisaillement simple :

La résistance au cisaillement est définie par la relation suivante :

$$R_t = \frac{P_{\max}}{S} : [\text{en kgf/cm}^2] \quad (10)$$

Avec:

- P_{\max} : effort tangentielle entraînant la rupture
- S : Surface sur laquelle on applique l'effort P .
 - Dans le cas d'un cisaillement simple avec une seule surface : $S = h.L$
 - Dans le cas d'un cisaillement simple avec une deux surfaces : $S = 2.h.L$
 - Dans le cas d'un cisaillement simple avec une seule cylindrique : $S = d.L$

h : largeur de l'échantillon ; L : longueur de l'échantillon ; d : diamètre du cylindre.

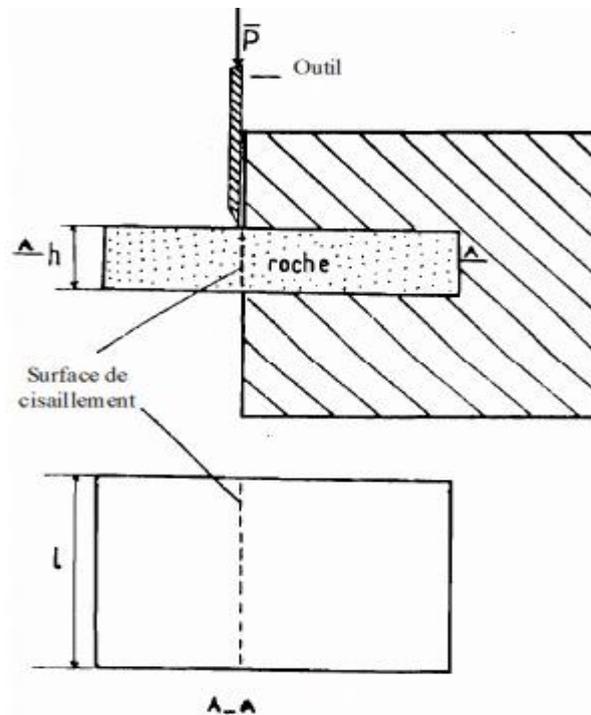


Figure II.8. Cisaillement simple avec une surface de cisaillement.

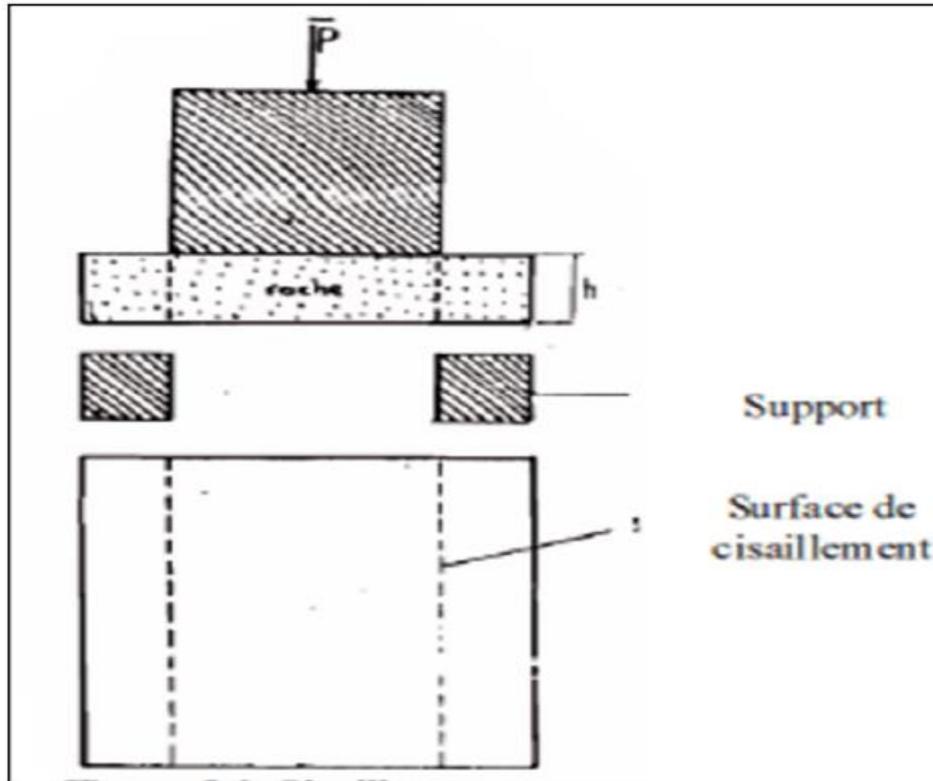


Figure II.9. Cisaillement simple avec deux surfaces de cisaillement.

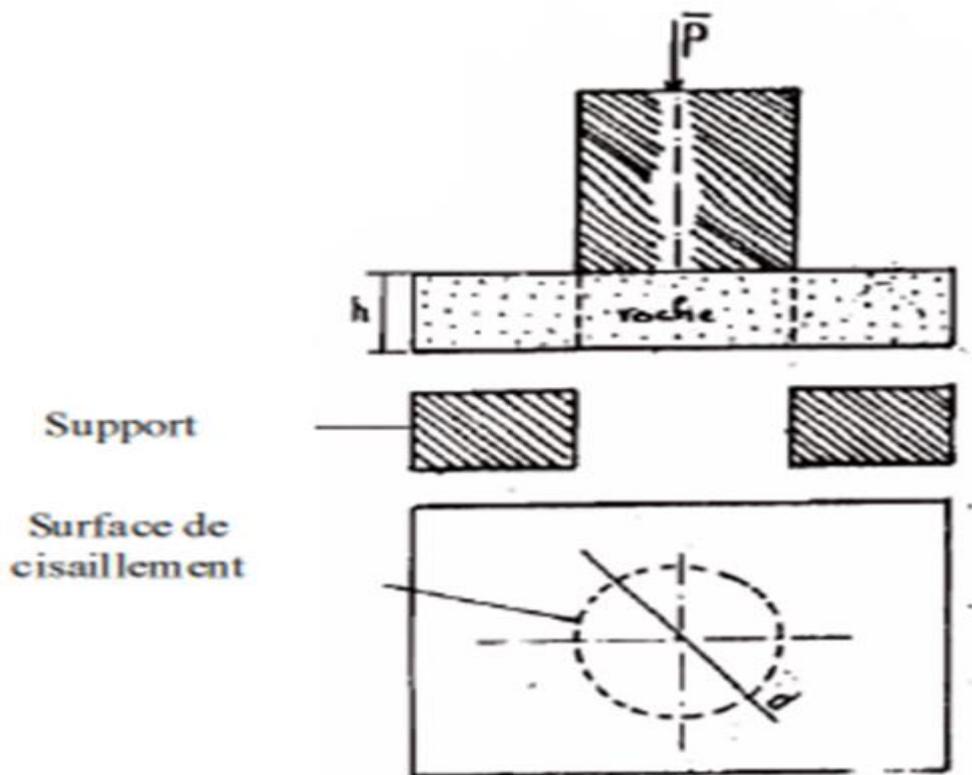


Figure II.10. Cisaillement simple avec une surface cylindrique.

✓ Cisaillement par torsion :

Dans ce cas, l'échantillon de forme cylindrique est soumis à un couple de torsion. Ce dernier va engendrer des contraintes de cisaillement sur chaque section transversale. Quand ces contraintes atteignent une valeur critique, elle nous donne la résistance de cisaillement par torsion définie par la formule suivante :

$$R_t = \tau_{\max} = \frac{M_t}{W} \text{ [en kgf/cm}^2\text{]} \quad (11)$$

- ❖ M_t : couple de torsion
- ❖ W : moment résistant, avec $W = d^3/16\pi$; d : diamètre de l'échantillon.

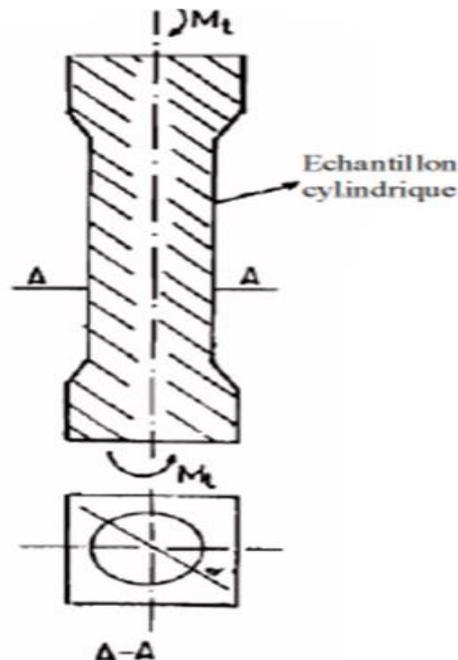


Figure II.11. Cisaillement par torsion.

✓ Cisaillement par compression :

On applique un effort de compression F incliné avec un angle α par rapport à la surface de cisaillement. La contrainte transmise par l'échantillon se décompose en une composante normale (σ_n) et une composante tangentielle (τ) ; quand cette dernière atteint une certaine valeur, l'échantillon se rompt[55]. Cette valeur critique est la résistance au cisaillement par compression de la roche. Les deux contraintes sont définies par les formules suivantes :

$$\tau = \frac{P \cdot \cos \alpha}{S} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{P \cdot \sin \alpha}{S} \quad (13)$$

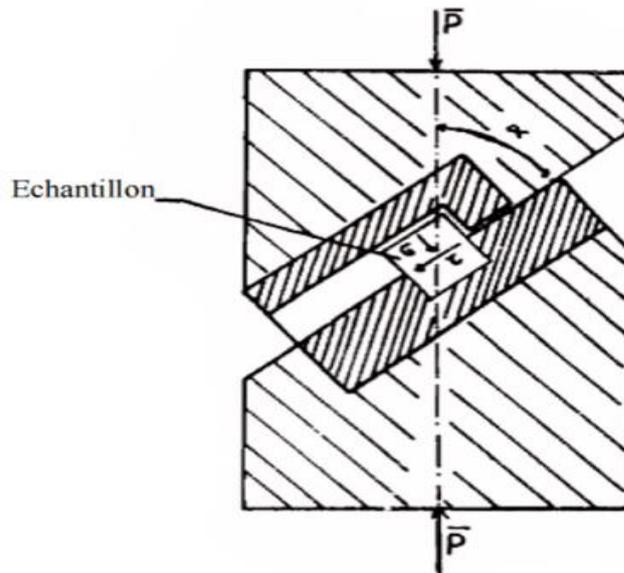


Figure II.12. Cisaillement par compression .

Les échantillons utilisés ont une forme cubique ou cylindrique dont le diamètre est égal à la longueur. L'angle α varie de 30° à 60° .

La courbe représentative de (τ) en fonction de (σ_n) est donnée sur la figure. A partir de cette courbe on peut déterminer graphiquement la cohésion et l'angle de frottement interne de l'échantillon (C et Φ). Ces deux paramètres seront définis dans le paragraphe suivant.

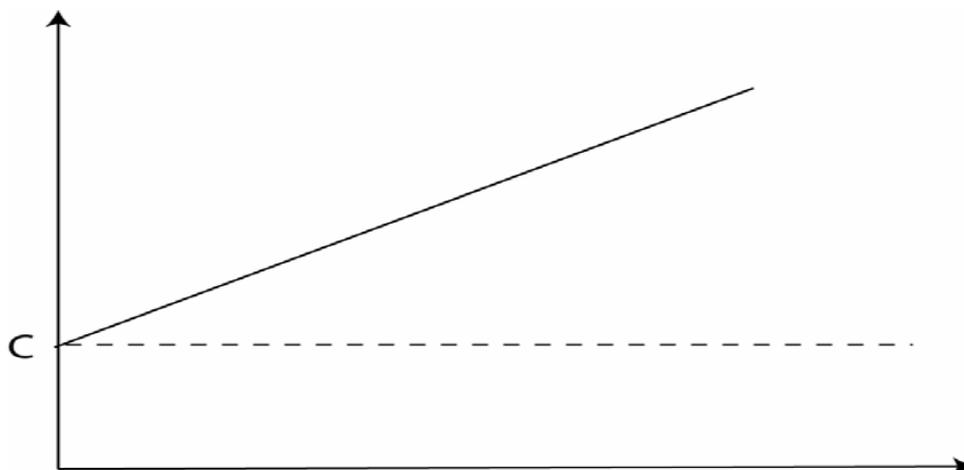


Figure II.13. Courbe représentative de τ en fonction de σ_n

d. La cohésion et l'angle de frottement interne

✓ la cohésion (c)

Les roches sont beaucoup plus cohésives que les sols, mais il existe d'importantes différences de la valeur de la cohésion entre les types de roches, par exemple entre un 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.

La cohésion d'un échantillon est donnée par la relation suivante :

$$C_{ech} = \frac{R_c \cdot R_t}{2 \cdot \sqrt{R_c R_t - 3R_t^2}} \quad (14)$$

Tel que :

- ❖ R_c : c'est la résistance à la compression en MPa;
- ❖ R_t : c'est la résistance à la traction en MPa.

✓ L'angle de frottement interne (Φ)

L'angle de frottement interne correspond à l'angle formé naturellement par un matériau mis en tas, par rapport à l'horizontale. Il dépend du type de sol et plus particulièrement de l'échouage de ses grains : plus ces derniers sont anguleux, plus l'angle de frottement interne sera élevé. Ainsi, cet angle sera nettement plus élevé dans le cas de graviers que pour un sol à forte teneur en argiles.

L'angle de frottement interne est donné par la relation c :

$$\Phi_{ech} = \arcsin \left\{ \frac{R_c - 4 R_t}{R_c - 2 R_t} \right\} \quad (15)$$

Tel que :

- ❖ R_c : c'est la résistance à la compression en MPa;
- ❖ R_t : c'est la résistance à la traction en MPa.

II.2.4. PROPRIETES STRUCTURALS (les discontinuités):

II.2.4.1. Description des discontinuities:

Une discontinuité est définie comme étant toute cassure mécanique ou fracture ayant une résistance en tension négligeable dans une roche (Priest, 1993). Il est important de

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécanique des massifs rocheux

distinguer entre les discontinuités naturelles, qui ont une origine géologique et les discontinuités artificielles qui sont créées par des activités humaines comme l'excavation d'un massif rocheux. Bien que les discontinuités aient souvent une géométrie irrégulière ou ondulée, il y a généralement une échelle à laquelle la surface totale ou une partie de cette surface est suffisamment plane pour qu'elle soit représentée par une seule valeur d'orientation



Figure II.14-Structure géométrique d'un massif rocheux de calcaire au Nord du Liban (M. Chalhoub) .

II.2.4.2. Morphologie d'une discontinuité :

Plusieurs paramètres caractérisent la morphologie d'une discontinuité. Nous présentons leur définition de la façon suivante:

- ❖ **Type de roche** : Le type de roche est défini par son origine qui peut être sédimentaire, ignée ou métamorphique.
- ❖ **Type de discontinuité** : Les types de discontinuité s'étendent des joints de tension de longueur limitée à des failles pouvant atteindre plusieurs kilomètres.
- ❖ **Persistance** : C'est la mesure de la longueur continue ou de la surface d'une discontinuité. La longueur des traces des discontinuités est la seule quantification possible de la dimension des discontinuités sur le terrain.
- ❖ **Rugosité** : La rugosité d'une surface de discontinuité est souvent un élément important en matière de résistance au cisaillement, en particulier là où la discontinuité est sans

déplacement et imbriquée. La rugosité devient moins importante lorsque la discontinuité est remplie.

- ❖ **Résistance des épontes** : La résistance de la roche formant les parois des discontinuités influence la résistance au cisaillement des surfaces rugueuses. Lorsque des contraintes élevées, par rapport à la résistance des épontes, sont générées à des points de contact locaux durant le cisaillement, les aspérités seront broyées ou cisailées et conduiront à une réduction de la composante relative à la rugosité de l'angle de frottement.
- ❖ **Désagrégation** : La désagrégation contribue à la réduction de la résistance de cisaillement des discontinuités et du massif rocheux.
- ❖ **Ouverture** : C'est la distance perpendiculaire séparant deux épontes adjacentes d'une discontinuité ouverte.
- ❖ **Type de remplissage** : C'est le matériau séparant les épontes adjacentes d'une discontinuité.
- ❖ **Écoulement** : L'emplacement de l'infiltration de discontinuités fournit des informations sur l'ouverture parce que le débit des eaux souterraines se concentre presque entièrement dans les discontinuités (perméabilité secondaire).

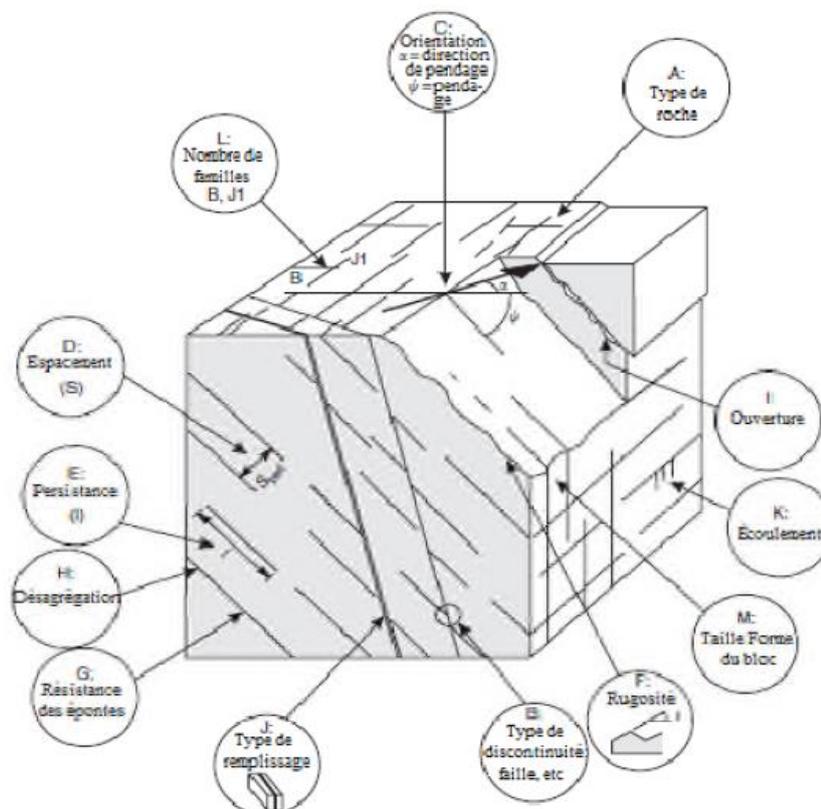


Figure II.15 -Caractéristiques des discontinuités dans un massif rocheux.

II.2.4.3. Influence des discontinuités dans le comportement d'un massif rocheux (Zhao. J, 2008):

- De Couper la roche en plaques, blocs et coins (libres de tomber et de bouger) ;
- D'agir comme plan de faiblesse pour le glissement ;
- De faciliter l'écoulement d'eau et créer des réseaux d'écoulement ;
- D'entraîner de grandes déformations ;
- De changer la distribution et l'orientation des contraintes.

II.2.4.4. Types de discontinuités :

Les principales discontinuités présentes dans les massifs rocheux (Zhao. J, 2008) 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 II.16- joint de stratification (photo prise d'un gradin de Kef Es Sennoun).

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.

c- Failles (fractures) : Se 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.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécanique des massifs rocheux

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 rejeu de la faille dans cette direction.

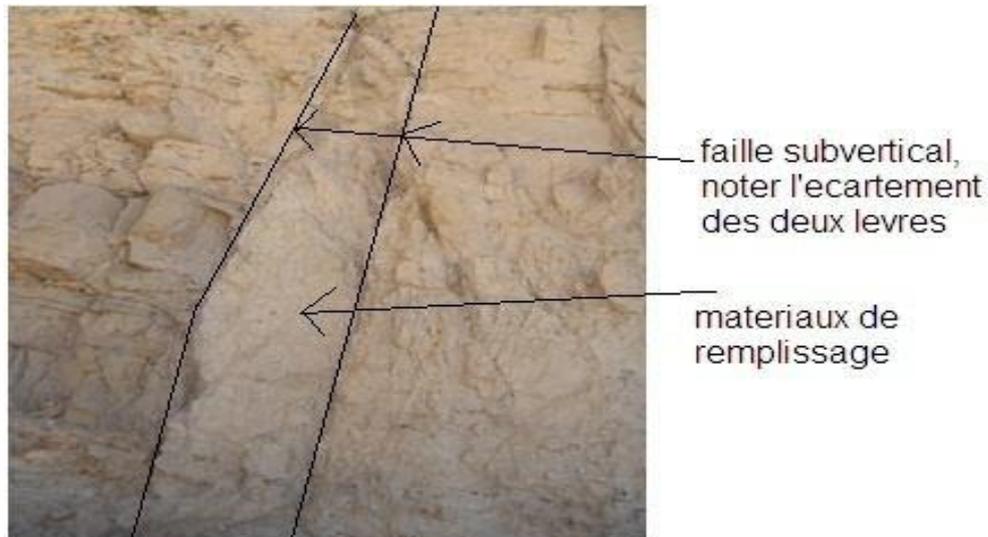


Figure II.17- Une faille verticale d'un massif (Kef Es Sennoun).

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 II.18-Réseau de diaclases sur les dalles de calcaires Yprésien-Lutitien du gradin de Kef Es Sennoun.

II.2.4.5. Caractéristiques des discontinuités :

Une famille de discontinuité est caractérisée par:

- Son orientation : définie par celle du plan à laquelle elle est assimilée ;
- Sa fréquence : inverse de l'espacement moyen entre deux discontinuités de la même famille et sa continuité.

Ces deux premières caractéristiques permettent de définir un bloc élémentaire permettant d'apprécier les dimensions des blocs susceptibles de s'ébouler.

- Sa morphologie: rugosité, altération, remplissage... ;
- Ses propriétés mécaniques.

a. L'orientation d'une discontinuité : Elle est définie par sa direction et son angle de pendage qui sont mesurés à l'aide d'une boussole géologique (Zhao, 2008).

- La direction de pendage est la droite d'intersection du plan avec un plan horizontal.

On caractérise cette direction par son azimut, c'est-à-dire l'angle qu'elle fait avec la direction du nord. Elle est toujours perpendiculaire à la direction d'un plan et elle est mesurée en degrés ($^{\circ}$).

- Le pendage est l'angle que forme la ligne de plus grande pente avec l'horizontale.

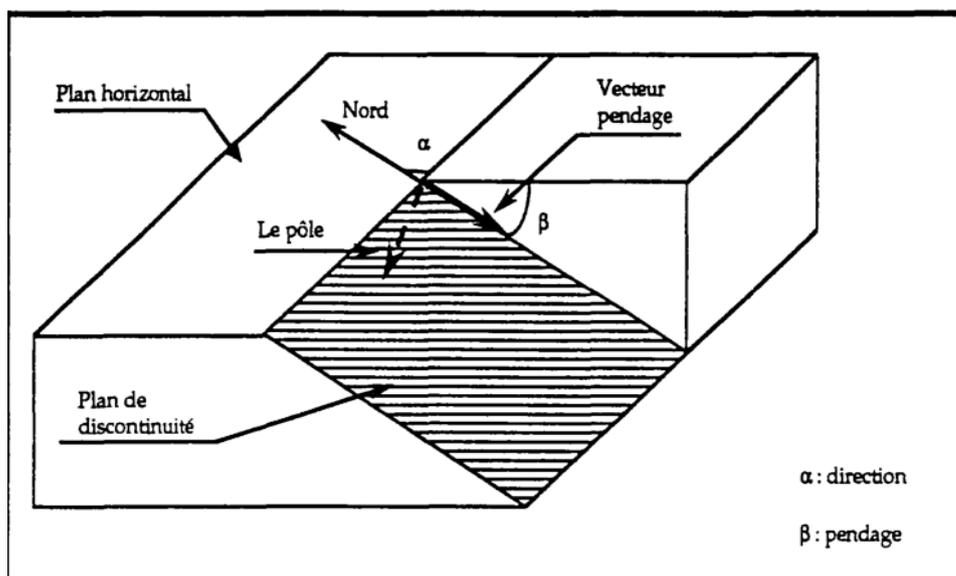


Figure II. 20-Définition de la direction et du pendage d'un plan, (Zhao. J, 2008).

b. L'espacement des joints : C'est la distance perpendiculaire entre les joints de telle façon à obtenir le véritable écart entre les plans. On mesure souvent l'espacement apparent et on mesure l'espacement des joints qui varie selon les différentes faces et directions de mesures. Cet espacement contrôle la taille des blocs individuels et le mode de rupture et l'écoulement (Zhao, 2008).

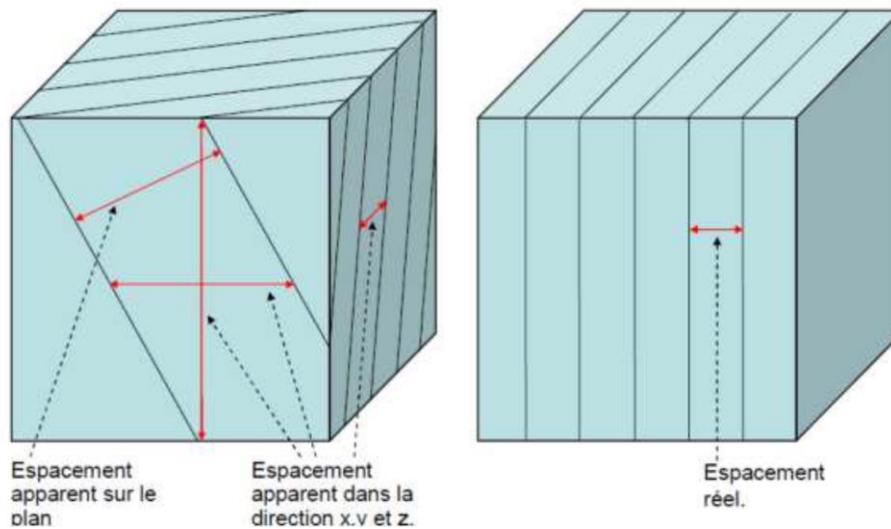


Figure II.21-Mesure de l'espace (Zhao. J, 2008).

On décrit l'espace selon les mesures des discontinuités :

Espace des discontinuités (m)	Description
<0,02	Espace extrêmement étroit
0,02-0,06	Espace très étroit
0,06-0,2	Espace étroit
0,2-0,6	Espace modéré
0,6-2	Espace large
2-6	Espace très large
>6	Espace extrêmement large

Tableau. II.5-Description de l'espace des discontinuités (Zhao. J, 2008).

c. La fréquence des discontinuités (λ) : Déterminée par comptage sur le terrain, par exemple en mesurant l'espace des discontinuités le long d'une ou de plusieurs lignes tracées perpendiculairement à leur direction ou selon des lignes traversant au mieux (statistiquement) les différentes familles de joints (Hudson, 1993).

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'espace moyen (x) vaut $x = L/N$.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

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 (Hudson, 1993).

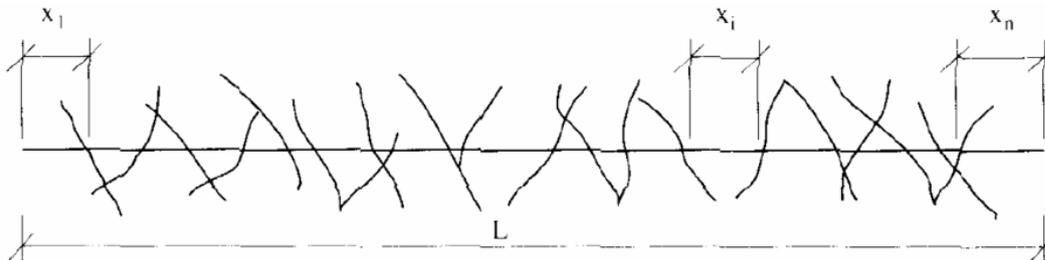


Figure II.22-Mesure de la fréquence des discontinuités (Hudson, 1993).

d. Degré de fracturation du massif rocheux : lorsque des forages carottés sont disponibles, cette qualité est désignée par RQD (Rock Quality Designation) (Deere, 1988).

Cet indice est égal au rapport de la somme des longueurs des éléments de carottes du forage dont la longueur est au moins égale à 10 cm à la longueur totale de la passe carottée.

e. 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, (Barton et Choubey, 1977) :

- **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 frêle 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.

Un coefficient de rugosité du joint (JRC) peut être adapté : il va de 0, pour une surface plane et lisse, à 20, pour une surface très rugueuse.

f. 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 (Schroeder, 2010).

- (a) : Deux ensembles de diaclases persistants avec persistance élevée ;
- (b) : Un ensemble de diaclases avec persistance élevée + un ensemble de diaclases discontinues avec persistance moyenne ;
- (c) Deux ensembles de diaclases discontinus avec persistance moyenne ;

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécanique des massifs rocheux

(d) Deux ensembles de diaclases discontinus avec faible persistance.

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

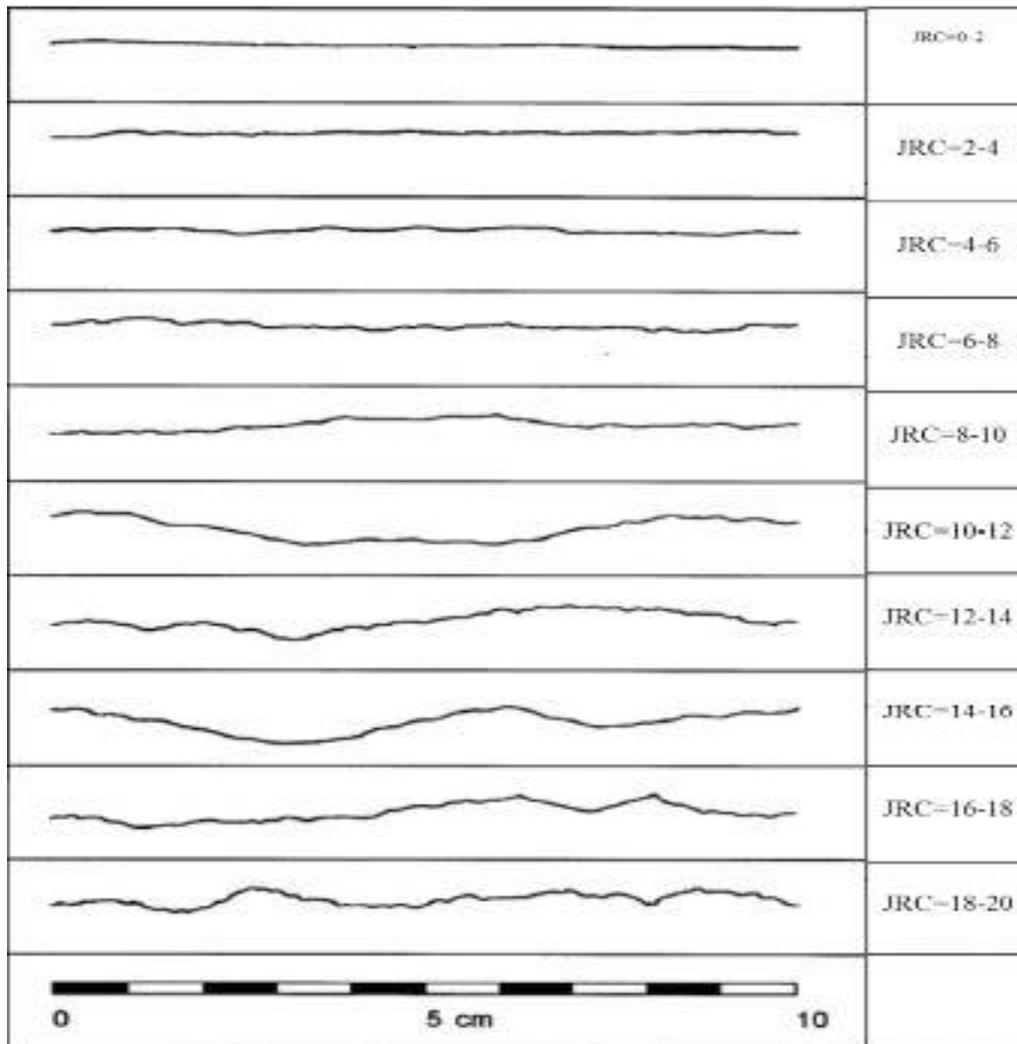


Figure II.23-Profils de référence et chiffres-clés pour la détermination du coefficient de rugosité du joint (JRC) (Barton et Choubey, 1977).

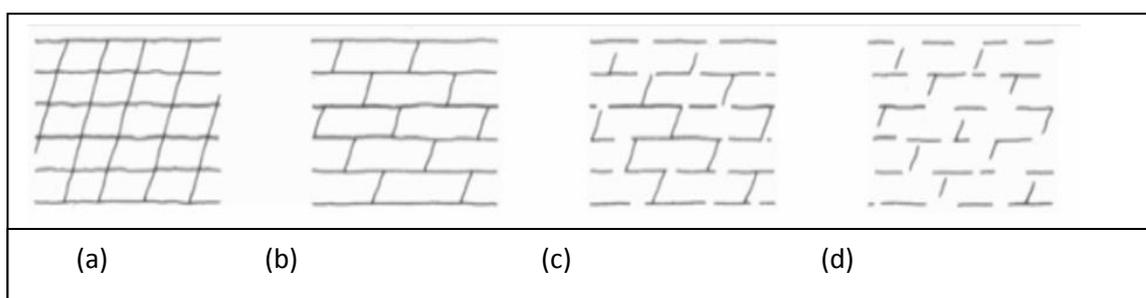


Figure II.24-Persistence de différents ensembles de fractures (Zhao. J, 2008).

Persistance	Longueur de la trace (m)
Persistance très faible	<1
Persistance faible	1-3
Persistance moyenne	3-10
Persistance élevée	10-20
Persistance très élevée	> 20

Tableau II.6-Classification des discontinuités selon leur extension (Zhao. J, 2008).

g. 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 (Schroeder, 2010).

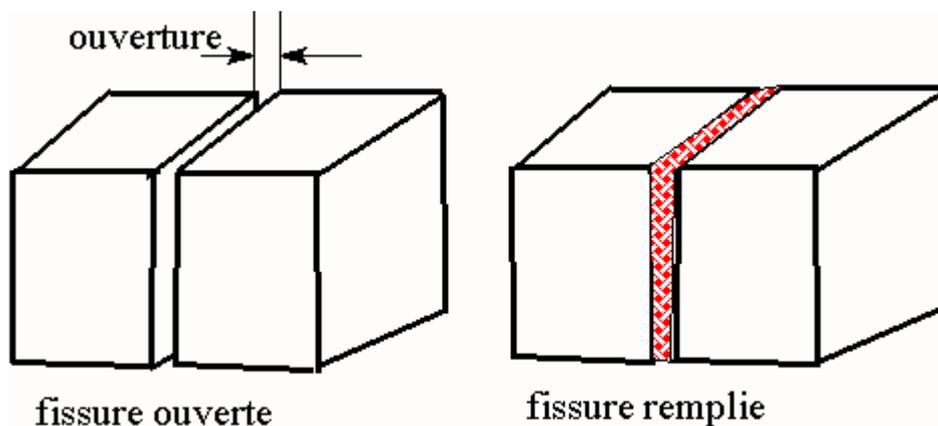


Figure II.25-Fissure ouverte et remplie (Schroeder, 2010).

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.).

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

Ouverture	Description	Dispositif
<0.1 millimètre	Très étroit	Dispositif fermé
0.1-0.25 millimètre	Étroit	
0.25-0.5 millimètre	Partiellement ouvert	
0.5-2.5 millimètre	Ouvert	Dispositif espacé
2.5-10 millimètre	Largement ouvert	
1-10 centimètre	Très largement ouvert	Dispositif ouvert
10-100 centimètre	Extrêmement ouvert	
> 1 mètre	Caverneux	

Tableau.II.7-Description des discontinuités selon la mesure des ouvertures (Zhao. J, 2008).

h. épaisseur et remplissage des joints : L'épaisseur du joint, définie d'un point de vue mécanique, joue aussi Un rôle important, surtout en compression. Elle est liée à l'ouverture du joint, mais prend en compte également le caractère altéré et déformable des épontes .

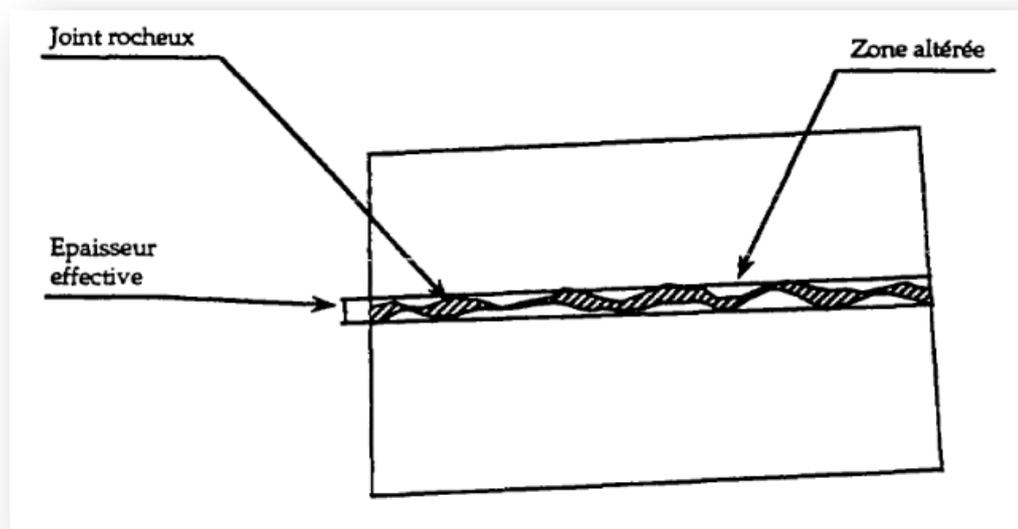


Figure. II.26- Epaisseur déformable d'un joint Matériau remplissant totalement ou partiellement la discontinuité (nature et épaisseur).

I. Extension : L'extension caractérise la dimension de la discontinuité dans l'espace. Ce paramètre est difficile à évaluer car sur le terrain on n'observe pas la totalité de la discontinuité mais uniquement sa trace sur un parement.

L'extension peut être estimée à partir de la distribution de la longueur de trace de la discontinuité.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

La distribution de la longueur de trace peut suivre une loi exponentielle ou log-normale.

j. Caractéristiques mécaniques des discontinuités : Ce sont des facteurs prépondérants pour la stabilité du massif. Le comportement mécanique des discontinuités peut être considéré comme le critère de rupture de Coulomb.

Celui-ci relie la résistance au cisaillement, τ , à la contrainte normale, σ_n par la relation : (Schroeder, 2010).

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (16)$$

Où interviennent deux paramètres : l'angle de frottement interne, noté " φ " et la cohésion, notée " c ".

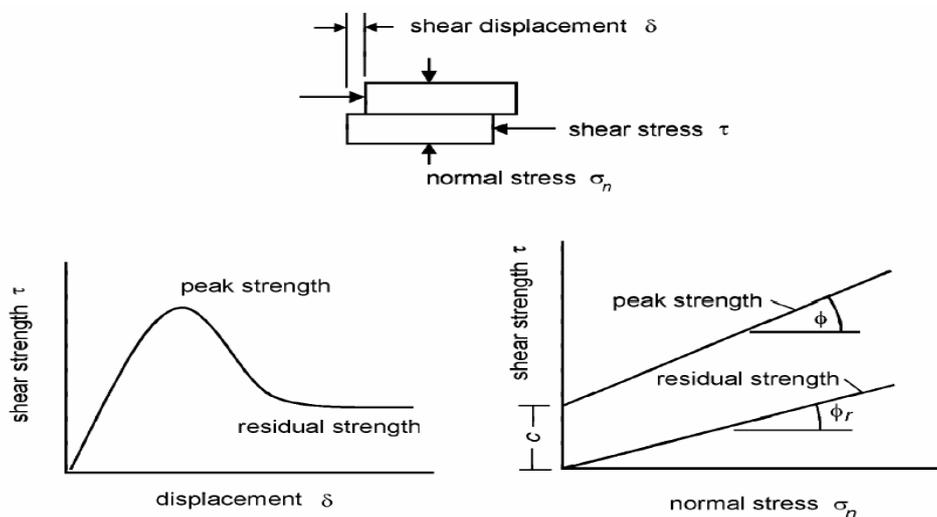


Figure II.27-Essais de cisaillement sur "joint" rocheux (Zhao. J, 2008).

Les paramètres c et φ se déterminent par un examen morphologique détaillé des discontinuités (rugosité, remplissage,...etc.) et par des essais de cisaillement ou autres.

II.2.4.6. La projection stéréographique des discontinuités :

La projection stéréographique des discontinuités permet de faire un classement des discontinuités en familles directionnelles. La représentation des plans se fait habituellement en utilisant les diagrammes polaires.

On considère une sphère dont un diamètre du plan équatorial est la direction du plan considéré et l'autre diamètre est orienté NORD - SUD.

Sur l'hémisphère inférieur, se trace le grand cercle, intersection du plan avec la surface hémisphérique, et le pôle du plan, c'est-à-dire le point de percée sur l'hémisphère de la normale au plan passant par le centre de la sphère.

CHAPITRE II : Caractéristiques géomécaniques des massifs rocheux

Pour effectuer les projections, on peut utiliser le canevas de Wolf (qui correspond à la projection stéréographique). Mais en général, on utilise le canevas de Schmidt (Lambert) qui est une projection équilatérale et qui n'introduit donc pas de distorsion quant à la densité des pôles.

La notation "classique" donnant l'azimut de la direction en degrés (chiffre <180) et le secteur (N, E, S ou O) vers lequel "pend" le plan.

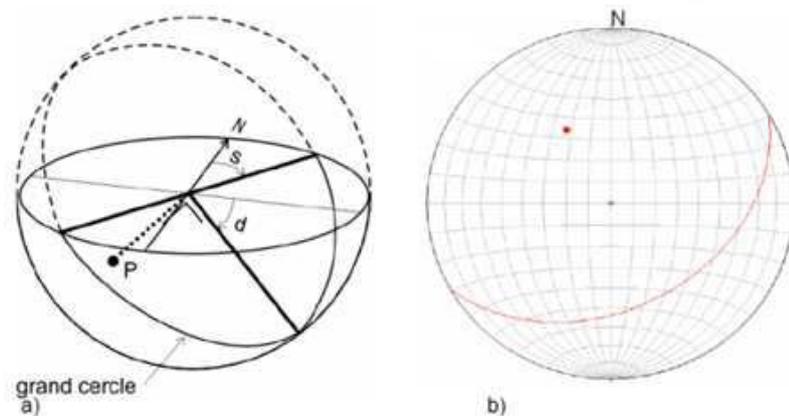


Figure II.28-Représentation stéréographique, (Zhao. J, 2008).

- a) : direction (S), pendage (d), grand cercle et pôle (P) ; b) : canevas de Schmidt. Sur le plan équatorial figurent les projections des grands cercles et des petits cercles tracés sur l'hémisphère inférieur.

II.5. Conclusion

Les massifs rocheux sont présentés comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse.

Les discontinuités représentent une caractéristique intrinsèque des massifs rocheux. Le comportement mécanique d'un massif rocheux est influencé par la géométrie et les caractéristiques mécaniques des discontinuités plutôt que par les caractéristiques propres de la matrice rocheuse. Les discontinuités sont caractérisées par une conductivité hydraulique par conséquent elles influent sur les caractéristiques mécaniques des massifs rocheux d'où la déstabilisation de ce dernier.

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

CHAPITRE III :

Classification des massifs rocheux

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le sujet des méthodes de classification géomécaniques des massifs rocheux. En premier lieu, nous présentons les types de classification existante, puis nous exposons quatre classifications géomécaniques largement utilisées dans le domaine de la Mécanique des Roches (RQD, RMR, Q système, GSI) ainsi que les SMR qui détermine la stabilité des pentes et suggère des soutènements selon leurs classes, Les avantages et les limitations de chacune de ces dernières sont ensuite détaillés.

Nous présentons ce chapitre dans l’objectif de faire apparaître les avantages que peuvent apporter les méthodes d’homogénéisation numériques par rapport aux méthodes d’identification des paramètres mécaniques que nous avons déjà mentionnées.

III.2. Systèmes de classification des massifs rocheux

Il existe 16 systèmes de classification des massifs rocheux qui ont été développés pour leur utilisation en génie civil et minier, et ce, en se basant, en grande partie, sur la fissuration et le comportement mécanique de ces massifs. Malgré que ces systèmes soient largement utilisés en ingénierie, leur habilité à considérer la résistance anisotropique et l’effet d’échelle demeure limitée (Maciejka, 2012).

Tableau. III.1-Systèmes de classification des massifs rocheux(Bieniawski, 1993;Palmström, 1995).

Système de classification	de	Référence	Pays d'origine	Applications
Rock Loads		Terzaghi, 1946	É.-U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time		Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New tunnelling (NATM)	Austrian method	Rabcewicz, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Designation	Quality	Deere, 1968	É.-U.A.	Carottes de forage, tunnels

Rock Strength Rating (RSR)	Wickham et al. 1972	É.-U.A.	Tunnels
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973,1974, 1976,1979 Bieniawski, 1989	Afrique du Sud É.U.A	Tunnels, mines, SLOPES, fondations
Extensions du système RMR	Laubscher 1977; 1984 Ghose and Raju, 1981 Kendorski et al. 1983 Serafim and Pereira, 1983 Gonzales de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman et Bieniawski, 1985	Norvège	Mines Mines de charbon Mines en roche dure Fondations Tunnels Support du toit/charbon Stabilité des pentes Mines de charbon
Rock Mass Quality	Barton et al. 1974	Canada	Tunnels, chambres
Strength-Size	Franklin, 1975		Tunnels
Basic geotechnical Description	ISRM, 1981a	Canada	Communication Générale
Geological strength index (GSI)	Hoek et al. 1995	Canada	Mines

❖ Les différents systèmes de classification

Des méthodes empiriques, basées sur une classification géotechnique du rocher, ont été mise au point et servent aux recommandations du soutènement :

- RQD (Rock Quality Designation) d’après Deer (1967);
- RMR (Rock Mass Rating) d’après Bieniawski(1976);
- Q-system (Barton, 1974);
- GSI (Geological Strength Index) d’après Hoek- Brown (1995);
- SMR (Slop Mass Rating) d’après Romana (1985).

❖ Les but des systèmes de classification des massifs rocheux

La classification géomécaniques consiste à quantifier un massif rocheux par une note qui exprime sa qualité. Chaque système de classification vise a :

- Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d’un massif fracturé
- Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand-up time).
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages.

III.2.1 Rock Quality Designation (RQD)

Proposé par Deere (1964), le RQD traduit le degré de fracturation d’un massif rocheux à partir des donnés d’un sondage mécanique. il est obtenu à partir de la carotte d’un sondagemécanique, c’est la somme des longueurs de morceaux de carottes de plus de 10 cm (4 pouces) de long divisée par la longueur totale du forage. Ce paramètre est défini comme suit :

$$RQD(\%) = \frac{\sum \text{longueurs des pièces} > 10 \text{ cm}}{\text{longueur totale de la course}} \times 100 \quad \text{(III.I)}$$

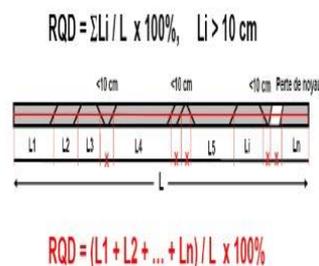


Figure. III.I carotte de sondage dans une caisse de forage (SOMIPHOS).

a. Classification de massifs rocheux par RQD

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de (Deere 1968). Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau ci-dessous.

Tableau. III.2- Qualité de la masse rocheuse selon sa valeur RQD (Deere, 1968).

RQD	Qualité des roches
<25	Très médiocre
25-50	Médiocre
50-75	Moyenne
75-90	Bonne
90-100	Excellente

III.2.2 Système RMR (Rock Mass Rating)

Le RMR a été développé par (Beniawski 1973) à Council for Scientific and Industrial Research en Afrique du Sud. Il a été légèrement modifié en 1989. Il est basé sur les données de 268 tunnels dans les roches dures. Ce système de classification est utilisé dans la conception des fondations, des tunnels et des talus rocheux. Il est calculé à partir de cinq paramètres qui sont :

- A1 : la résistance à la compression uniaxiale,
- A2 : Rock Quality designation(RQD)
- A3 : Espacement moyen des discontinuités;
- A4 : Condition des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...);
- A5 : Les conditions hydrogéologiques du massif rocheux ;
- A6 : Orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

$$\mathbf{RMR\ de\ base = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 \quad (III.2)}$$

Bieniawski a introduit un paramètre de réduction tenant compte de l'orientation de l'ouvrage par rapport à au massif rocheux. Le paramètre A6 est négatif afin de réduire la qualité du massif rocheux. La classification doit tenir compte de l'influence de conditions externes applicables à l'ingénierie :

$$\mathbf{RMR = RMR\ de\ base + A6 \quad (III.3)}$$

La méthode de notation de chaque paramètre peut être expliquée dans le tableau (III.3).

Tableau.III.3 -Classification RMR (Bieniawski, 1989).

PARAMETRES		COEFFICIENTS							
1	Résistance de la roche (MPa)	> 10	4-10	2-4	1-4	Indice Franklin Non utilisable (MPa)			
	Indice de Franklin (MPa)					5-25	1-5	<1	
	Résistance à la compression (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50				
note		15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.	90-100	75-90	50-75	25-50	< 25			
	note	20	17	13	8	3			
3	Espacement des joints	>2 m	0,6-2 m	0,2-0,6 m	0,06-0,2 m	<0,06 m			
	note	20	15	10	8	5			
4	Nature des joints	Surfaces très rugueuses non continue Eponte en contact Eponte non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte Altérées	Surfaces lustrées ou remplissage <5 mm ou joint ouvert 1 à 5 mm joints continus	Remplissage mou >5 mm ou joints ouverts >5 mm joints continus			
		Note	30	25	20	10	0		
5	Vennes d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	>125 l/min		
		Pression d'eau contrainte principale	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	> 0,5		
		Hydrogéologie	Complètement sec	Humide	Suintements (eau interstitielle)	Pression d'eau modérée	Problèmes sérieux de venues d'eau		
Note		15	10	7	4	0			
6	direction des discontinuités	0	-5	-25	-50	-60			
	note	Très favorable	favorable	Bonne	défavorable	Très défavorable			

Tableau. III.4 -Valeur du paramètre de réduction A6 selon l'orientation du tunnel par rapport à l'indication du pendage, (Bieniawski, 1989)

Pendage et direction des discontinuités		Très favorable	Favorable	Bonne	défavorable	Très défavorable
Note	Tunnel	0	-2	-5	-10	-12
	Fondation	0	-2	-7	-15	-25
	Talus	0	-5	-25	-50	-60

Bieniawski (1976) présente une classification et description pour le massif rocheux selon l'indice RMR final. Cette classification comprend 5 groupes d'intervalle de 20 points par classe dont la description rocheuse variant entre roches de très faible qualité à très bonnes roches.

Tableau.III.5-Qualité du massif rocheux selon le RMR (Bieniawski, 1976).

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

III.2.3 Systèmes du SMR (Slope Mass Rating)

Le SMR (Slope Mass Rating) (Romana 1985, Romana 1995) est davantage orienté vers la stabilité des pentes rocheuses. Le système SMR est obtenu à partir du RMR en lui ajoutant un produit de facteurs d'ajustement dépendant de la relation joints – talus et en lui additionnant un facteur dépendant de la méthode d'excavation.

$$SMR = RMR + (F1.F2.F3) + F4. \text{ (III .7)}$$

La valeur du RMR est la valeur « de base » sans l'ajustement dû à l'orientation des Discontinuités .L'ajustement pour les joints est composé des trois facteurs F1, F2 et F3.

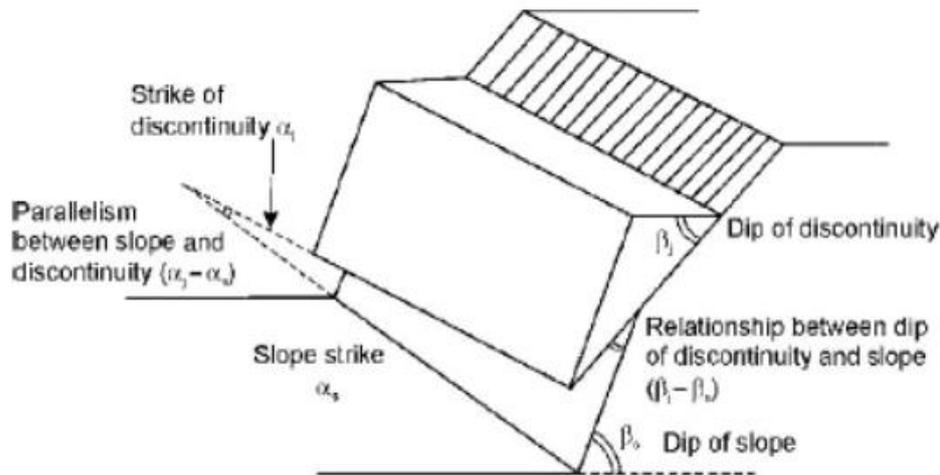
- ✓ F1 : Dépend du parallélisme entre les directions des joints et des talus. Ce facteur peut varier de 1 (quand les deux sont presque parallèles) à 0,15 (quand l'angle entre les deux est plus grand que 30° et que la probabilité de rupture est très faible). Il a été établi empiriquement :

$$F1 = (1 - \sin A)^2 \quad (III .8)$$

Où : A est l'angle entre les directions des joints et du talus.

- ✓ F2 : Dépend du pendage des joints pour le mode de rupture plan. Les valeurs varient de 1 (pour les joints de plus de 45° de pendage) à 0,15 (pour les joints de moins de 20° de pendage). Dans le cas du renversement ou de basculement, le facteur reste égal à 1. Il a également été établi empiriquement :

$$F2 = \text{tg}2B. \quad (III .9)$$



Planar failure.

Figure III .2 orientation d'une pente de type plane.

Où B : est le pendage des joints.

- ✓ F3 : est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Pour ce paramètre, il y a également lieu de faire la différence entre une rupture plane et une rupture par renversement ou de basculement. Les valeurs d'ajustement de Bieniawski ont été conservées.

Le facteur d'ajustement F4 prend en compte la méthode d'excavation. Il est fixé empiriquement sur les bases suivantes :

- ✓ Les talus sont plus stables à cause de l'érosion à long terme et des protections naturelles telles la végétation.
- ✓ La roche prédécoupée augmente également la stabilité.
- ✓ L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple).
- ✓ L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturées n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus. Une valeur de SMR est calculée pour chaque système de discontinuités et finalement la plus petite est retenue pour quantifier la globalité du talus.

A partir du SMR, il est alors possible d'estimer la stabilité du talus et de préconiser les méthodes de confortement (ancrage, boulons, béton projeté, ...).

Les valeurs des paramètres sont présentées dans le tableau III .6:

Tableau .III.6-Notes des paramètres du SMR (Romana, 1985).

SMR= RMR de base + (F1*F2*F3) + F4						
Facteurs d'ajustement liés aux joints (F1, F2, F3).	α_j =Direction du pendage des joints β_j =Pendage du joint α_s =Direction du pendage du talus β_s =Pendage du talus					
	Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très défavorable	
Rupture plane $ \alpha_j - \alpha_s =$	>30°	30°-20°	20°-10°	10°-5°	<5°	
Basculement $ \alpha_j - \alpha_s - 180° =$						
Valeur de F1	0.15	0.4	0.7	0.85	1	
Relation	$F_1 = (1 - \sin \alpha_j - \alpha_s)^2$					
$ \beta_j =$	<20°	20°-30°	30°-35°	35°-45°	>45°	
La valeur de F2	Rupture plane	0.15	0.4	0.7	0.85	1
	Basculement	1				
Relation	$F_2 = \text{tg}^2 \beta_j$					
Rupture plane $\beta_j - \beta_s =$	>10°	10-0°	0°	0°-(-10°)	<(-10°)	
Basculement $\beta_j + \beta_s =$	<110°	110°-120°	>120°	-	-	
Valeur de F3	0	-6	-25	-50	-60	
Relation	F3 = Ajustement de BIENIAWSKI pour l'orientation des joints, 1976					
F4 : Facteur d'ajustement pour la méthode d'ajustement	F4=Valeur empirique de la méthode d'excavation.					
	Talus naturels	Prespliting	Smooth blasting	Explosif ou mécanique	Deficient blasting	
Valeur de F4	15	10	8	0	-8	

La valeur de SMR est calculée pour chaque système de discontinuités. Finalement la plus petite valeur est retenue pour quantifier la globalité du talus.

Tableau .III.7-Description des classes SMR (Romana, 1985).

Description des classes SMR										
Classe	Va	Vb	Iva	IVb	IIIa	IIIb	Ila	Ilb	Ia	Ib
Description	Très mauvais		Mauvais		Moyen		Bien		Très bien	
Stabilité	Complètement Instable		Instable		Partiellement stable		Stable		Complètement stable	
Rupture	Grand plan		Plan ou grand Dièdre		Quelques joints ou beaucoup de dièdres		Quelques blocs		Aucune	
Support	Réexcavation		Importante corrective		Systématique		Occasionnel		Aucun	

III.3. Commentaires sur les systèmes de classification

Les classifications quantitatives des massifs rocheux fracturés sont utilisées depuis plusieurs dizaines d’années pour la conception et la construction des ouvrages réalisés dans les massifs rocheux. Elles sont basées sur la connaissance des paramètres décrivant la qualité du massif rocheux et font la combinaison des différents paramètres mesurés sur le site pour arriver à mettre une note concernant la qualité du massif rocheux.

Ces méthodes sont facilement utilisées au stade de l’avant-projet. Cependant elles présentent certaines limites que nous résumons ci-dessous :

- Les paramètres de classification sont utilisés universellement sur tous les types de massifs rocheux, sans tenir compte de leurs caractéristiques spécifiques et du projet considéré (Chalhoub, 2006).
- Les propriétés complexes du massif rocheux, en particulier son anisotropie et son comportement différé (dépendant du temps) ne sont pas pris en compte.

- En général, ces méthodes empiriques simplifiées ne prennent pas en compte le mécanisme de rupture, de déformation et de l'interaction du support avec la roche.
- Le RMR n'est pas adapté au cas de roche tendre.
- Les paramètres de déformabilité et de résistance qui en résultent sont relatifs à un milieu isotrope (Chalhoub, 2006).

III.4. Calcul du RMR de base pour la roche masse de Quartier de Kef Es Sennoun:

III.4.1. La résistance à la compression uniaxiale (R_{cs})

La résistance à la compression uniaxiale: (Uniaxiale compressive strength) la résistance à la compression simple (R_{cs}) de la matrice rocheuse est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'un échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel. Selon la valeur de la R_{cs} de la roche la note RMR varie de 0 à 15.

Le calcul de la compression uniaxiale des roches de la mine a été élaboré au laboratoire par la mesure de la résistance à l'attraction indirecte (point load strength index). Nous avons ensuite appliqué la formule établie par (Bieniawski 1975).

$R_{cs} = 24 * I_s$

I_s : est l'indice Franklin (point load strength index).

Le tableau suivant résume les valeurs de la résistance à la compression des différents faciès de Quartier de Kef Es Sennoun :

Tableau.III.8-les valeurs de la résistance à la compression des différentes lithologies.

Faciès	Résistance à la compression uniaxiale (MPa)
Calcaire Yprésien-Lutétien	57
Phospho-calcaire	32
Phosphate	23
Marne	7
Calcaire Dano-Montien	38

III .4.2. Rock Quality désignation (RQD)

Il donne une estimation de la qualité de la masse rocheuse a partir des donnés de sondage. La figure (Voir fig.III.3) montre quelques carottes telles que récupérées du sondage et sur lesquelles on a calculé les RQD des tableaux (Tableau.III.9) et (Tableau.III.10):

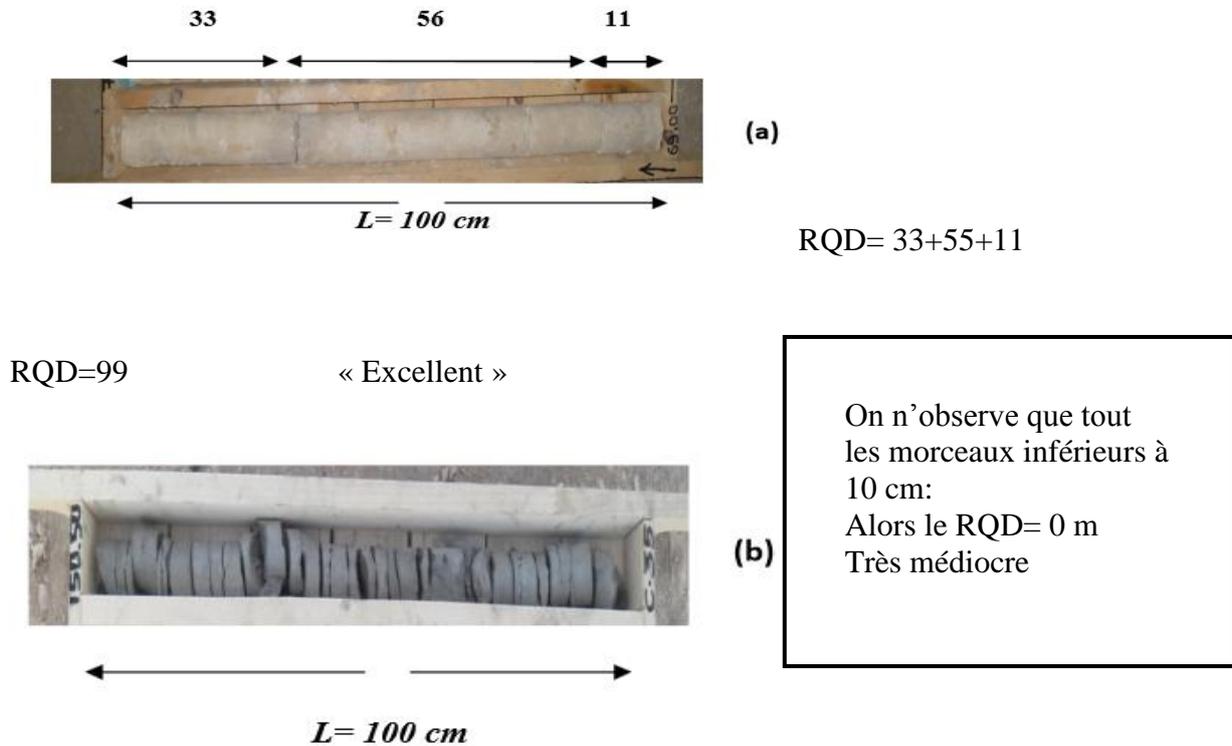


Figure III.3-carotte de sondage 38 dans la partie Est de Kef Es Sennoun.

RQD des différents sondages:

Les valeurs du RQD pour les sondages N° 10 et 19 ont été calculées par CERAD

Caractéristiques des sondages:

Kef Essnoun N°10 (pendage 90°) et profondeur 134 m.

Kef Essnoun N°19 (pendage 90°) et profondeur 112 m.

Tableau III.09-Valeur du RQD pour Les sondages N° 10 et 19.

Sondage	Couches	RQD (%)	Qualité de la roche
N° 10	Calcaire Yprésien -Lutétien	72	Moyenne
	Calcaire phosphaté	63	Moyenne
	Phosphate	76	Bonne
	Marnes	48	Médiocre
	Calcaire Danien -Montien	85	Bonne
N° 19	Calcaire Yprésien -Lutétien	70	Moyenne
	Calcaire phosphaté	61	Moyenne
	Phosphate	78	Bonne
	Marnes	45	Médiocre
	Calcaire Danien -Montien	83	Bonne

Les valeurs du RQD pour les sondages N° 06 et 38 il a été calculé par nous même.

Caractéristiques des sondages:

Kef Essnoun N°06 (pendage 90°) et profondeur 155.6 m.

Kef Essnoun N°38 (pendage 90°) et profondeur 185 m.

Tableau III.10-Valeur du RQD pour les sondages N° 06 et 38.

Sondage	Couches	RQD (%)	Qualité de la roche
N° 06	Calcaire Yprésien -Lutétien	75	Moyenne
	Calcaire phosphaté	60	Moyenne
	Phosphate	79	Bonne
	Marnes	50	Médiocre
	Calcaire Danien -Montien	83	Bonne
N° 38	Calcaire Yprésien -Lutétien	77	Bonne
	Calcaire phosphaté	62	Moyenne
	Phosphate	72	Moyenne
	Marnes	34	Médiocre
	Calcaire Danien -Montien	73	Moyenne

III.4.3. L'espace des joints : (Spacing of joints)

L'espace des joints est un paramètre qui influence la résistance mécanique et par conséquent la stabilité de la masse rocheuse. L'espace des joints est souvent comptabilisé sur la famille des joints dominants (qui en le plus d'effet sur la stabilité dans notre cas).

Il existe trois familles principales des joints:

- 1) la première famille de joints est de direction N 30-35° W et de pendage subvertical.

L'espace des joints dans cette famille, selon la technique de scanline est de 1.37 m. Il s'agit d'un espace large.

- 2) La deuxième famille de joints est de direction N 50-55° E et de pendage subvertical.

L'espace des joints dans cette famille, selon la technique de scanline est de 1.25 m. Il s'agit donc d'un espace large. On a pu remarquer dans cette famille une faille normale subverticale de direction nord 50° largement ouverte de 170 cm et remplie de farine rocheuse. Cette dernière témoigne d'une ancienne activité de glissement dans la région de Kef Essnoun.

- 3) La troisième famille correspond aux joints stratigraphiques, elle est sensiblement orientée Est-Ouest et de pendage 25° vers le sud. L'espace des joints dans cette famille, selon la technique de scanline est de 53 cm. Ce paramètre varie de couche à l'autre, pour le calcaire il atteint des valeurs de 80 cm et peut être d'environ 30 cm pour les marnes. Il s'agit d'un espace modéré. Le pendage de cette famille de joints qui sont en majorité stratigraphiques augmente progressivement en allant vers le nord et deviennent presque verticaux près de la charnière anticlinale de Djebel Onk.

La note RMR qui relative à ce paramètre est de 10.

III.4.4. Nature des joints : (Condition of discontinuities)

La nature des joints concerne en premier lieu la rugosité, la résistance, l'altération et la nature des matériaux de remplissage. Ces paramètres influencent considérablement la résistance au cisaillement qui est une propriété fondamentale dans le processus de déclenchement des glissements dans la masse rocheuse.

A l'exception de la faille normale subverticale dont l'ouverture est d'environ 170 cm, les joints sont ouverts entre 2 à 5 cm, quelques un sont fermés. Les épontes ne

montrent pas de signes d'altération significative. Sauf dans les marnes, les épontes montrent les signes d'altération (éponte altéré).

Le coefficient de rugosité tel que déterminé par comparaison avec le profil de référence (JRC charte) est de 6 –8.

Il en découle que la note RMR relatif a ce paramètre est de 25 pour tous les faciès sauf pour les marnes schistifiées il est de 20.

III.4.5. Venue d'eau: (Ground water conditions)

La note RMR est inversement proportionnelle à la venue d'eau. L'eau est surtout quand elle est sous pression affect négativement la stabilité des pentes rocheuses. Dans notre cas aucune venue d'eau petite qu'elle soit n'a pu être observée le long du talus. Donc on est dans des conditions où la masse rocheuse de point de vue venue d'eau, complètement sèche. **La note RMR relative à ce paramètre est de 15.**

Le calcul de la valeur de RMR pour chaque faciès de la manière suivante:

Tableau.III.11-Classification RMR du faciès calcaire Yprésien-Lutétien.

Faciès	Calcaire Yprésien-Lutétien					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	58	77	0.2-0,6 m	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non altérées	Complètement Sec	74
Valeur extrêmes de la classification	50-100					
Note	7	17	10	25	15	

Tableau.III.12-Classification RMR du calcaire phosphaté.

Faciès	Calcaire phosphaté					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Espacement des joints (m)	Nature des joints	Hydrogéologie	RMR De base
Mesure	32	62	0,2-0,6m	Surfaces	Complètement	67

Valeurs extrêmes de la classification	25-50	50-75		Légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Epointon Altérées	Sec	
Note	4	13	10	25	15	

Tableau.III.13-Classification RMR du phosphate.

Faciès	Phosphate					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD(%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Valeurs extrêmes de la classification	23	72		Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Epointon non altérées	Complètement Sec	65
	5-25	50-75				
Note	2	13	10	25	15	

Tableau.III.14-Classification RMR du faciès Marne schistifiées (profondeur 149 –179m).

Faciès	Marneschistifiées					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	07	24	0,2-0,6	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Epointon	Complètement Sec	50
Valeurs extrêmes de la classification	5-25	25-50				
Note	2	3	10	20	15	

Tableau.III.15-Classification RMR du faciès Danien-montien.

Faciès	calcaire Danien-Montien					
Paramètre	Rc(MPa)	RQD (%)	Nature des joints	Espacement des joints (m)	Hydrogéologie	RMR de base
Mesure	32	73	0,2-0,6	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur <1 mm Eponte non altérées	Complètement sec	67
Valeurs extrêmes de la classification	25-50	50-75				
Note	4	3	10	25	15	

A partir de les valeurs du RMR de base, Nous pouvons dire que les formations des calcaires Yprésien-Lutétien, des calcaires phosphatés, des phosphates et des calcaires Danien-Montien ont une Bonne qualité. Mais les marnes est de qualité moyenne. Selon le **tableau III.5**.

Tableau.III.16-Classification RMR du massif rocheux de Kef Essnoun.

Faciès	RMR de base	Classe du massif rocheux	Description du massif rocheux
calcaire Yprésien-Lutétien	74	II	Bon rocher
Calcaire phosphaté	67	II	Bon rocher
Phosphate	65	III	Bon rocher
Marne schistifiées	50	III	Rocher moyen
Calcaire Danien-Montien	67	II	Bon rocher

III.5. Calcul du SMR pour la roche masse de Quartier de Kef Es Sennoun:

Tableau. III.17-Valeurs calculées selon la méthode de (Romana et al.).

Les paramètres	Facteurs
L'angle A = 0	F1 = 1
L'angle βj = 25	F2 = 0.40
Angle entre talus et pendage joints ψ inf 10	F2 = 0.40
Effet de l'abattage	F4 = 8

Tableau. III .18-SMR du faciès de calcaires Yprésien-Lutétien.

Facies	Calcaire Yprésien-Lutétien					
Paramètre	RMR de base	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	74	1	0.40	-60	8	50

Tableau.III.19-SMR du faciès de calcaires phosphate.

Facies	calcaires phosphate					
Paramètre	RMR de base	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	67	1	0.40	-60	8	43

Tableau. III .20-SMR du faciès de phosphate.

Facies	Phosphate					
Paramètre	RMR de base	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	65	1	0.40	-60	8	41

Tableau. III.21-SMR du faciès de marne schistifiées.

Facies	marne schistifiées					
Paramètre	RMR de base	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	50	1	0.40	-60	8	12

Tableau. III .22-SMR du faciès de calcaire Danien-Montien.

Facies	Danien-Montien					
Paramètre	RMR de base	F1	F2	F3	F4	SMR
Note	67	1	0.40	-60	8	43

Tableau. III .23-Classification SMR des différents faciès.

Facies	calcaires Yprésien-Lutétien	calcaires phosphate	phosphate	marne schistifiées	calcaire Danien-Montien
SMR	50	43	41	12	43
Classe	II	II	II	V	II
Description	Bien	Bien	Bien	Très Mauvais	Bien
	Description : Roche très mauvaise Stabilité : complètement instable. Rupture : rupture possible au niveau de la couche des marnes.				

III.6. Conclusion

Les systèmes de classification des massifs rocheux sont des méthodes empiriques (RQD, RMR, SMR) qui déterminent les propriétés physiques et mécaniques des massifs en fonction de plusieurs facteurs affectant sa stabilité. Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de Familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage,... etc.).

CHAPITRE IV

Stabilité des talus rocheux

IV.1. Introduction

Les trois principaux éléments d'une conception de pente à ciel ouvert sont l'angle global de la fosse, de la crête aux pieds, De l'angle inter-rampe et de l'angle de face des gradins individuels qui dépend de l'espacement vertical entre les gradins, et de la largeur des bancs requise pour contenir les chutes de pierres.

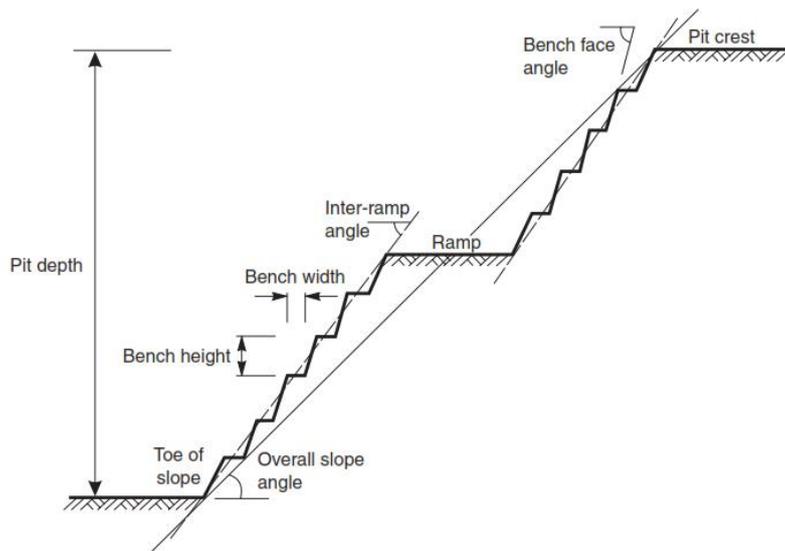


Figure IV.1- Geometry type de talus d'une mine à ciel ouvert .

La stabilité des talus d'une mine à ciel ouvert depend essentiellement des parametres qui sont les conditions et l'orientation des discontinuités, la géometrie du talus et les conditions hydrogéologiques. Certaines combinaisons de ces parametres rendent tres fort le risque de rupture. Si cette combinaison est identifiée durant la phase de reconnaissance et de conception de la mine, les mesures necessaires pour palier aux problemes de stabilité seront prises avant l'exploitation. Si cette combinaison n'est pas détectée avant, les ingénieurs doivent agir au moment ou le probleme est identifié. Hoek and Brown (1978) ont établi un organigramme montrant les différentes étapes a suivre pour l'étude de la stabilité des talus dans les mines à ciel ouvert.

Dans une mine à ciel ouvert, l'économie est du coté d'un talus le plus raide possible, mais la stabilité est au contraire du coté d'un talus a pente douce. Cette contradiction entre l'économie et la stabilité doit etre regie par une étude rigoureuse de stabilité.

La première approche à l'étude de stabilité est de considérer le comportement de masse rocheuse est celui d'un milieu elastique.

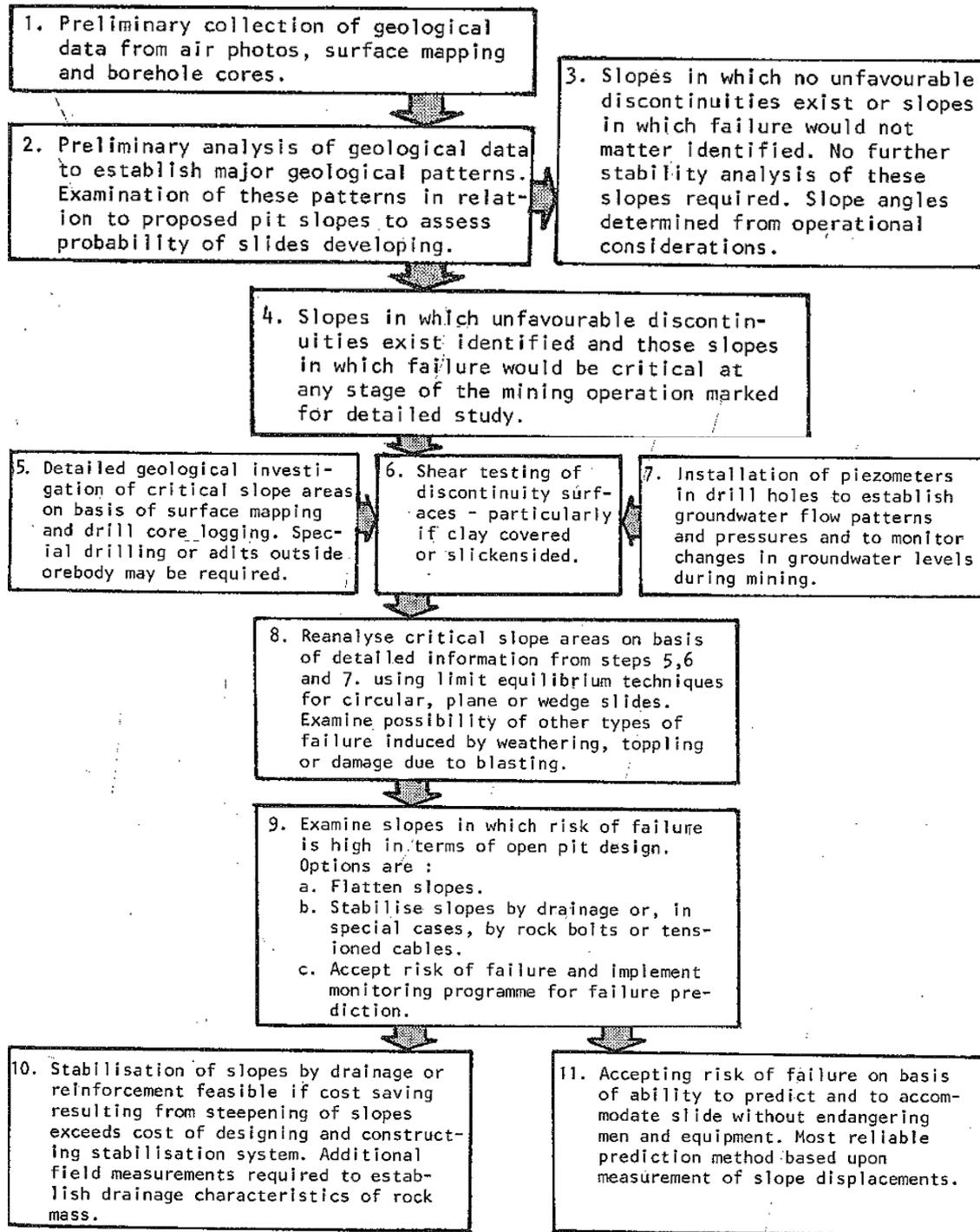


Figure IV.2-Analysis of the stability of slopes in open pit mines (Hoek and Brown 1978).

Si cette approche a donné des résultats acceptables dans la conception des excavations souterraines, il n'est pas du tout le cas dans la conception des talus rocheux. Car la présence de discontinuités réduit considérablement la résistance de la roche notamment le long de ces plans de non cohésion. Terzaghi (1962) a écrit « les conditions naturelles peuvent empêcher la possibilité d'obtenir toutes les données requises pour prévoir la performance des matériaux de

fondation par les méthodes analytiques ou autres méthodes. Si le calcul de stabilité est fait dans ces conditions, il est nécessairement basé sur des hypothèses faiblement liés à la réalité. Ces calculs font plus de mal que du bon car ils dévient l'attention du concepteur de l'énervant mais important écart en son savoir ».

IV.2.Rôle des discontinuités dans les glissements rocheux

Dans les massifs montagneux, il arrive que des talus très redressés avec des hauteurs considérables ne montre aucun signe d'instabilité, au contraire d'autres talus à pentes douces et des hauteurs réduites sont instables. Cette différence est due au fait que la stabilité des talus varie avec l'inclinaison des surfaces de discontinuités (failles, joints, plans de stratifications) dans la masse rocheuse. Quand ces discontinuités sont verticales ou horizontales le glissement ne survient pas mais entre ces deux valeurs quand la discontinuité coupe le talus le glissement devient très probable à condition que l'angle de frottement soit inférieur à l'angle de la discontinuité. Il existe 04 grands types de glissements dans la masse rocheuse.

IV.2.Les glissements planaires

Ce type de glissement n'est pas fréquent dans la nature, car il est rare que toutes les conditions géométriques des discontinuités soient présentes sur un talus. La figure 4.1 montre un glissement plan typique dans un talus rocheux où un bloc de roche a glissé sur un seul plan plongeant hors de la face.



Figure IV.3-Photo montrant un glissement planaire

Pour que ce type de glissement survienne, les conditions géométriques suivantes doivent être satisfaites (figure IV.2)

1- Le plan sur lequel le glissement se produit doit être orienté parallèlement ou presque parallèlement (à environ $\pm 20^\circ$) au plan du talus.

- 2- Le plan de discontinuité doit couper le plan du talus, ce qui signifie que le pendage de la discontinuité doit être inférieur au pendage du talus, c'est-à-dire $\psi_p < \psi_f$.
- 3- Le pendage du plan de la discontinuité doit être supérieur à l'angle de frottement interne, c'est-à-dire $\psi_p > \phi$.
- 4- L'extrémité supérieure de la surface de glissement coupe la pente supérieure ou se termine par une fissure de traction.
- 5- Les surfaces de dégagement qui offrent une résistance négligeable au glissement doivent être présentes dans la masse rocheuse pour définir les limites latérales du glissement.

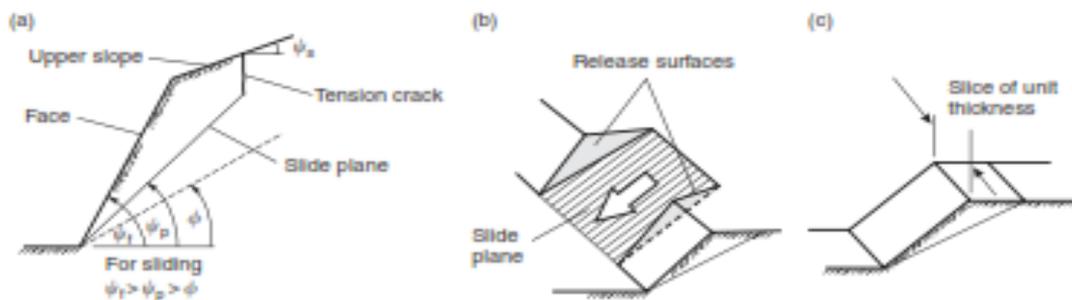


Figure IV.4- Geometry of slope exhibiting plane failure :(a) cross-section showing planes forming a plane failure ;(b) release surfaces at ends of plane failure ;(c) unit thickness slide used in stability analysis .

Quand les conditions précédentes sont réunies le glissement devient éminent. Le facteur de sécurité

Le facteur de sécurité pour la rupture plane est calculé en résolvant toutes les composantes de la force parallèles et normales au plan de glissement. La somme vectorielle des forces de cisaillement, τ est appelée force destabilisatrice. Le produit des forces normales totales, N et de la tangente de l'angle de frottement ϕ , plus la force de cohésion, est appelé force résistante. Le facteur de sécurité FS du bloc en considération est le rapport des forces de résistance aux forces destabilisatrices.

$$FS = \frac{\text{forces destabilisatrices}}{\text{forces résistantes}} \quad FS = \frac{cA + \sum N \tan\phi}{\sum \tau}$$

C est la cohésion, A la surface du plan de rupture, N la force normale au plan de rupture, ϕ l'angle de frottement interne.

On considère bon (satisfaisant) un coefficient de sécurité supérieur à 1.3.

Pour les cas complexes, on rajoute les forces qui contribuent à la stabilité aux forces résistantes (tirants, câbles de tension, soutènements) et celles qui jouent en faveur du glissement aux forces destabilisatrices (pression de l'eau, poids supplémentaire en tête du talus).

IV.2.2 La rupture en diedre (wedge failure)

Les ruptures de coins peuvent se produire dans une gamme de conditions géologiques et géométriques beaucoup plus large que les ruptures planes. La rupture de coin survient quand deux discontinuités planes s'intersectent et ou la ligne d'intersection coupe la surface du talus (Figure IV.4).

La figure (IV.4) montre un coin formé par l'intersection de deux discontinuités planes continues et la ligne d'intersection coupe le talus au pied de la paroi rocheuse. Autrement dit, le plongement de la ligne d'intersection et la direction de pendage de la face sont approximativement égales. On précise que le glissement ne survient que lorsque l'angle de plongement de la ligne d'intersection est supérieur à l'angle de frottement interne.



Figure IV.5- Rupture de coin typique impliquant un glissement sur deux joints persistants avec une ligne d'intersection coupant le talus au pied de la paroi rocheuse et un plan supérieur qui forme une surface de relachement.

Sur la base de cette géométrie, les conditions générales de rupture de coin sont les suivantes:

- 1- Deux plans se coupent toujours en ligne (Figure IV.4-a), la représentation sur le canevas de Wulf montre que la ligne d'intersection est représentée par le point ou les deux grands cercles des plans considérés se croisent. L'orientation de la ligne est donné par la direction α_i et le plongement ψ_i
- 2- L'angle de plongement de la ligne d'intersection doit être inférieur à l'angle du talus et plus grand que l'angle de frottement moyen des deux plans ; $\psi_{fi} > \psi_i > \phi_i$ (Figure IV.4)

3- La ligne d'intersection doit plonger dans une direction qui coupe le plan du talus pour que le glissement puisse survenir. La direction de la ligne d'intersection doit être dans l'intervalle α_i et α'_i (Figure IV.4-b).

En générale, le glissement peut s'amorcer si le point d'intersection entre les deux grands cercles sur le canevas (projection stéréographique) se situe dans la zone coloré (Figure IV.4-b). La projection stéréographique montre si la rupture de coin est possible. Cependant le facteur de sécurité de la rupture du coin ne peut pas être déterminé à partir de la représentation sur le canevas car sur cette représentation on ne peut pas voir la résistance au cisaillement, la pression de l'eau ... etc.

1) Analyse de la rupture du coin

Le coefficient de sécurité pour la répture de coin défini sur la figure 4.3, en supposant que le glissement n'a de resistance que les frottements dus à l'angle de frottement ϕ pour les deux plans, Il est donné par :

$$FS = \frac{(R_A + R_B) \tan \phi}{W \sin \psi_i}$$

Ou R_A et R_B sont les reactions normales aux plans A et B (Figure IV.4-5)

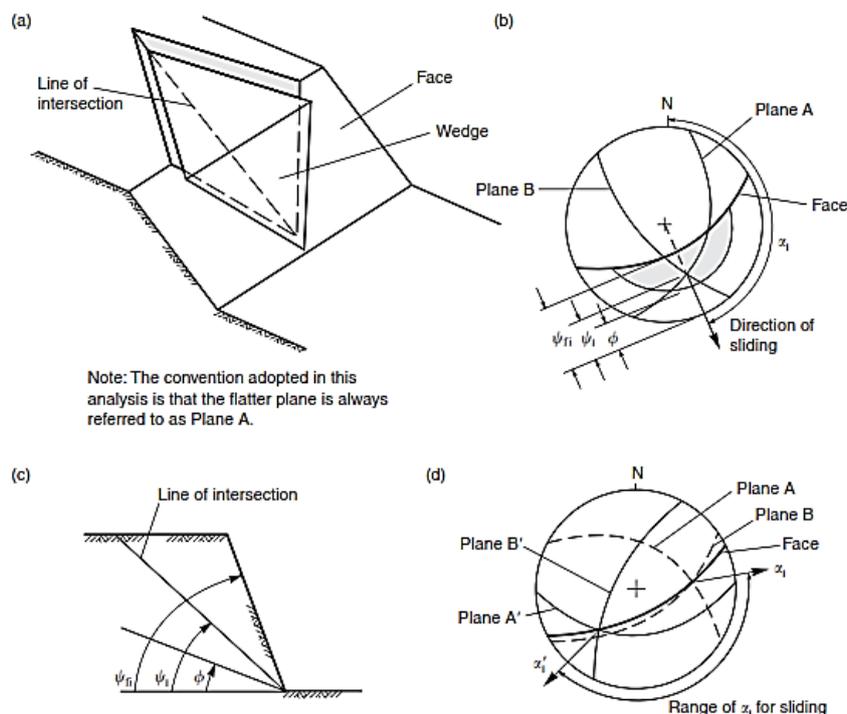


Figure IV.6-Geometric conditions for wedge failure : (a) pictorial view of wedge failure ; (b) stereoplote showing the orientation of the line of intersection, and the range of the plunge of the line of intersection ψ_i where failure is feasible ; (c) view of slope at right angles to the line of intersection ; (d) stereoplote showing the range in the trend of the line of intersection α_i where wedge failure is feasible.

$$R_A \sin\left(\beta - \frac{\xi}{2}\right) = R_A \sin\left(\beta + \frac{\xi}{2}\right) R_A \cos\left(\beta - \frac{\xi}{2}\right) = R_B \cos\left(\beta + \frac{\xi}{2}\right) = W \cos \psi_i$$

ξ et β sont définis sur la Figure IV.7

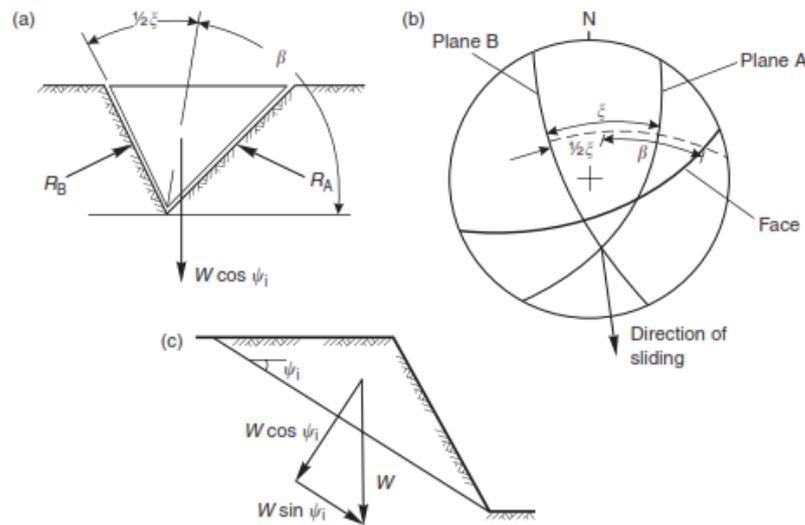


Figure IV.7-Resolution of forces to calculate factor of safety of wedge : (a) view of wedge looking at face showing definition of angles β and ϵ , and reactions on sliding planes R_A and R_B ; (b) stereonet showing measurement of angles β and ϵ , cross-section of wedge showing resolution of wedge weight w .

IV.2.3 Rupture circulaire

Il est bien connu que les glissements circulaires concernent les matériaux faibles tels que les roches fortement altérées ou fortement fracturées et les déblais des roches. Dans de tels matériaux, la rupture se produit le long d'une surface qui se rapproche d'une forme (fig. 4.6). On traite ici la stabilité des pentes en deux dimensions, et suppose que la pente peut être modélisée comme une tranche unitaire à travers une pente infiniment longue, dans des conditions de déformation plane.



Figure IV.8- Rupture circulaire dans une roche granitique fortement altérée (Duncun 2008, autoroute en Californie).

1) Conditions du glissement circulaire et méthodes d'analyse

La rupture des pentes rocheuses est contrôlée par les caractéristiques géologiques telles que les plans de stratifications et les joints qui rendent la roche discontinue. Dans ces conditions, normalement, une ou plusieurs discontinuités définissent la surface de glissement. Cependant, dans le cas d'une roche fortement fracturée ou fortement altérée, un motif structural fortement défini n'existe plus, et la surface de glissement est libre de trouver la ligne de moindre résistance à travers la pente. L'observations des ruptures de pente dans ces matériaux suggèrent que cette surface de glissement prend généralement la forme d'un cercle, et la plupart des théories de stabilité sont basées sur cette observation. La figure 4.6 montre une rupture circulaire typique dans une pente rocheuse très altérée au-dessus d'une autoroute.

Les conditions dans lesquelles la rupture circulaire survient se produisent lorsque les particules individuelles dans un sol ou une masse rocheuse sont très petites par rapport aux dimensions du talus. Par conséquent, un remblai en enrochement aura tendance à se comporter comme un «sol» et à rompre en mode circulaire lorsque les dimensions de la pente sont sensiblement supérieures aux dimensions des fragments de rocheux. De même, un sol constitué de sable, le limon et les particules plus petites présenteront des glissements sur les surfaces, même dans les pentes de quelques mètres seulement de hauteur. Les glissements dans les roches très altérées et altérées, et les roches intensesment fracturées auront également tendance à survenir de cette manière.

2) Forme de la surface de glissement

La forme réelle de la surface de glissement «circulaire» est influencée par les conditions géologiques de la roche masse. Par exemple, dans une masse rocheuse homogène, faible ou altérée, ou un enrochement, la rupture est susceptible de se former sous la forme d'une surface peu profonde et à large rayon de courbure s'étendant d'une fissure de traction près de la crête jusqu'au pied du talus (fig. 4.7a). Par contre, les surfaces de glissements dans les matériaux ayant une forte cohésion et un faible angle de frottement tels que les argiles, la surface peut être plus profonde avec un rayon plus petit qui peut sortir au-delà de la pointe du pied de talus. La figure (4.7 b) montre un exemple des conditions dans lesquelles la forme de la surface de glissement est modifiée par la géologie des talus. Ici, la surface circulaire de la roche altérée supérieure est tronquée par la roche à faible pendage et plus résistante près de la base. Les analyses de stabilité des deux types de surface peuvent être effectuées en utilisant

des méthodes de rupture circulaire, bien que dans ce dernier cas, il est nécessaire d'utiliser une procédure permettant de définir la forme de la surface.

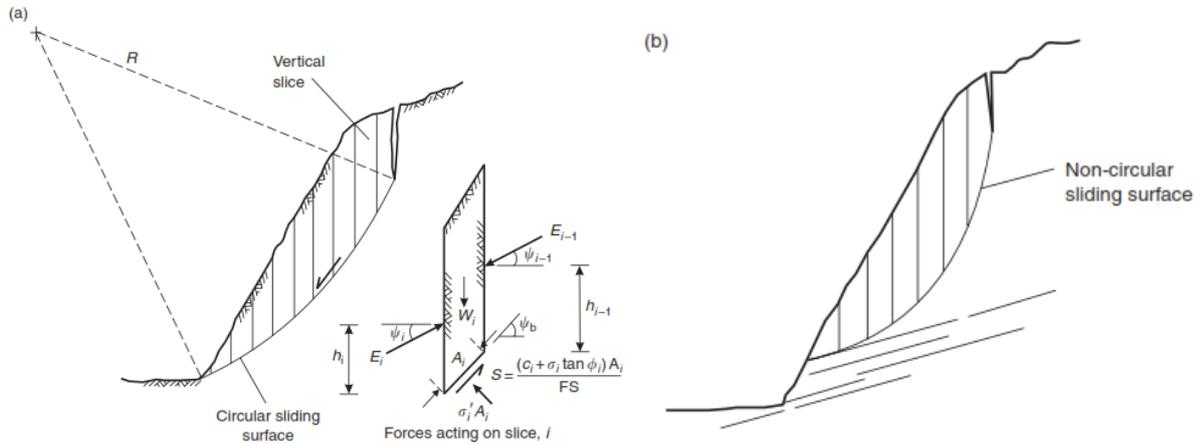


Figure IV.9- La forme des surfaces de glissement typiques:

- a) surface circulaire de grand rayon en matériau homogène et faible, avec le détail des forces sur la tranche;
- b) surface non circulaire en matériau superficiel faible avec une roche plus solide à la base.

3) Analyse de stabilité pour la rupture circulaire

Diverses méthodes d'analyse des ruptures circulaires dans les sols ont été décrites en détail dans des manuels traitant de la mécanique des sols tels que Taylor (1948), Terzaghi (1943), Lambe et Whitman (1979), Terzaghi et al. (1996), Duncan (2004) et Das (2013). L'analyse de stabilité de la rupture circulaire est effectuée en utilisant la procédure d'équilibre limite. Cette procédure consiste à comparer la résistance au cisaillement disponible le long de la surface de glissement avec la force requise pour maintenir le bloc considéré en équilibre. L'application de cette procédure aux glissements circulaires implique la division de la pente en une série de tranches qui sont généralement verticales. Le facteur de sécurité du glissement circulaire basé sur l'analyse d'équilibre limite est :

$$F_s = \frac{\text{résistance au cisaillement disponible } (c + \sigma_N \tan \phi)}{\text{contrainte de cisaillement sur le plan cisaillement } (\tau_c)}$$

IV.4. Approche numérique à l'analyse de stabilité

Pour les talus rocheux, les méthodes d'analyse de la rupture par la méthode d'analyse de l'équilibre limite calculent la résistance au cisaillement et les contraintes de cisaillement le long des plans de discontinuité. En revanche, les méthodes d'analyse numérique calculer le facteur de sécurité sans prédéfinir les plans de glissements. Ces méthodes sont des développements plus récents que les méthodes de l'équilibre limite. Elles sont principalement utilisées dans les études de mines à ciel ouvert et de glissements de terrain.

Les modèles numériques sont des programmes informatiques qui tentent de représenter la réponse mécanique d'une masse rocheuse soumise à un ensemble de conditions initiales telles que les contraintes in situ et les niveaux d'eau, les conditions aux limites et les changements induits tels que les excavations. Le résultat d'une simulation de modèle numérique est généralement soit l'équilibre soit l'effondrement. Si un résultat d'équilibre est obtenu, les contraintes et les déplacements résultants en tout point de la masse rocheuse peuvent être comparés aux valeurs mesurées. Si un résultat d'effondrement est obtenu, le mode de rupture prévu est démontré.

Les modèles numériques divisent la masse rocheuse en zones. Chaque zone se voit attribuer un modèle de matériau et des propriétés. Les modèles de matériaux sont des relations contrainte / déformation idéalisées qui décrivent le comportement du matériau. Le modèle le plus simple est un modèle élastique linéaire, qui utilise les propriétés élastiques (module d'Young et coefficient de Poisson) du matériau. Les modèles élastiques – plastiques utilisent des paramètres de résistance pour limiter la contrainte de cisaillement qu'une zone peut supporter.

Pour les talus, le facteur de sécurité est souvent défini comme le rapport entre la résistance au cisaillement réelle et la résistance au cisaillement minimale à l'équilibre. Une façon logique de calculer le facteur de sécurité avec un programme à éléments finis ou à différences finies consiste à réduire la résistance au cisaillement jusqu'à la rupture. Le facteur de sécurité est le rapport entre la résistance réelle de la roche et la résistance au cisaillement réduite à la rupture. Cette technique de réduction de la résistance au cisaillement a été utilisée en premier avec des éléments finis par Zienkiewicz et al. (1975) pour calculer le facteur de sécurité d'un talus composé de plusieurs matériaux. Pour effectuer une analyse de stabilité de pente avec la technique de réduction de la résistance au cisaillement, des simulations sont effectuées pour une série de facteurs d'essai de sécurité croissants (f). Les propriétés réelles de

résistance au cisaillement, la cohésion (c) et l'angle de frottement (φ), sont réduites pour chaque essai selon les équations :

$$c_{\text{trial}} = \left(\frac{1}{f}\right) c \quad \varphi_{\text{trial}} = \arctan\left(\frac{1}{f}\right) \tan \varphi$$

Le facteur de sécurité est augmenté progressivement jusqu'à la rupture. A la rupture, le facteur de sécurité est égal au facteur de sécurité réel (c'est-à-dire). $f_{\text{trial}} = FS$.

Plusieurs code de calcule (en elements finis, differences finies, éléments dicrets...etc) ont été écrits pour modeliser la stabilité des talus et des glissements de terrains en générale. On peut citer PHASES (Plastic Hybrid Analysis of Stress for Estimation of Support), FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua; Itasca Consulting Group, 2001), Plaxis 8.2 et UDEC (Uniernal Distinct Element Code, Itasca consulting groupe, 2000).

Dans cette étude nous avons utilisé deux programmes pour modeliser note cas d'étude. ces deux programmes sont Geostudio slopew qui utilise la méthode de l'équilibre limite et plaxis 8.2 qui utilise les éléments finis pour l'étude de la stabilité du talus nord de la mine de Kef Esnoune.

IV.5. Analyse du glissement de terrain de Kef Es Senoun et conditions de son apparition:

Il s'agit d'un glissement de très grande ampleur par son volume le 08 Septembre 2007, dans le flanc Nord-est de la carrière de Kef Es Sennoun, qui peut être grossièrement estimé à partir du plan au 1/1000^{ème}.

- Surface affectée : environ 110 000 m² (11 hectares).
- Epaisseur moyenne : environ 70 m (35 m de phosphates et 35 m de terrains sus-jacents), soit un volume de 7,7 Mm³.



Figure IV.10.Photo montre la situation morphologique du gisement de Kef Essenoun (Kadri et Bougdal 2007)

IV.5.1. Caractéristique du glissement

La zone de glissement est caractérisée par un sens inverse à celle de l'exploitation (Nord vers le Sud) avec un escarpement de tête de rupture de 40 à 50 m de dénivelée. La masse glissée couvre une surface de 11 hec avec une épaisseur moyenne d'environ 70m (30m de phosphates et 40 m de terrains sus-jacents) donc, nous pouvons estimer le volume de la masse glissée à 7,7 millions de m³ venant combler presque toute la fosse d'exploitation.

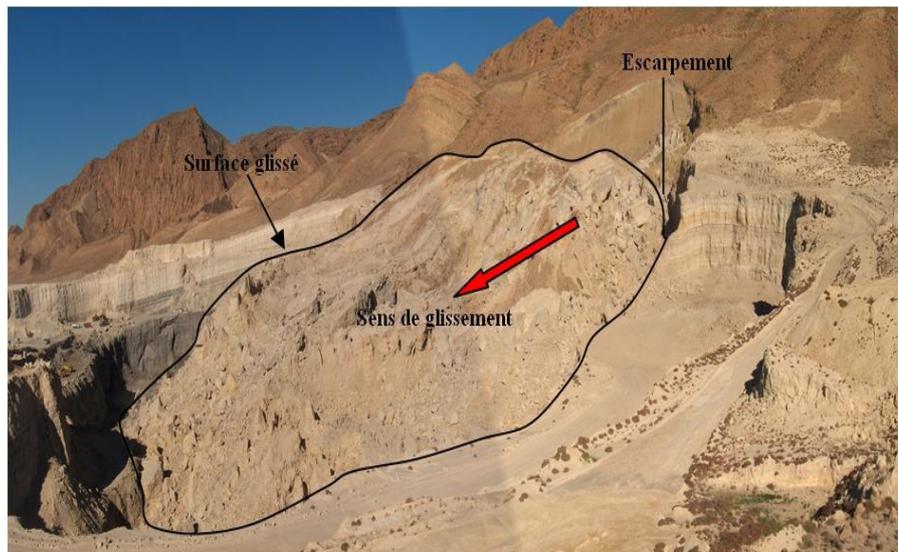


Figure IV.11-photo représente les caractéristiques du glissement de Kef Es Sennoun

IV.5.2 Identification du terrain glissé

La coupe géologique montre que les terrains déstabilisés sont constitués de la couche de phosphate surmontée des terrains de recouvrement, composés de marno-calcaires, calcaires à dolomies et bancs de silex de l'Yprésien et du Lutétien peuvent atteindre une épaisseur de 70 à 80m (phosphate 30m et le recouvrement 40 m, dans la zone centrale du glissement. Tout autour de ce dernier, une série de fissures concentriques se développe au-delà de l'escarpement principal sur la base des réseaux de fractures préexistant dans la roche.

IV.5.3 Localisation de la surface de glissement

La détermination de la forme et l'emplacement de la surface de rupture représente une étape primordiale et indispensable pour caractériser un glissement de terrain naturel ou artificiel (provoqué). Dans le glissement déjà déclenché où il y a eu lieu, la détermination de cette surface est plus aisée que celle supposé en risque de déstabilisation. La mise en évidence des caractéristiques de la surface de glissement dans le cas de l'éboulement du bord N-E de

Kef Essennoun, en se basant sur la coupe géologique NE-SO de la zone glissée, les documentations communiquées et les observations directe au terrain, nous pouvons dire :

- Les terrains concernés par le mouvement sont constituées principalement par la couche de phosphate exploité surmonté par des recouvrements de calcaire marneux;
- L'observation de la forme de terrain glissé montre que la couche de couverture notamment de calcaire a plus au moins conservé sa structure initiale ce qui implique que la surface de glissement est bien plus profond sous cette formation ;
- L'existence à la base de la couche de phosphate la formation Pélitique et Argileux du Thanicien inférieur qui représente sur le plan géotechnique une résistance faible par apport à la couche de phosphate ;
- L'escarpement principal du glissement correspond à la base du niveau phosphaté exploité et cette base coïnciderait avec la cote topographique de la fosse au pied du gradin du niveau exploité.

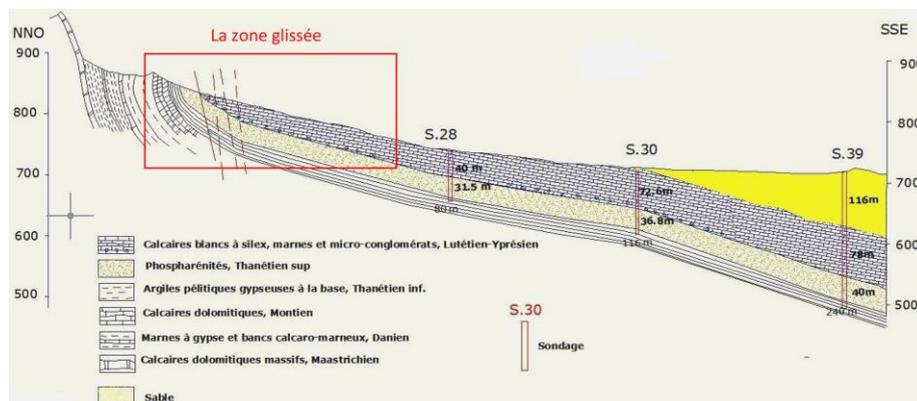


Figure IV.12-Coupe géologique NNO-SSE du gisement de phosphate de Kef Essennoun (Mezam 2015) (SOMIPHOS).

D'après ce qui précède, il résulte que la surface de glissement correspond à l'interface *phosphate/marne* et que sa forme suit la topographie de celle ci, il s'agirait d'un glissement guidé par un plan prolongé vers le Sud avec un angle α de l'ordre de 14 degrés.



Figure IV.13-La roche masse brisée et intensivement cassée suite au glissement

IV.5.4 Principaux facteurs déclenchant le mouvement

La détermination des facteurs dits moteurs est l'un des objectifs majeurs d'une étude globale d'un glissement de terrain. Ces informations servent à réaliser des études rétrospectives de ce type de phénomènes dans d'autres cas où nous avons les mêmes caractéristiques morphologiques, géologiques et géotechniques.

Pour la catastrophe de Djebel Onk, les principales causes du déclenchement du glissement sont multiples et diverses. Ils peuvent être repartis en deux groupes techniques et naturels.

1) Facteurs géologiques

- La présence d'une interface phosphates/marnes plastiques à faible frottement à la base de la couche phosphatée. La plasticité et le faible coefficient de frottement de cette formation ait contribué à l'instabilité du bord. (Lorsque l'angle $\alpha > \delta$ du plan de glissement atteint la valeur de l'angle de frottement ϕ , le glissement devient possible).
- La présence d'un redressement quasi-vertical de la couche, permettant de « découpler » la masse rocheuse du socle constitutif de la montagne. Ce redressement a permis à la masse de se détacher et d'amorcer son glissement sur un véritable « plan incliné ».
- Enfin le caractère fortement tectonisé (plissé et faillé) du massif, à l'origine d'une intense fracturation (fractures nord/sud, fractures nord-ouest/sud-est, parfaitement visibles sur le site). Cette fracturation confère à la masse rocheuse des propriétés mécaniques médiocres, et a permis à celle-ci de « se détacher » du reste du massif, sur ses bordures Est et Ouest.

2) Facteurs techniques

- L'endroit de l'ouverture a été mal choisi (au niveau de sondage S.28) c.à.d. au pied du redressement quasi-vertical sans prendre en compte l'avancement des travaux vers le Nord (vers la verticalité des couches). En revanche, selon l'art et les normes de l'exploitation minière à ciel ouvert des gisements en flanc de coteaux, l'exploitation doit commencer d'haut en bas et ne pas l'inverse.
- La constitution d'un talus très redressé (quasi vertical) sur une hauteur d'environ 70 m, 40m pour le recouvrement de calcaire et 30m du phosphate.
- La réduction de la berme de sécurité et de transport à une valeur de l'ordre de quelques mètres seulement pour gagner le minerai (jumelage des gradins).
- Les tirs réalisés à l'aide de l'explosif brisant à la base du front phosphaté, contribuant à l'affaiblissement de la résistance de la roche au pied du gradin. L'effet dynamique lié aux vibrations de tir peut également avoir une incidence sur une masse en équilibre instable.

IV.6.Calcul de stabilité par le logiciel Geo-Slope (Geostudio) module SlopeW

Présentation du logiciel GEOSLOPE :

Géostudio est un logiciel de calcul géotechnique qui permet de traiter les différents problèmes du sol comme le glissement des terrains, le tassement, la consolidation, les infiltrations des eaux dans le corps de la digue d'un barrage et d'autres problèmes liés à la géotechnique. Plusieurs programmes sont intégrés dans la fenêtre générale du logiciel :

- 1) SLOPE/W: calcul des facteurs de sécurité d'une pente en utilisant les méthodes d'analyses classiques (Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price,...).
- 2) SEEP/W: calcul, analyse et évolue, grâce à un modèle par élément finis, les pressions interstitielles d'eau....
- 3) QUAKE/W: modélisation par éléments finis du comportement du sol sous séisme.
- 4) SIGMA/W: analyse par élément finis des problèmes de contraintes-déformations.
- 5) TEMP/W: analyse des problèmes géotechniques des sols.
- 6) CTRAN/W: modélisation du mouvement d'une contamination dans des matériaux poreux.
- 7) AIR/W: analyse des interactions entre l'eau et l'air du sol dans des matériaux poreux.
- 8) VADOSE/W: analyse de flux en dessous de la surface du sol, dans la vadose non saturée et qui rejoignent le régime de l'eau dans le sol.

➤ Le programme SLOPE/W:

Le programme SLOPE/W est l'un des programmes intégrés dans la fenêtre du Geostudio 2012 et qui est basée sur la théorie de l'équilibre limite dans les calculs du coefficient de sécurité des pentes. Ce programme permet d'analyser facilement à la fois des problèmes simple et complexe de stabilité des pentes en utilisant une variété de méthodes pour calculer le coefficient de sécurité.

➤ Fonctionnement du logiciel :

Le présent logiciel comme tous les autres programmes de calcul, sert à fournir des résultats issus d'un nombre défini des paramètres, donc il est nécessaire de suivre les étapes suivantes pour l'achèvement de l'opération de calcul :

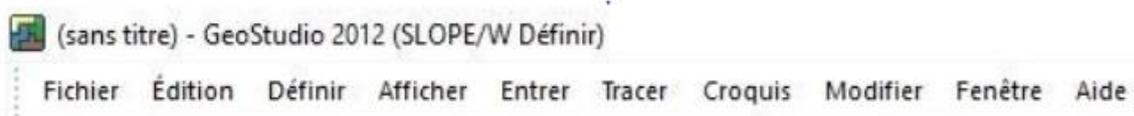


Figure IV.14-Les menus disponibles sur logiciel SLOPE/W.

Fichier : Ouvrir et enregistrer les fichiers, les importations des photos et imprimer le dessin.

Édition : permet de copier le dessin dans la Presse-papiers du Windows.

Définir : définir les paramètres de la grille, le zoom, les axes et de la page.

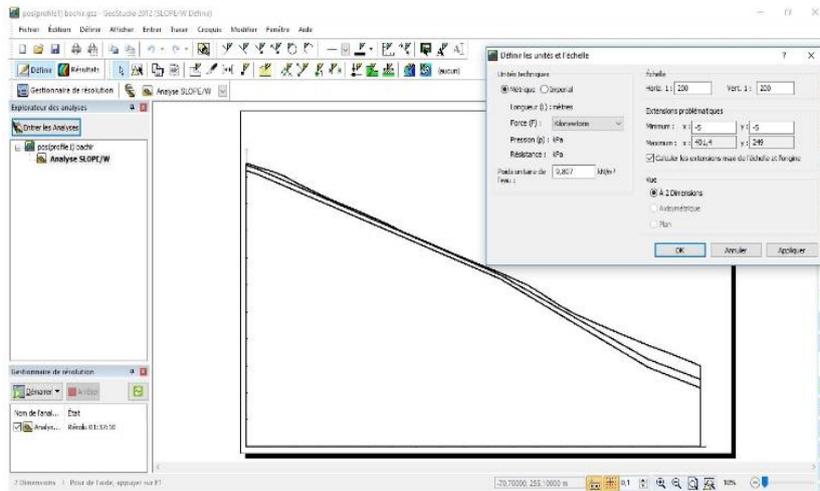


Figure IV.15-Fenêtre de définir les unités et l'échelle.

Afficher (aperçu) : Options d'affichage des contrôles, des informations des sols et des points, et d'affiche les forces inter-tranches sur un schéma corporel de chaque tranche et le polygone de forces

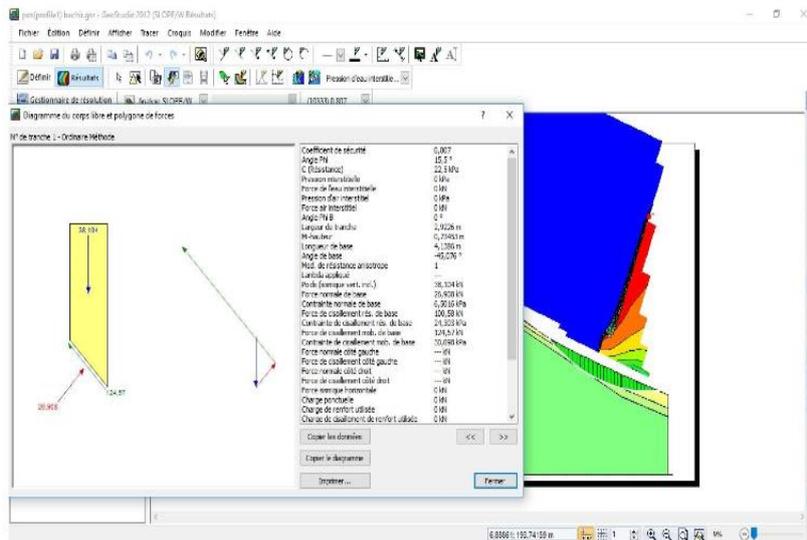


Figure IV.16-Fenêtre d'affichage des informations sur la tranche.

Entrer : Permet d'introduire automatiquement à l'aide des tableaux les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), les caractéristiques physiques et mécaniques des différentes couches constituant le talus, des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, de sélectionner les différentes méthodes de calcul, les surcharges, l'effort sismique confortements.

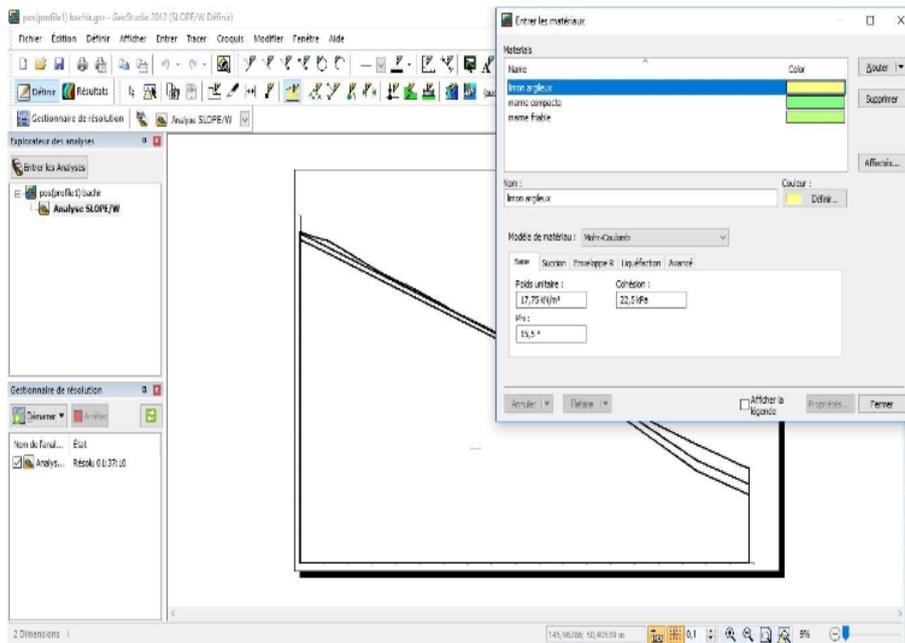


Figure IV.17-Fenêtre d’insérer les caractéristiques mécaniques des différentes couches.

Tracer (dessin) : permet d’introduire manuellement les paramètres géométriques de la pente (coordonnées et couches), des conditions complémentaires nécessaires pour le calcul, le niveau de la nappe, les surcharges et les confortements.

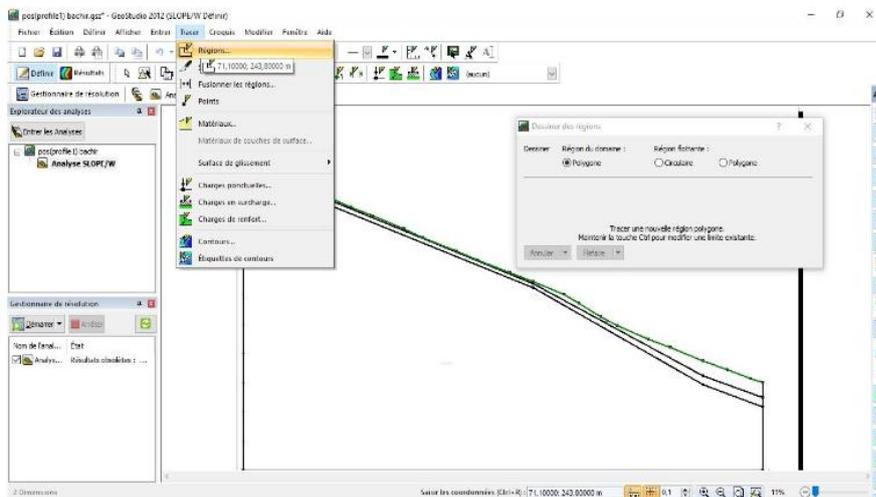


Figure IV.18-Fenêtre de dessiner des régions.

Croquis: Définit les objets graphiques d'étiqueter, d'améliorer et de clarifier les résultats du problème.

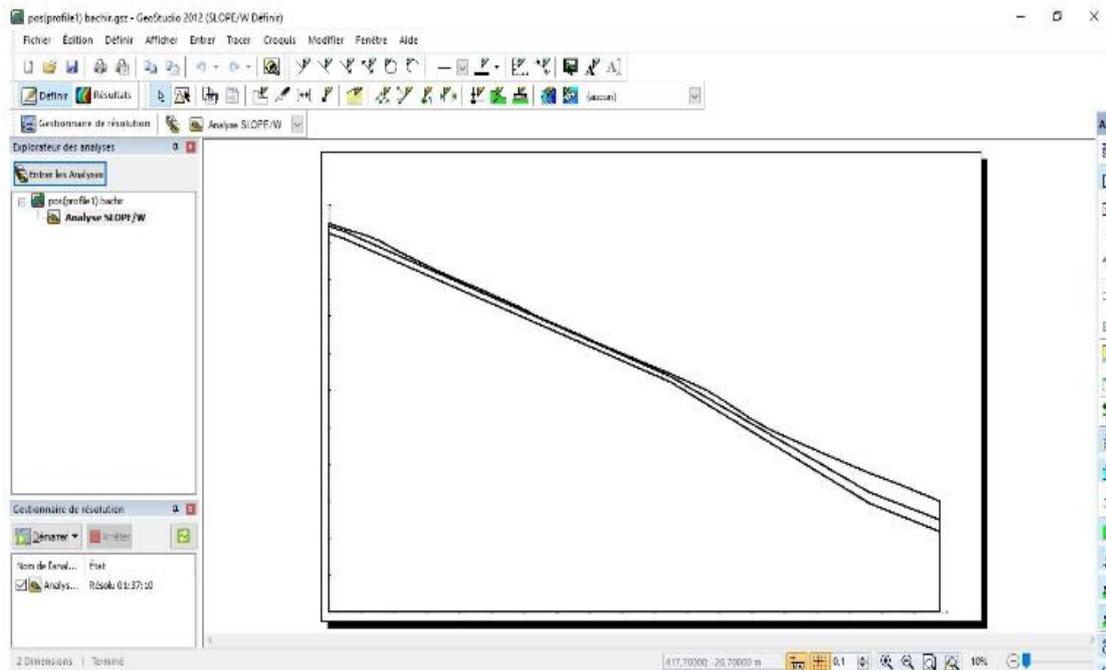


Figure IV.19-Schéma du problème.

Modifier : cette instruction permet aux utilisateurs de rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

Principe de fonctionnement du SLOPE/W

Définition du problème :

-On crée un nouveau projet et on spécifie le type de l'analyse et la méthode de calcul.

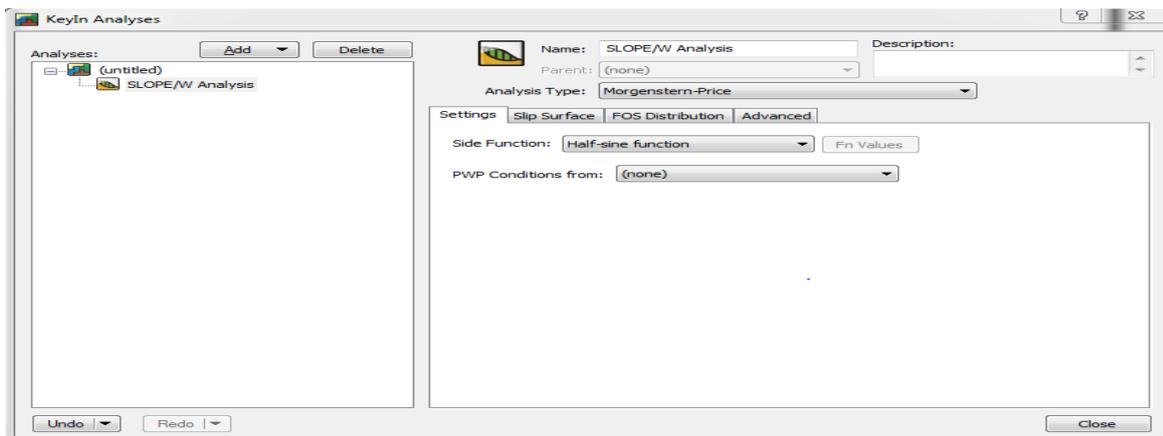


Figure IV.20-Création d'un nouveau projet sur SLOPE/W.

-On choisit le type de calcul du coefficient de sécurité (constant ou bien une distribution probabiliste).

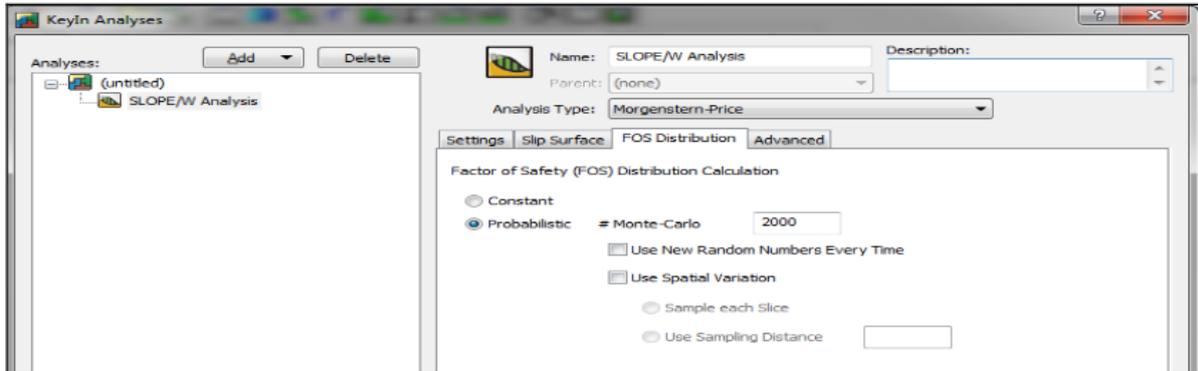


Figure IV.21-Choix de type du facteur de sécurité.

-On spécifie dans quel sens les surfaces de ruptures vont être effectuées et aussi le mode de dessin de ces surfaces.

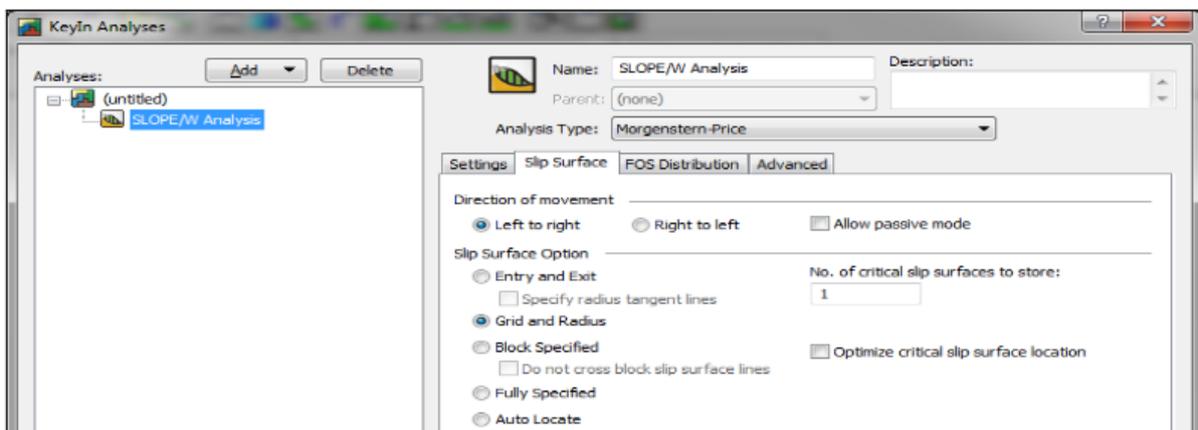


Figure IV.22 -Spécification des surfaces de rupture.

-La délimitation de la surface du travail, la définition de l'échelle et la fixation d'axes se fait à l'aide de la commande set.

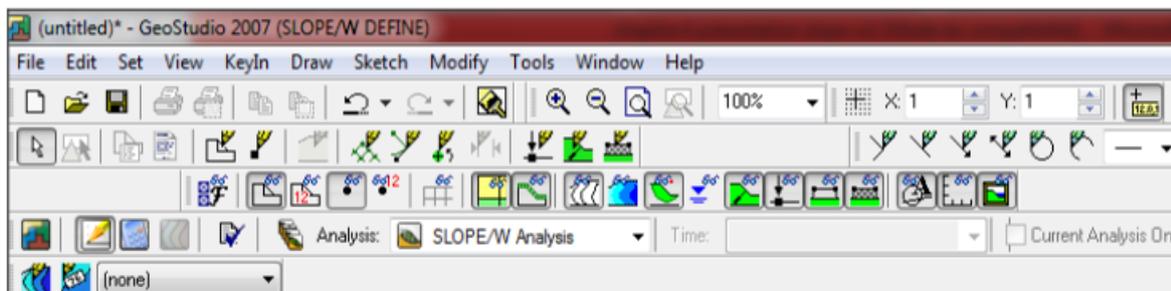


Figure IV.23 -Barre d'outils du logiciel SLOPE/W.

-La commande KeyIn est utilisée pour insérer les propriétés des matériaux.

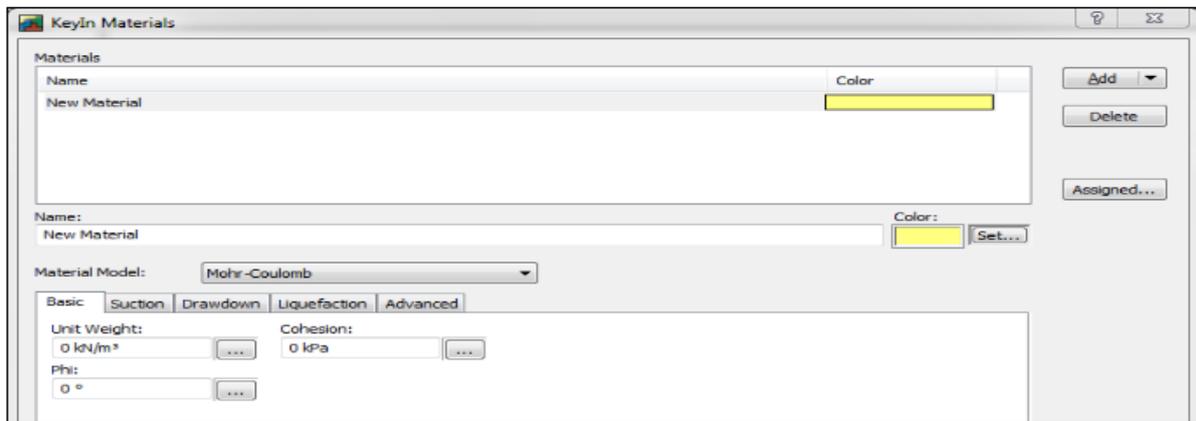


Figure IV.24 -Création des matériaux dans l’outil SLOPE/W.

-La commande Draw: elle sert au dessin du model du modèle et des conditions aux limites telles que le niveau piezometrique

-La commande Modify: cette instruction permet aux utilisateurs de rajouter, éliminer, supprimer et modifier des objets dans le problème.

V.4.2.2.Vérification de données introduites :

-La commande verify sert à vérifier si le model et les données s’il y a des erreurs ou non, cette commande permet d’identifier l’erreur et de la corrigée avant le calcul.

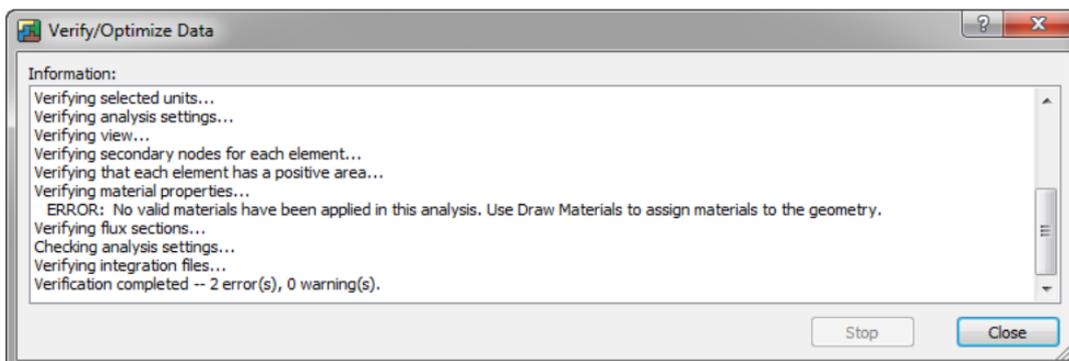


Figure IV.25 -Vérification des données insérées.

V.4.2.3.Résolution du problème et visualisation des résultats :

-La commande Solve : C'est l'étape de résolution du problème, à l'aide des méthodes classiques et la méthode des éléments finis et a partir des données introduites, on détermine le coefficient de sécurité F_s .

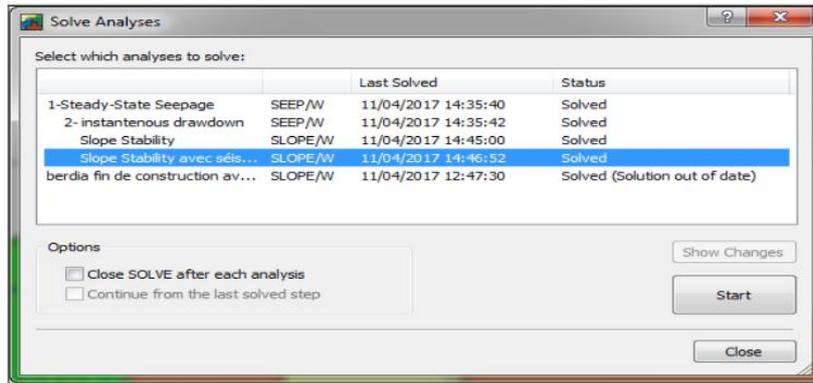


Figure IV.26 -Résolution du problème.

-La commande Contour: C'est l'étape chargée de traduire les différents résultats sous une forme graphique; et d'afficher ces résultats.

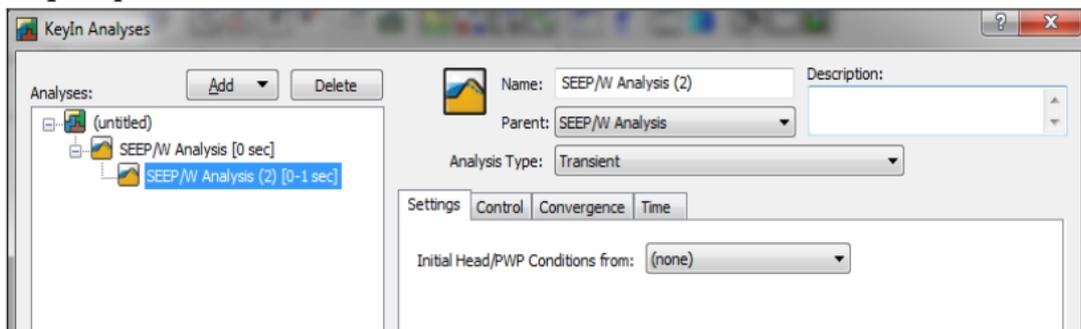


Figure IV.27-Définition d'une analyse transitoire.

6-Après avoir compléter la définition du problème, on opère la commande solve qui nous calcule le coefficient de sécurité et nous donne le cercle ou le plan de glissement critique.

IV.7Méthodes de calcul de la stabilité des talus

Les méthodes de calcul de stabilité des terrains sont basées sur la constatation suivante : lorsqu'il y a glissement de terrain, il y a séparation d'une masse du sol du reste du massif et son glissement se fait suivant une surface de rupture. Ayant défini une surface de rupture « S », on étudie la stabilité de la masse(1) mobile par rapport au massif (2) qui est fixe.

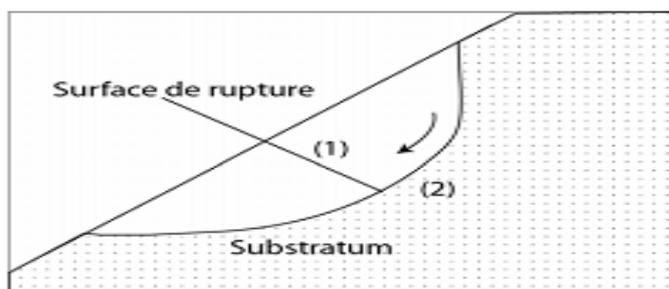


Figure IV.28- Surface de rupture.

IV.7.1 Définition du facteur de sécurité Fs

Le calcul de la stabilité des talus est généralement estimé à l'aide d'un coefficient appelé coefficient de sécurité Fs. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du moment par rapport à un point fixe de la résultante des forces résistantes au glissement aux forces provoquant le glissement.

$F_s = \frac{\sum_{EF} \text{des moments résistants maximaux}}{\sum_{EF} \text{des moments moteurs}}$

En se référant aux valeurs du coefficient de sécurité on peut évaluer l'état de stabilité du talus comme le montre le tableau ci-après.

IV.8 Calcul de la stabilité

Le calcul de la stabilité des talus revient à déterminer le facteur de sécurité des gradins. Pour cela, il est nécessaire en premier lieu, de déterminer les propriétés physicomécaniques du massif rocheux de Kef Essnoun et de le classifié. Une fois le massif caractérisé et classifié. Les calculs de stabilité ont été effectués avec le logiciel GEOSLOP

IV.8.1 Paramètres de calculs :

✓ **Paramètres géologiques :**

Quartes formations géologiques ont été considérées dans les calculs :

- le calcaire supérieur de l'yprésien.
- le phosphate du thanetien supérieur.
- la marne du thanetien inferieur.
- le calcaire inferieur du montien.

✓ **Paramètres géotechniques :**

Nous avons prend les mêmes paramètres qui ont été utilisés par DMT lors de calculs de stabilité des talus du gisement de djebel Onk Sud.

Les paramètres géotechniques sont mentionnés dans le tableau suivant

Tableau.IV.1-Les Paramètres géotechniques.

formation géologique	poids volumique (KN/m3)	angle de frottement interne	cohésion (KN/m2)
calcaire supérieur de l'yprésien	26.5	37	2700
Phosphate	20.6	37	1150
Marne	22.6	15	0
calcaire inferieur du montien	26.5	37	1800

IV.9 Etude de stabilité par (Géo-slope) situation de la carrière avant le glissement de 2007:

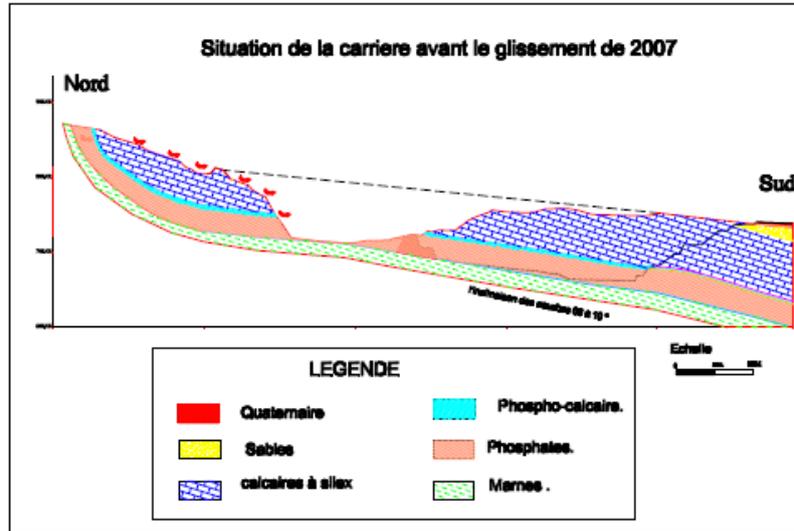


Figure IV.29- coupe avant glissement.

fs=

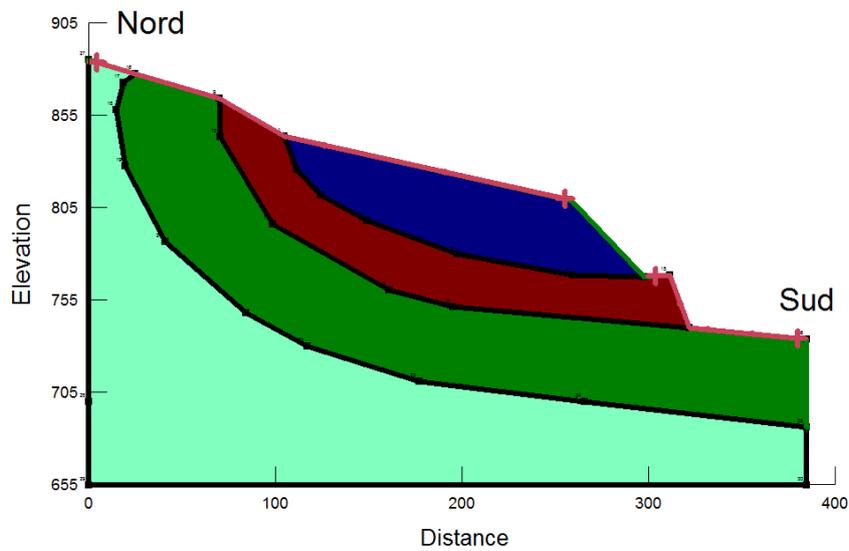


Figure IV.30- le modèle géométrique et le choix des entres-sortie avant glissement.

Les résultats du calcul sont comme suit :

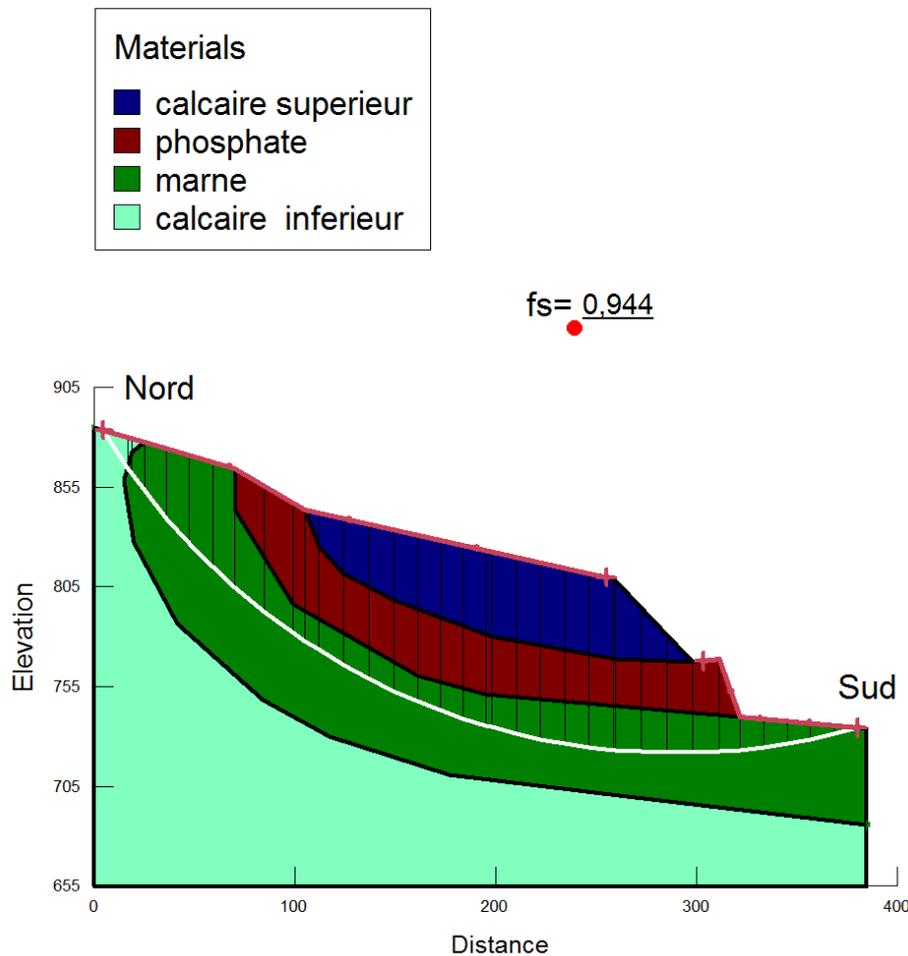


Figure IV.31 -la surface du glissement.

La valeur du F_s calculée est: $F_s= 0.944$

Les résultats obtenus montrent ce qui suit :

Le résultat de l'analyse à l'équilibre limite montre bien que la carrière présente un grand risque d'instabilité faible spécialement au niveau phosphate-marne.

IV.10. Approche numérique à l'étude de la stabilité du glissement par le logiciel Plaxis:

Plaxis est un logiciel spécialisé qui utilise les éléments finis pour résoudre plusieurs problèmes en géotechnique. Dans cette étude le logiciel plaxis 8.2 est utilisé pour l'estimation de la stabilité de la mine.

Plaxis est un programme d'éléments finis conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique.

Le code de Plaxis :

Plaxis est constitué de quatre modules, chacun est conçu pour faire une tâche précisedans le processus de modélisation.

A- Le module Input :

C'est dans ce module qu'on établie le model géotechnique, les conditions aux limites, définition des matériaux, maillage ...etc. Il constitue l'étape de pré-processing dont les étapes sont :

La 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.

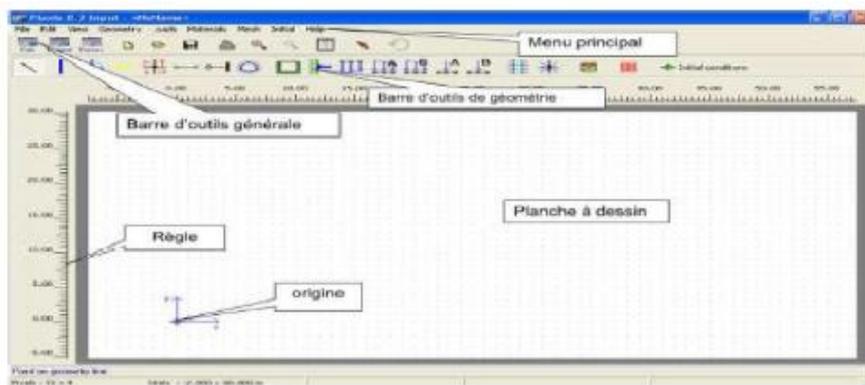


Figure IV.32- Fenêtre de Plaxis 8.2 dans la phase Input.

Les conditions aux limites : Ce sont des déplacements nuls imposés. Ils peuvent être appliqués aux lignes comme aux points définissant la géométrie du modèle dans toutes les directions.

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.

- Introduire les propriétés des matériaux :

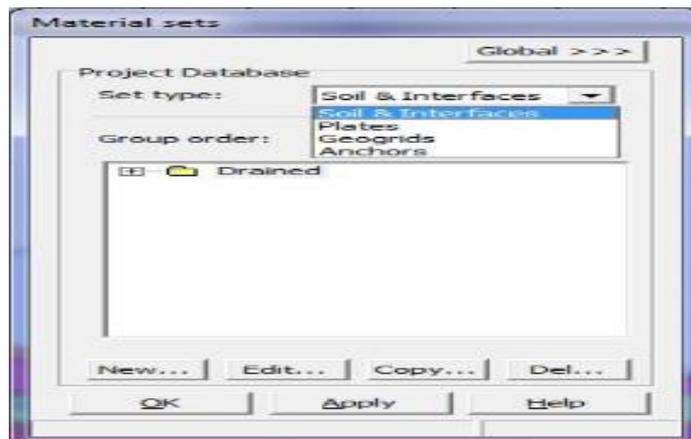


Figure IV.33-Fenêtre de saisie des propriétés de matériaux (Plaxis)

La génération automatique du maillage : le maillage d'éléments finis est généré à partir du modèle géométrique, avec des options pour le raffiner.

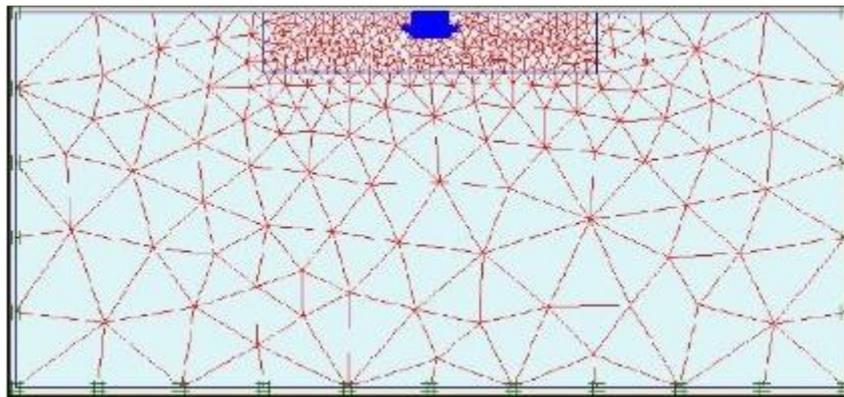


Figure IV.34 -Exemple de maillage, (Logiciel Plaxis).

Distribution des contraintes effectives et neutres : Des réseaux complexes de pressions interstitielles peuvent être générés par combinaisons de lignes phréatiques et de saisie directe de pressions.

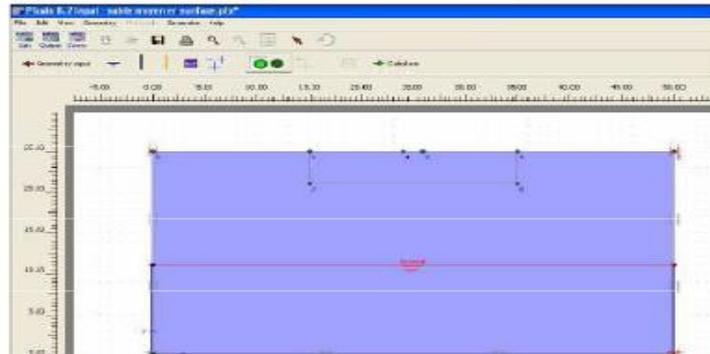


Figure IV.35 -Génération des conditions hydrogéologiques.

B- Le module Calculation

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.

C- Le module Output

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

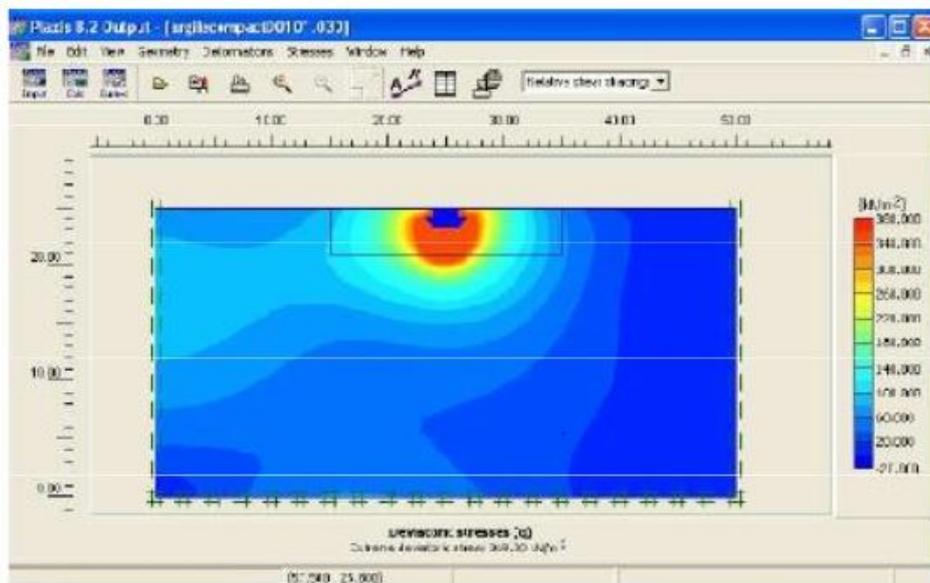


Figure IV.36 -Module output (plaxis 8.2).

D-Le module Curves

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

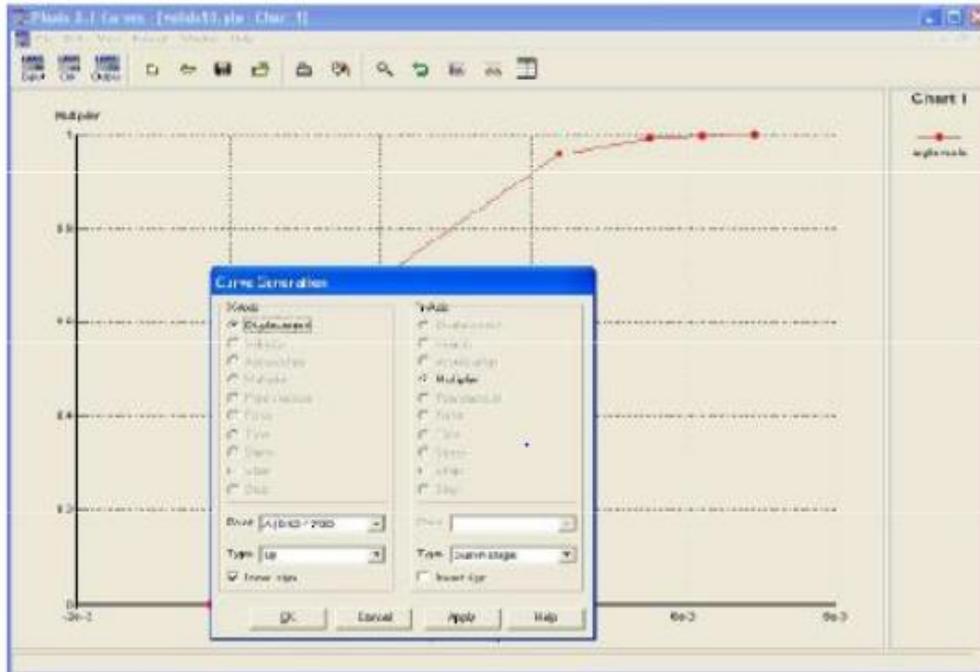


Figure IV.37-Exemple d'une présentation graphique des résultats contrainte-déplacement.

IV.10.1. Application au dressant de Kef Es Senoun Dj Onk

On continue, après l'étape de calcul puis l'étape d'affichage des résultats. Les calculs, on utilisant les mêmes propriétés présentés précédemment ont donné un coefficient de sécurité de 0.83.

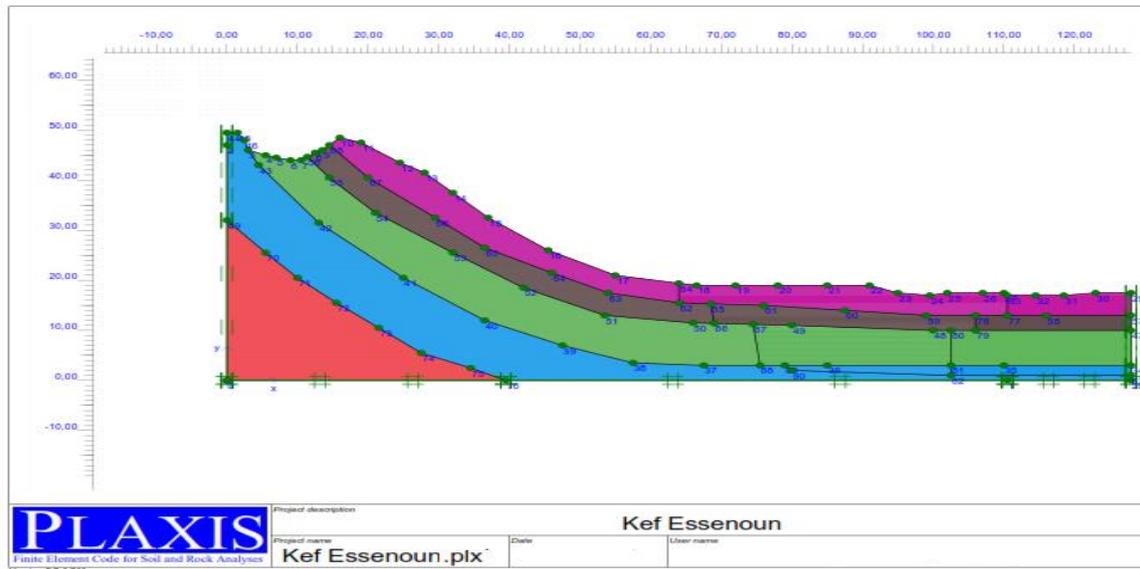


Figure IV.38-Model géologique de la mine avant exploitation.

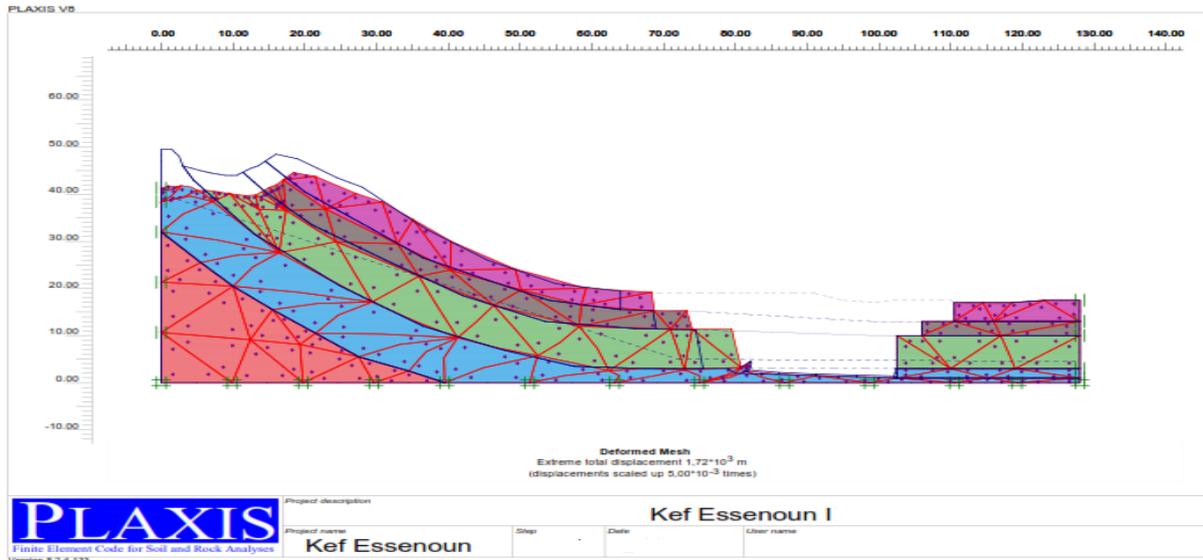


Figure IV.39 -Simulation de l'opération d'excavation.

Courbe de la variation du facteur de sécurité avec le déplacement sur le plan de glissement. Le facteur de sécurité $F_s = 0.83$

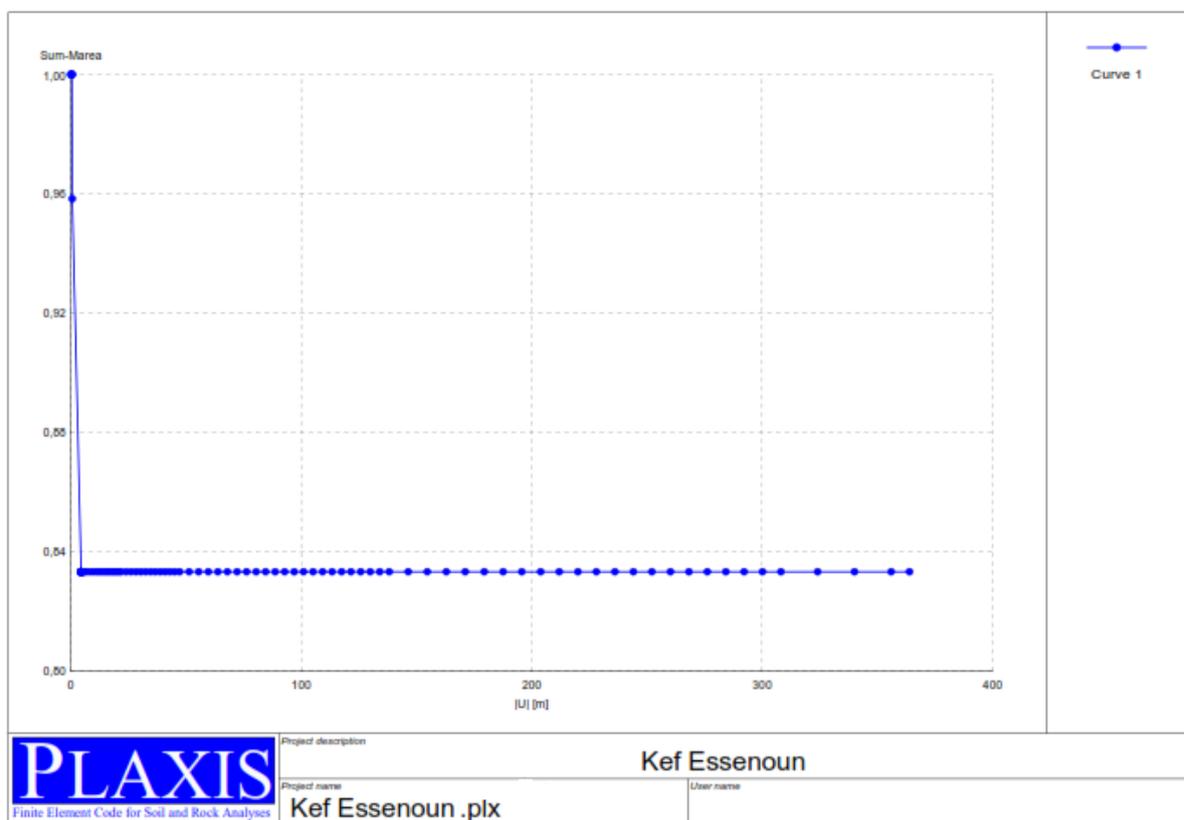


Figure IV.40 -Evaluation du F_s par (Plaxis 8.5)output.

Les résultats obtenus après le calcul de facteur de sécurité ont confirmé que la zone de marnes est la zone par laquelle passe le plan de glissement.

IV.11. Conclusion

L'évaluation de la stabilité d'un versant peut se faire par diverses méthodes afin de définir un facteur de sécurité pour apprécier la marge de sécurité du versant vis-à-vis de la rupture et d'identifier la zone instable. De plus des techniques de confortements des glissements sont très nombreuses, elles doivent être adaptées aux conditions du site.

les calculs de stabilité par la méthode de l'équilibre limite par le logiciel géoslope (slope/w) ont montré un coefficient de sécurité inférieur à un. L'analyse numérique par le logiciel plaxis 8.2 et le logiciel géoslope (slope/w) convergé vers la même conclusion.

Le résultat de l'analyse montre bien que la carrière présente un grand risque d'instabilité faible spécialement au niveau phosphate-marne donc la zone de marnes est la zone par laquelle passe le plan de glissement.

Les méthodes d'estimation de la stabilité du dressant de Kef Es Senoun ont tous indiqué un talus instable. Donc quelque soit la méthode d'approche à l'étude de la stabilité des mines, pourvu que les résultats sont fiables, arrivent et avec précision à prévoir la stabilité des talus.

La diminution des valeurs de la hauteur de gradin et de l'angle d'inclinaison de leurs talus augmente les valeurs de F_s et donc améliore la stabilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif essentiel de ce travail est l'étude d'instabilité de la mine de Djebel Onk à Bir El Ater suite au glissement du 2007, qui a arrêté l'exploitation dans ce quartier pour des années. Cette étude vise à déterminer les causes et les remèdes à l'origine de ces instabilités.

Les conclusions qu'on peut tirer de ce modeste travail sont les suivantes :

- ✓ Le gisement de phosphate de Kef Essnoun est composé de quatre couches principales en alternance (phosphate, calcaire, phospho-calcaire et marne).
- ✓ Les massifs rocheux sont des structures discontinues, et leur étude et leur classification s'appuie sur la caractérisation de la roche saine et des discontinuités.
- ✓ Les classifications géomécaniques empiriques, établies à base des observations sur terrain menées par l'entreprise et nous même, que se soit RQD, RMR et le SMR, on déduit que la qualité du massif Kef Essnoun varie en fonction des différents faciès de bonne pour les calcaires Yprésien-Lutétien, les calcaires phosphatés, les phosphates et les calcaires Danien-Montien et de moyenne à médiocre les marnes schistifiées du thanetien inferieu. D'après les résultats de la classification SMR on constate que l'interface marneuse constitue la cause probable d'une instabilité du massif en raison de sa mauvaise qualité (marne schistifiées).
- ✓ Les rapports d'expertises sur glissement ont abouti, au fait que, les causes probables de ce aléa sont imputées à certains facteurs géologiques et Facteurs techniques.....
- ✓ Afin de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus par la classification semi-empirique, on a utilisé deux méthodes: méthode des éléments finis (Plaxis) et GEOSLOPE par la détermination d'un coefficient de sécurité (Fs) qui évalue l'état de stabilité du massif. Les résultats tirés de ces applications sont :

L'analyse par la méthode de l'équilibre limite on utilisant le logiciel Géoslope (SlopeW) donne un facteur de sécurité inférieur a un confirmant les résultats des deux Précédentes méthodes.

L'analyse numérique de stabilité par le logiciel Plaxis8.5 a confirmé, d'une part, les résultats obtenus par la méthode déterministe avec un facteur de sécurité de l'ordre 0.83, et d'autre part, il nous a permis de constater que le déplacement (déformation) de la paroi nord de Kef Essnoun est important.

Comme solution pour augmenter le coefficient de sécurité et assurer la stabilité du site les on recommande :

- ✓ La diminution de la crête jusqu'à un niveau permettant ainsi d'éliminer l'effet du redressement des couches.
- ✓ Création des gradins de hauteur ($H_g = 15m$) permettant d'augmenter la stabilité avec la création et élargissement des plateformes.
- ✓ Reprofilage des gradins et des plateformes créent auparavant.
- ✓ Stabilisation de la paroi nord par remblayage de la fosse existante (ce qui est indispensable pour des raisons de sécurité).
- ✓ Extraction des stériles et du phosphate de la paroi nord pour la libération des contraintes.
- ✓ Mise en valeur et développement de la fosse vers le sud Pour établir une planification détaillée, une exploration des couches du mur en profondeur, ainsi qu'en affleurement au nord de Djebel Onk Sud, est nécessaire.

Pour éviter le scénario précédent des instabilités l'EN FERFOS a ouvert un nouveau front d'exploitation de l'ouest vers l'est pour échapper à la suppression basale de la buté, cause principale du déclenchement des instabilités. A notre opinion c'est la meilleure des solutions car elle leur fait éviter des dépenses immenses de stabilisation.

Comme future travail dans la mine, il est important de voir l'état des marnes schistifiées à savoir leur étendue, leur structure, texture, teneur en eau et présence des signes de glissement surtout dans les endroits non affectés par le glissement.

Bibliographie

- Abdelouahed T., (1992), « Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées en géologie de l'ingénieur.
- AFTES., [2003], « Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et la réalisation des ouvrages souterrains».
- Aissaoui D., (1984), «Les structures liées à l'accident sud-atlasique entre Biskra et le Djebel Mandra, Algérie. Evolution géométrique et cinématique», Thèse 3ème cycle, Strasbourg. P 14.
- Antoine P., [1992], «Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grandes ampleur - aspects géologiques -», Bull Ass, Int. Géol, Ing, p.1.
- Barton N. R. et Choubey V., [1977], «The shear strength of rock joints in theory and practice», edition Rock Mech, p. 50-54.
- Bieniawski Z.T.,[1989], «Engineering rock mass classifications a complete manual forengineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering»,New-York, WileyInterscience, p. 52-56, 58, 59, 73-81.
- Boucif R. et Tamourt M., [2015], « Etude de stabilité du flanc Nord de la mine de kef Essnoun- Tébessa», Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master, Université Abderahmane Mira de Bejaia, 148 pages.
- BOUKHEDIA Khadidja ;<< Contribution à l'étude de défaillance des digues A talus par une approche probabiliste >> ; 26, 27 28 29 30 31
- Calembert L et al., [1978], «Géologie de l'Ingénieur et Mécanique des Roches», Annales des Travaux Publics de Belgique, p.28.
- CERD (centre de recherche et de développement Service hydrogéologique), [2008], «Travaux hydrique de la région de Djebel el Onk», Ferphos Tebessa, 30 p, inédit.
- Chalhoub M., [2006], «Apports des méthodes d'homogénéisation numériques a La classification des massifs rocheux fracturées». Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, spécialité géologie de l'ingénieur, p. 39-45, 206.
- Chenafa W. et M'zoughem K., [2006], « Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain el kebira (Sétif) », Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'état en géologie, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 68 pages.
- Cieslinski S. et al., [1985,1987], «Travaux de prospection et d'évaluation des phosphates de la région de Bir El Ater», EREMP, 3-6-11-17, inédit.

- Deere, D. U., [1988], “The Rock Quality Designation (RQD) index in practice“, In Rock classification systems for engineering purposes, edition Kirkaldie L., Philadelphia p 91-101.
- DEGOUTTE, G ; ROYET, P ; « Aide-mémoire de mécanique des sols » ; Réédition ; 99 pages ; 2005.
- DJEBROU, B ; « traitement du sol par colonne ballastes dans la région de Blida», mémoire de fin d'étude de l'Université SAAD DEHLAB BLIDA ; 102 pages ; 2007.
- DELAGE, P ; CUI, Y.J ; « Comportement mécaniques des sols non saturés » C302; Technique de l'ingénieur, traité construction ; 19 pages ; 1999.
- Duffaut P. et Homand F., [2000], « Manuel de mécanique des roche », Tome 1 : fondements, Comité français de mécanique des roches, 87 pages.
- Françoise Homand et Pierre Duffaut, [2000],« Manuel de mécanique des roches», Les presses de l'école des Mines Paris.
- HOANG, Thi Thanh Nhan, [2010], « Etude du comportement d'un milieu rocheux fracturé », Thèse doctorat de l'école des ponts Paris Tech.
- Hoek E. et Bray J.W., [1977], “Rock slope engineering“, edition Institution of Minery and Metallurgy, p. 5.
- Hudson J. A., [1993], “Comprehensive rock engineering - principles, practice and Projects -“, Rock Testing and Site Characterization, oxford – Pergamon Press - , Vol 3, p. 553-555.
- Jean-Pierre Masekanya, [2008], « Stabilité des pentes et saturation partielle, étude expérimentale et modélisation numérique », Thèse doctorat, Université deLiège.
- Kadri MA et Bougdal R (2007) Travaux de reconnaissance du glissement de terrain de Kef Essenoun (Djebel Onk). Rapport d'expertise de l'Agence Nationale de la Ge'ologie et du Contro^le Minier (ANGCM), p 1, 6
- LAVASSEUR, M ; « Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa “glissement de terrain” Exemple d'application au secteur de Ville de La Baie, Québec », Mémoire de maitrise de l'université du Québec INRS.E. T ; 213 pages ; 2003.
- Maciej A., [2012], « Modification des classifications mécaniques pour les massifs rocheux schisteux », Thèse de maitrise des sciences appliquées de l'université de Montréal, spécialité génie minier, 163 pages.

- MAGISTER Typologie géochimique et géostatistique des minerais de phosphates du gisement de Bled El Hadba – Djebel Onk (Algérie Orientale).
- MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique En : Génie Civil Etude de stabilité du flanc Nord Est de la mine de Kef Essnoun Djebel Onk- Tébessa-.
- Mezam MC (2015) Appréciation de la stabilité des bords et réouverture de la mine à ciel ouvert de Kef Essennoun (Djebel Onk) Algérie orientale, Mémoire Magister, ENP, pp 62–65, 68, 84.
- Mohamed Khemissa, [2006], « Méthodes d'analyse de la stabilité et techniques de stabilisation des pentes », Laboratoire de Développement des Géomatériaux, Université de M'sila.
- PHILIPPONAT, G ; « Fondations et ouvrages en terre » ; EditioEyrolles, Paris ; 402 pages ; 1979.
- Prian, G. P. et Cortiel Ph., [1993] - Etude de développement du gisement de phosphate de Djebel Onk (Algérie). Rapport d'expertise géologique, B.R.G.M. France, p. 11-29, 133-149, 169-173, inédit.
- Priest, S.D. "Discontinuity analysis for rock engineering", Chapman & Hall, London, UK. 1993.
- Ranchin G., [1963], "Etude géologique et minière du gisement de Djebel el onk". Rapport SERMI., Paris.
- SAROUT, J ; « Propriétés physiques et anisotropie des roches argileuses : Modélisation Micromécanique et Expériences Triaxiales ». Thèse de doctorat de l'université Paris XI ORSAY ; 241 pages ; 2006.
- Schroeder Ch., [2010], "Etude de stabilité des parois rocheuses", Revue de société Belge de géologie de l'ingénieur et de mécanique des roches (SBGIMR), p. 15-18, 21-29, 34.
- SOUKATCHOFF, V.M ; « Cours de géotechnique » de l'école nationale supérieure des mines de Nancy ; 100pages ; 2007.
- TERZAGHI, k .Stability of steep slopes in hard unweathered rock. Geotechnique, Vol.12,1926, pages 251,270.
- THESE DOCTORAT : Eléments en traces et valorisation des minerais de phosphate du gisement de Kef Essennoun - Dj. Onk (Algérie Orientale).

Bibliographie

- Wyllie, D.C. Mah, C.W. "Rock slope engineering : civil and mining", Spon Press, New York. 2004.
- Zhao J., [2008], "Propriétés des discontinuités", part 3, cours de mécanique des roches, l'école polytechnique fédérale de Lausanne. p. 4-9, 17-22, 28, 41.