



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI - Tébessa -

Faculté des Science Exactes et Sciences de la Nature et de le Vie

Département de sciences de la terre et de l'univers

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences de la terre et de l'univers

Filière : Géologie

Spécialité : Géologie de l'ingénieur et géotechnique

Thème :

**Synthèse bibliographique sur les instabilités dans les mines
(causes, diagnostique et remèdes) cas de la région de Tébessa,
Nord -est algérien.**

Présenté par :

Mohamed Lemine Ahmed Zerough

Devant le jury:

Président	Baali Fethi	Pr.	Université de Tébessa
Rapporteur	Aoun Mounira	M.C.B.	Université de Tébessa
Examineur	Mouici Ridha	M.C.B.	Université de Tébessa

Session :

Sommaire

Sommaire :

Dédicace

Résumé

المُلخَص

Summary

Introduction générale : 1

Chapitre I : Géologie des zones d'étude

I. Introduction : 3

II. Géologie de la mine de Boukhadra : 3

II.1. Situation géographique de Djebel Boukhadra : 3

II.2. L'histoire de la mine de Boukhadra : 4

II.3. Aperçu géologique du gisement de Boukhadra : 4

II.3.1. Stratigraphie et composition lithologique de la zone : 4

II.3.1.1. Le Trias : 5

II.3.1.2. L'Aptien : 5

II.3.1.3. Albien : 6

II.3.2. Description abrégée de la structure du massif de Boukhadra : 7

II.3.2.1. La partie nord-est : l'anticlinal de Boukhadra : 7

II.3.2.2. La partie sud-ouest : la zone effondrée de Bled Dhissa : 8

II.3.2.3. Les bordures limitrophes : 8

III. La mine de djebel Onk (Kef-Essnoun) : 9

III.1. Situation géographique de Djebel Onk : 9

III.2. Historique de l'état de site : 9

III.3. Contexte général du Djebel Onk : 10

III.4. Stratigraphie : 13

III.4.1. Crétacé : 13

III.4.2. Paléocène : 13

III.4.3. Eocène : 14

III.4.4. Miocène : 15

III.4.5. Quaternaire : 15

III.5. Tectonique : 16

III.5.1. Tectonique Paléocène - Eocène (syndé debate) : 17

III.5.2. Tectonique post-Eocène moyen et tardi-Miocène : 17

III.5.3. Tectonique tardi-Miocène, post-Burdigalienne à Pliocène - Pléistocène : 17

IV. Conclusion : 18

Chapitre II : Les types d'instabilités dans les mines

Sommaire

II.1. Introduction :	19
II.2. Position du problème :	19
II.3. Instabilité des massifs rocheux :	21
II.3.1. Généralité :	21
II.3.2. Principales causes des mouvements de terrain :	21
a) Facteurs passifs :	22
b) Facteurs actifs et déclenchant (causes directes) :	23
II.3.3. Facteurs influençant la stabilité des mines à ciel ouvert :	23
II.3.3.1. La hauteur des gradins :	24
II.3.3.2. La nature des terrains :	24
II.3.3.3. L'eau souterraine :	24
II.3.3.4. La méthode et les phases d'exploitation :	24
II.3.4. L'instabilité des massifs rocheux :	24
II.3.4.1. Les mouvements rapides et discontinus :	25
II.3.4.1.1. Les Effondrements :	25
II.3.4.1.2. Les écroulements :	26
II.3.4.1.3. Les coulées :	26
II.3.4.2. Les mouvements lents et continus :	26
II.3.4.3. Les types de glissement de terrain :	28
II.3.4.3.1. Glissement circulaire :	29
II.3.4.3.2. Glissements plans :	29
II.3.4.3.3. Glissement de coin (dièdre) :	29
II.3.4.3.4. Basculement (Toppling) :	29
II.3.4.4. Méthodes de confortement des glissements :	31
II.3.4.4.1. Les terrassements :	31
II.4. Conclusion :	33
Chapitre III : Evaluation de la stabilité dans les mines étudiées	
III.1. Introduction :	34
III.2. Cas de gisement de Boukhadra :	34
III.2.1. Donnée générale de la carrière BK II :	34
III.2.2. Evolution de l'instabilité déclenché dans la mine de Boukhadra :	35
III.2.2.1. Les différentes phases d'effondrement de BKII :	35
a) Phase 1 :	35
b) Phase 2 :	36
c) Phase 3 :	39
III.2.2.2. Diagnostic sur l'état d'instabilité de BKII :	39

Sommaire

III.2.3. Application à la mine de Boukhadra :.....	41
III.2.4. Interprétation des résultats :.....	48
III.3. Cas de la mine de Kef Essnoun :	49
III.3.1. Analyse de stabilité :	49
III.3.1.1. Aperçu du champ de Kef Essnoun :.....	49
III.3.1.2. Caractéristiques géo-minières de Kef Essnoun :.....	49
III.3.1.3. Méthodes et paramètres de la fosse à ciel ouvert :.....	49
III.3.1.4. Paramètres d'exploitation :.....	49
III.3.1.5. Paramètres géomécaniques :.....	50
III.3.2. Aperçu sur les différents glissements dans la mine de Djebel Onk :	52
a) Glissement dans la nouvelle fosse Nord-Ouest (glissement récente) :.....	52
b) Glissement de la fosse Nord-est (ancien glissement) :	54
III.3.3. Analyse de stabilité pour les glissements de Kef-Essnoun :.....	57
III.3.3.1. Paramètres des calculs :	58
III.3.3.2. Partie Nord-ouest de la carrière de Kef Essnoun :	59
III.3.3.3. Partie Nord-est de la carrière de Kef Essnoun :.....	65
III.3.4. Interprétation des résultats :.....	67
III.3.5. Conclusion :	69
Recommandation :	70
Conclusion générale :	71
Bibliographie	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES :

Figure - 1- Localisation de la région de Tébessa avec celle des mines dans la région. .2	
Figure - 2- Esquisse géologique régionale montrant la situation de la zone de Boukhadra [14].3	
Figure -3- Esquisse géologique du Djebel Boukhadra et ses environs [4].5	
Figure - 4- Log stratigraphique du Djebel Boukhadra [14].7	
Figure - 5- Coupe transversale dans l'anticlinal du Boukhadra (D'après [93] modifier par [02]) est localisée sur la figure -3-8	
Figure - 6- Carte de situation géographique de Djebel-Onk [13] 10	
Figure - 7- Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk [18]. 11	
Figure - 8- photo montre la situation morphologique du gisement de Kef Essnoun [18] 12	
Figure - 9- Carte de situation géographique et esquisse géologique des gisements de Djebel Onk [7]. 12	
Figure - 10- Esquisse géologique du secteur de Djebel Onk [19]. 13	
Figure - 11- Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk (Algérie orientale) [17]. 16	
Figure - 12- fosse de la mine de diamant de Nyurbinsky, au Russie [10]. 19	
Figure - 13- Définition d'un talus minier [20]. 20	
Figure - 14- Angle général d'un talus [20]. 20	
Figure - 15- Influence de l'angle général sur le volume (S) de stérile extrait (volume de terrain économisé par tranche unitaire en faisant passer l'angle de 45, à 50 et à 55°) [20]. 21	
Figure - 16- Les différents facteurs d'un glissement de terrain [10]. 22	
Figure - 17- Différents types de mouvement rapide et discontinus. 25	
Figure - 18- Différent type de mouvements lents et continus 27	
Figure - 19- Différents types de glissements. 28	
Figure - 20- Méthodes de stabilisation par terrassement [13]. 32	
Figure - 21- Photo montre l'évolution de glissement de BK II (google earth pro,2024) 36	
Figure - 22- Niveau 1105 au 3ème Etages [24]. 37	
Figure - 23- Photo montre l'évolution de glissement de BK II (google earth pro),2024 37	
Figure - 24- Coupe 08 [24]. 38	
Figure - 25- Coupe 09 [24]. 38	
Figure - 26- Coupe 10 [24]. 39	
Figure - 27- DIP/DIP DIRECTION 42	
Figure - 28- représentation stéréographique des données structurales dans la zone d'effondrement (Zerough M. L., 2024). 42	
Figure - 29- Schéma montrant la zone ou les plans de rupture possibles sont plans (zone rouge) (Zerough M. L., 2024). 44	
Figure - 30- Schéma montrant le lieu des ruptures de coins possibles (Zerough M. L., 2024). 45	
Figure - 31- Schéma montrant le lieu des ruptures possibles par renversement direct (Zerough M. L., 2024). 46	

LISTE DES FIGURES

Figure - 32- : Photo montrant les gradins instables BK2, de la mine de Boukhadra (google earth pro,2024).....	47
Figure - 33- Classification en vue de la réduction des paramètres relatifs à la roche [15].....	51
Figure - 34- photos montrant la zone avant et après le glissement de la nouvelle fosse de Kef-Essnoun (a) : les gradins avant le glissement, (b) : les gradins après le glissement. Google earth Pro (2024).	53
Figure - 35- l'état actuel de la nouvelle fosse nord-ouest de Kef-Essnoun après décapage de la masse glissée (photo du 02/2024).	54
Figure - 36- Photo montrant le glissement affectant la carrière de Kef Essnoun (ancienne fosse Nord-est), (photo du 02/2024).....	55
Figure - 37- Cartographie du glissement de la fosse Nord-est de Kef-Essnoun et mise à jour de la topographie (SOMIPHOS, 2007).....	56
Figure - 38- Coupe géologique (A-A) Nord-Sud de la carrière de Kef-Essnoun (a) Avant le glissement et (b) Après l'ancien glissement de la fosse Nord-est [17].....	57
Figure - 39-Photo satellitaire de l'ancienne fosse Nord-est de Kef-Essnoun avec les remblais (état actuel). Google earth Pro (2024).....	60
Figure - 40- Plan topographique de la carrière de Kef-Essnoun coté Nord-Ouest d'Aout 2022 [16].....	61
Figure - 41- La surface du glissement avant le glissement en 2022 de la nouvelle fosse Nord-Ouest, (Zerough M. L., 2024).	61
Figure - 42- Coupes géologiques de la carrière de Kef Essnoun partie Nord-Ouest après le décapage de la masse glissée en 2022 [16].....	62
Figure - 43- : Modèle géotechnique de la coupe 1-1 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).....	63
Figure - 44- Modèle géotechnique de la coupe 2-2 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).....	63
Figure - 45- Modèle géotechnique de la coupe 3-3 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).....	64
Figure - 46- Modèle géotechnique de la coupe 4-4 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).....	64
Figure - 47- coupe avant glissement (ancienne fosse Nord-est de Kef-Essnoun) [17].	65
Figure - 48- la surface du glissement avant le glissement 2007 (ancienne fosse Nord-est) [17].	66
Figure - 49- Evaluation de la stabilité $F_s=1,026$ (cas d'un glissement non circulaire) (Zerough M. L., 2024).	66
Figure - 50- Evaluation de la stabilité $F_s=1,191$ (cas d'un glissement circulaire) (Zerough M. L., 2024).	67
Figure - 51- Positionnement des trous de mine par rapport aux trous de pré-découpage (Zerough M. L., 2024).	70

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau - 1- Principales classes et types de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés [13].....	30
Tableau - 2- les paramètres du système d'exploitation dans la mine de boukhadra	35
Tableau - 3- Orientation des joints dans la zone d'effondrement de la mine de Boukhadra [14].	41
Tableau - 4- : Tableau récapitulatif des paramètres d'exploitation des paramètres opérationnels. [16].	50
Tableau - 5- Paramètres géotechniques utilisés dans les calculs de stabilité des pentes [15].....	51
Tableau - 6- : Équilibre des pentes basé sur la valeur théorique du facteur de sécurité [19].....	58
Tableau - 7- : les paramètres géotechniques des formations de Kef-Essnoun.....	58

Dédicace

Dédicace :

Je dédie ce travail
A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit.
Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes cotes
toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mon très cher père

Tu as toujours été mes cotes pour me soutenir et m'encourager.
Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A mon très cher frère et mes belles sœurs
A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé et à qui je souhaite plus de succès. Et
particulièrement Sid'El Moustaph Cheikhne Cheikh El Mehdi

Puisse dieu vous donne santé, bonheur, courage, et surtout réussite.

Mohamed Lemine

REMERCIEMENT

REMERCIEMENT :

Mes sincères remerciements s'adressent en particulier et avant tout
au **DIEU** qui m'a
mis sur la bonne voie, et m'a aidé à la réalisation de ce mémoire.

Je voudrai remercier avec tous respect ma Encadrante Docteur
AOUN Mounira pour ses encouragements et ses conseils précieux,
sa patience, ainsi pour le suivi pas à pas de mon travail et surtout
pour son temps précieux qu'elle a accordé à la finalisation de ce
travail.

je voudrai bien remercier les membres de jury : Professeur **Mouici
Ridha** d'avoir accepté examiner ce travail, professeur **Baali Fethi**
d'avoir également accepté présider le jury.

Je n'oublierai pas de présenter mes sincères remerciements pour
tout le personnel du complexe minier de Djebel ONK :
In. Makhlouf Brahim pour son aide et sa patience avec nous et
son temps précieux
qu'il nous a accordé surtout en phase de calcul ;

Tout le personnel pour leur accueil agréable dans les différents
complexes miniers.

Je remercie également tous les responsables de l'entreprise
(**SOMIFER**) de la
mine de BOUKHADRA ainsi de la mine de OUENZA.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du
département de sciences de la terre et de l'Univers.

Résumé

Résumé :

La région de Tébessa est située au Nord-est de l'Algérie, à la frontière tunisienne. Elle est caractérisée par l'exploitation des mines depuis l'époque romaine, car elle est riche en ressources minières comme le fer et le phosphate. Parmi ces mines nous citons : la mine de Djebel Boukhadra, la mine de Djebel Ounza, les mines de Djebel Onk à Bir El-Ater, l'ancienne mine de Djebel ElKouif qui est actuellement abandonnée. L'exploitation minière concerne certains minerais importants tels que le fer et le phosphate.

L'observation importante qu'il convient de souligner est que le facteur important pour la durée de vie et la durabilité et la stabilité de la mine est sa protection contre les problèmes des glissements et effondrements dans le cas d'une extraction à ciel ouvert, ainsi que les problèmes des effondrements et affaissements en cas d'extraction souterraine, en plus d'autres problèmes d'instabilité tels que chutes de pierres, etc.

Au cours du temps et sur différentes périodes, les mines de la région ont connu de nombreux problèmes d'instabilité, dont la plupart étaient des phénomènes de glissements de terrain et d'effondrements. A travers cette étude, nous avons essayé de faire une synthèse sur les problèmes rencontrés, d'en cerner leurs causes et de prédire la stabilité des sites au futur. Nous avons également donné des recommandations qui doivent être prises en considération en fonction de la nature de chaque site, et nous avons également proposé une solution qui peut aider à réduire les problèmes.

Pour cette raison, dans ce travail, nous avons utilisé les logiciels Geoslop et Slide 7.0 pour calculer le facteur de sécurité du site minier de Kef Essnoun à Djebel Onk qui se situe à Bir El Ater, où les résultats ont montré que des glissements plans peuvent se produire dont la surface de glissement se trouve à une profondeur importante, ce qui peut interrompre le travail à nouveau, ainsi que des dégâts dans le matériel et dans la vie humaine.

Nous avons également utilisé un programme de Dip pour l'analyse de mouvement et la projection stéréographique pour la mine de Djebel Boukhadra, où les résultats ont montré la possibilité de glissements plans et de glissements par basculement se produisant avec une probabilité supérieure à 8%, la possibilité de glissement angulaire à une probabilité de 6% mais n'est pas exclue.

Ces résultats, à notre avis, sont d'une grande importance et doivent être pris en compte lors de l'étude d'ouverture de nouvelles carrières ainsi que lors des travaux en cours, à condition que les cas d'instabilité soient suivis sérieusement en utilisant les systèmes de suivi nécessaires.

Mots clés :

Stabilité - Instabilité - Mines - gradins – Analyse de stabilité- causes.

المخلص:

تقع منطقة تبسة في الشمال الشرقي من الجزائر مع الحدود التونسية وتتميز منذ القدم باستغلال المناجم و ذلك منذ العصر الروماني نظرا لأنها غنية بالثروات المنجمية مثل الحديد والفوسفات ومن أبرز المناجم في المنطقة نذكر: منجم بوخضرة، منجم ونزة منجم جبل العنق ببيئر العاتر إضافة إلى المنجم القديم بجبل الكويف ، يستخرج من هذه المناجم بعض المعادن المهمة على غرار الحديد والفوسفات.

لكن الملاحظة المهمة التي يجدر بنا الإشارة إليها هي أن العامل المهم في بقاء المنجم واستدامته هو استقرار المنجم وحمايته من الانزلاقات و الإنهيارات في حالة الإستخراج السطحي و مشاكل الإنهيار و الهبوط في حالة الإستخراج التحت أرضي عن طريق الأنفاق بالإضافة إلى مشاكل عدم الاستقرار الأخرى كتساقط الحجارة إلخ.

شهدت هذه المناجم في المنطقة وخلال فترات مختلفة الكثير من مشاكل عدم الاستقرار كانت اغلبها عبارة عن ظاهرة الإنزلاق الأرضي و الإنهيار حيث أدت إلى توقف الأعمال لفترات معتبرة. من خلال هذه الدراسة حاولنا إنجاز حوصلة لأبرز هذه المشاكل وتحديد أسبابها كما حاولنا توقع حالة الإستقرار مستقبلا، قمنا كذلك بإعطاء التوصيات التي يجب العمل بها حسب طبيعة كل موقع وكذلك قدمنا إقتراحا لبعض الحلول التي قد تساعد في الحد من هذه المشاكل.

من أجل ذلك، قمنا في هذا العمل باستخدام برنامجي Geoslop و Slide7.0 و ذلك لحساب معامل الأمان بالنسبة لموقع منجم كاف السنون بجبل العنق ببيئر العاتر حيث أظهرت النتائج أنه يمكن حدوث إنزلاقات مستوية أين يتمركز سطح الإنزلاق على عمق معتبر مما قد يسبب عرقلة العمل مجددا و كذلك قد يؤدي إلى خسائر مادية و بشرية.

كما قمنا باستعمال برنامج من Dip أجل التحليل الحركي و الإسقاط المجسم بالنسبة لمنجم جبل بوخضرة، حيث بينت النتائج احتمال حدوث إنزلاقات مستوية و إنزلاقات إنقلابية بنسبة تفوق 8% كما أن احتمال حدوث الإنزلاق الزاوي غير مستبعد و لكن بنسبة أقل.

هذه التوقعات حسب رأينا، لها أهمية كبيرة و يجب أخذها بعين الإعتبار أثناء الدراسة لفتح مقال جديدة و أيضا أثناء الأعمال الحالية بشرط المتابعة الجدية لحالات عدم الإستقرار و ذلك باستعمال الأنظمة اللازمة للمتابعة.

كلمات مفتاحية:

الإستقرار- عدم الإستقرار- المناجم - الإنزلاقات- المدرجات- تحليل الإستقرار- الأسباب

Summary

Summary:

The region of Tébessa is located in the northeast of Algeria, on the Tunisian border. It has been characterized by mining since Roman times, as it is rich in mineral resources such as iron and phosphate. Among these mines we cite: the Djebel Boukhadra mine, the Djebel Ounza mine, the Djebel Onk mines in Bir El-Ater, the old Djebel ElKouif mine which is currently abandoned. Mining involves important minerals such as iron and phosphate.

The important observation that should be highlighted is that the important factor for the durability and stability of the mine is its protection against the problems of landslides and collapses in the case of opencast mining, as well as the problems of collapses and subsidence in case of underground extraction, in addition to other instability problems such as rock falls, etc.

Over time and over different periods, mines in the region were exposed to several instability problems, most of which were landslides and collapses. Through this study, we tried to summarize the problems encountered, to identify their factors and to predict the stability of the sites in the future. We have also given recommendations that must be taken into consideration depending on the nature of each site, and we have also proposed a solution that can help reduce the problems.

For this reason, in this work, we used the Geoslop and Slide 7.0 software to calculate the safety factor of the Kef Essnoun in Djebel Onk mining site which is located in Bir El Ater, where the results showed that plane slides can occur where the sliding surface is at a significant depth, which can interrupt work again, as well as damage to equipment and human life.

We also used a Dip program for motion analysis and stereographic projection for the Djebel Boukhadra mine, where the results showed the possibility of plane slides and toppling slides occurring with a probability greater than 8%, the possibility of wedge sliding has a probability of 6% but is not excluded.

These results, in our opinion, are of great importance and must be taken into account when studying the opening of mining pits as well as during ongoing work, provided that cases of instability are seriously monitored in using the necessary tracking systems.

Keywords:

Stability - Instability - Mines - bleachers - Stability analysis - factors.

Introduction générale

Introduction générale :

Tébessa, une ville frontalière avec la Tunisie, elle se trouve à l'extrême nord-est de l'Algérie (Figure -1-), cette région est connue par la richesse en matière minérale (fer, phosphate, ...). Plusieurs mines localisées dans plusieurs zones de la région (gisement de Djebel Boukhadra, gisement de Djebel Ouenza, les gisements Bir El Ater) sont actuellement en état d'exploitation, d'autres sont abandonnées tel que la mine d'El Kouif et certaines zones sont récemment étudiées pour l'ouverture de mine tel que le gisement potentiel de Bled El Hadba qui se situe à environ 14 Km au sud-est de Bir El Ater. Les méthodes d'exploitation dans les différentes mines de la région varient en fonction de la situation du minerai par rapport à la surface, on trouve donc l'exploitation à ciel ouvert pour les minerais proches de la surface et souterraine pour ceux en profondeur.

Dans les régions minières l'une des principales questions qui doit être résolu lors de l'exploitation est la stabilité des bords des gradins pour les mines à ciel ouvert ainsi que la stabilité des parois et des toits des galeries pour les mines souterraines. La stabilité des gradins et des galeries dans les mines à une influence directe sur la sécurité du personnel, des équipements ainsi que sur l'économie et le rendement du projet minier des gisements. Elle peut donc engendrer beaucoup de problèmes sur les deux plans liés étroitement lié l'un à l'autre : le plan technique et le plan économique ce qui conduire à l'arrêt complet des travaux de l'exploitation et par conséquent la perturbation du cycle habituel de l'exploitation.

Quant à la région de Tébessa, les problèmes d'instabilité sont rencontrés beaucoup plus dans les gradins pour l'exploitation à ciel ouvert que dans les galeries. Il est évident, que la bonne conception des gradins pour l'exploitation à ciel ouvert joue un rôle très important dans la garantie de la stabilité. La déstabilisation menace généralement les bords très inclinés, où on rencontre fréquemment les risques des glissements, des éboulements, etc...,

Pour cette raison, il est conseillé de garder une marge de sécurité pour l'inclinaison des bords du gradin, l'angle d'inclinaison est généralement inférieur à l'angle critique des talus. Le choix des angles des talus pour l'exploitation des mines à ciel ouvert est très recommandé. Cependant, ce choix est lié principalement aux facteurs géologiques et géotechniques du massif contenant le gisement : la lithologie, la tectoniques (existence des failles, taux fracturation du massif) direction des différents plans de discontinuité (stratigraphie, faille, fracturation, etc.), les propriétés géotechniques (physiques et mécaniques) des roches, les conditions hydrologiques et hydrogéologiques. Il est intéressant de noter que même le degré d'altération du massif joue un rôle important dans le choix des angles des talus, vu son influence sur les caractéristiques physique est mécaniques des formations surtout pour la prévision de stabilité à long terme.

Dans le cadre de cette étude, une synthèse sur les problèmes des instabilités dans les mines dans la région de Tébessa a été établie. Après avoir visité les différents gisements dans la wilaya de Tébessa, et selon les données disponibles pour chaque cas dans les différentes mines, cette synthèse s'appuie sur les causes, le diagnostic et les remèdes. Des raisonnements à travers certains calculs de stabilité et de projections stéréographiques vont nous permettre de définir les types des instabilités rencontrés pour certains cas. A noter que seul l'étude concerne seulement les deux mines de Djebel

Introduction générale

Boukhadra et Djebel Onk par contre la mine la mine de Djebel Ouenza vu le manque de donne on ne l'a pas pris en considération dans cette étude.

Pour achever ce travail, nous avons structuré le travail comme suit :

- Un premier chapitre comprenant un aperçu général donnant la situation du géographique du gisement ainsi que les conditions géologiques régionale de chaque zone de gisement.
- Un deuxième chapitre dans lequel un résumé pour les différents types des instabilités qui peuvent être rencontré dans les mines à ciel ouvert, en se basant sur les concepts théoriques, les conditions nécessaires pour la conception et la stabilité des gradins sont aussi présentés.
- Un troisième chapitre comprenant un diagnostic qui nous a permis de cerner les causes responsables pour chaque cas d'instabilité dans les différentes mines. A partir d'une analyse et calcule de stabilité conforme à chaque cas, nous sommes arrivés à définir le type de glissement dans chaque cas. Certains remèdes sont ainsi proposés.

En fin une conclusion générale résumant l'essentiel de notre travail est présentée.

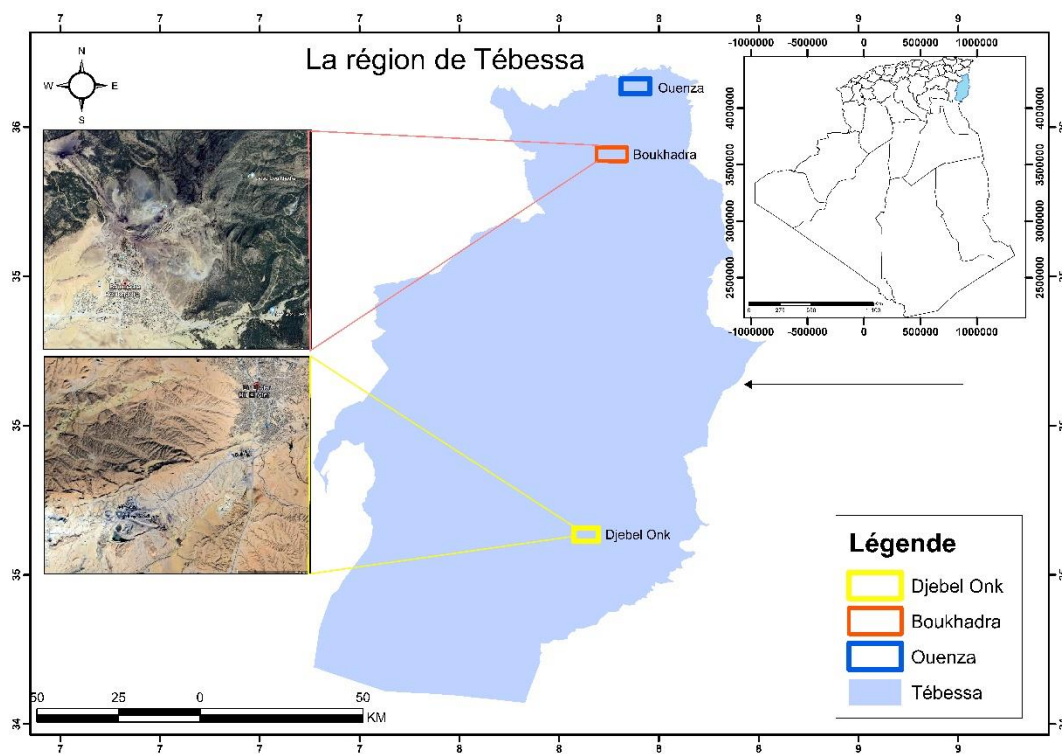


Figure - 1- Localisation de la région de Tébessa avec celle des mines dans la région.

Chapitre I : Géologie des zones d'étude

I. Introduction :

Les ressources minérales et leur exploitation occupe un domaine très intéressant pour l'économie et le développement des pays. La conception minière soit par gradins à ciel ouvert soit par galerie souterraines ne peut être entamée sauf après avoir connaître la géologie de la région, car un gisement fait partie intégrante de cette géologie. La stabilité des mines est également liée étroitement à la nature géologique du gisement et de son environnement, ainsi les conditions de conception et de dimensionnement sont basées sur les caractéristiques géologiques, géotechniques hydrogéologiques et même hydrologiques de chaque formation géologique du massif contenant le minerais. De ce fait une présentation de la géologie des zones étudiées est indispensable.

II. Géologie de la mine de Boukhadra :

II.1. Situation géographique de Djebel Boukhadra :

Le djebel de Boukhadra se trouve à l'est de l'Algérie, à une distance de 45 km au nord de Tébessa, le chef-lieu de la wilaya. Il est également situé à 47 km de la mine de l'Ouenza, à 13 km de la frontière entre l'Algérie et la Tunisie, et à 190 km au sud du complexe sidérurgique d'El Hadjar, dans la wilaya d'Annaba. Ce massif isolé s'élève au-dessus de la vallée de Morsott (Figure -2-), avec une altitude variante entre 700 et 800 mètres, son point culminant atteignant 1463 mètres. Les coordonnées du gisement se situent entre les méridiens 8°01' et 8°04' Est, et les parallèles 35°40' et 35°50' Nord.

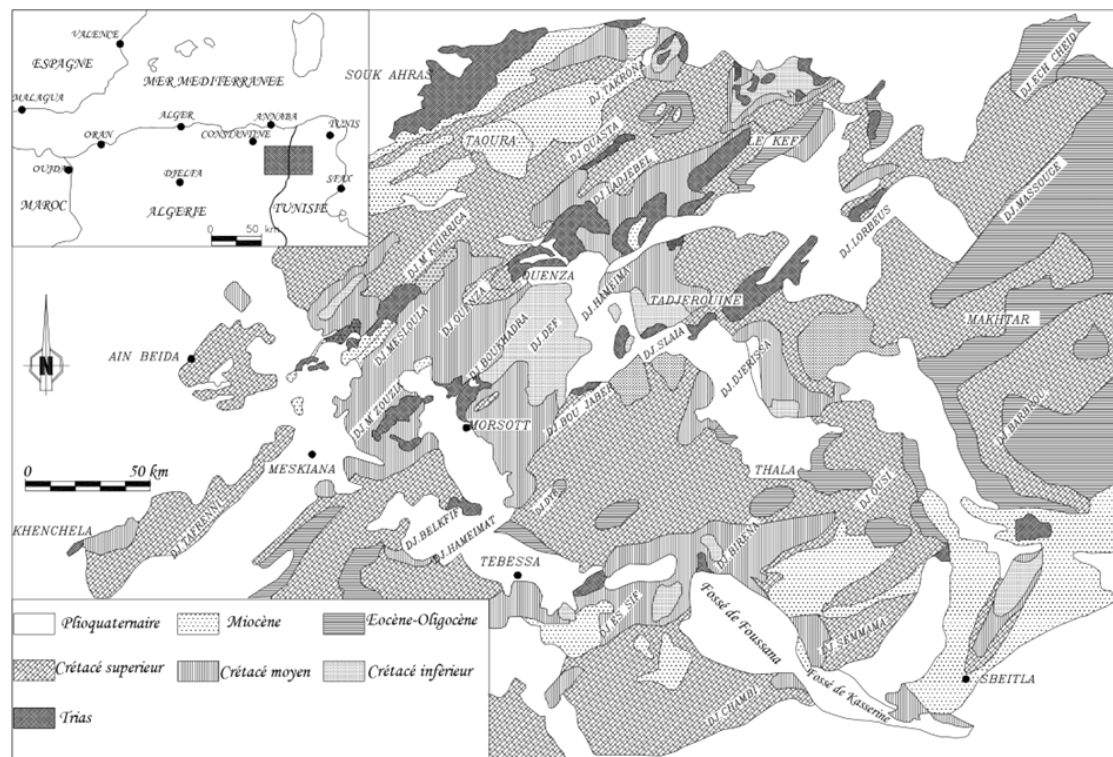


Figure - 2- Esquisse géologique régionale montrant la situation de la zone de Boukhadra [14].

II.2. L'historique de la mine de Boukhadra :

La mine de Boukhadra a été découverte à l'époque romaine, les romains sont les premiers exploitants de la zone Est de pic de Boukhadra. De l'époque romaine jusqu'en 1896, nous ne possédons aucunes données. Il semblerait cependant que les habitants de la région aient continué l'exploitation des galeries romaines sur une courte période.

En 1896 un permis de recherche a été délivré à un groupe d'exploitants privés Mrs Tarce Duriaux et Reselar pour le zinc et les métaux complexes. Puis en 1901, Mr Todros obtient la concession de Boukhadra pour le zinc et les métaux. De 1903 à 1929 la société Mokda El-Hadid rachète la concession en entreprend des recherches à l'extrémité Nord de l'affleurement. En suite seaux de galeries entre les niveaux 1225 et 845 m le principal réseau fut Le niveau 926 m.

Parallèlement à cette époque le géologue Français DUBORDIEU ferait des levés géologiques

dont les travaux publiés révèlent d'une étude géologique a été réalisée et fait ressortir la particularité de cette région et il décrit sa stratigraphie.

Après la nationalisations du secteur minier en 1965 les recherches sont poursuivies et même développées à travers tous les territoires par le bureau Algérien des recherches et exploitation minières.

En outre à partir des années 80 le complexe minier de Boukhadra se retrouvait de nouveau sous la tutelle de Société Nationale FERPHOS par réalisation des sondages de 180m dans les niveaux 1285, 1255 et 1225 [14].

Depuis la date du 18/10/2001, et dans le cadre de partenariat avec l'étranger, le holding L.N.M.N.V. a signé l'accord de partenariat avec HADID OUEZZA - BOUKHADRA filiale FERPHOS avec 70% pour la première.

II.3. Aperçu géologique du gisement de Boukhadra :

La région autochtone de l'Atlas Saharien présente des formations carbonatées datant de l'Albo-Aptien, principalement affectées à l'est par des phénomènes diapiriques. Ces phénomènes non seulement juxtaposent discordamment ces carbonates avec les formations triasiques (marnes, argiles, gypses), mais ils induisent également des plissements et des fractures dans ces carbonates, exhibant des orientations plus ou moins organisées.

II.3.1. Stratigraphie et composition lithologique de la zone :

Le massif de Boukhadra est principalement constitué de couches albo-aptiennes en contact tectonique avec le Trias (figure -3-). L'activité diapirique a débuté au moins à l'Aptien, influençant l'évolution tectono-sédimentaire des massifs de la région. Cela s'est traduit par le dépôt et le développement d'une sédimentation essentiellement carbonatée, localisée au sommet des diapirs [3]. La carte géologique de Djebel Boukhadra (figure -3-) ainsi que le Log stratigraphique (figure -4-) montrent la succession des différentes couches dans la région.

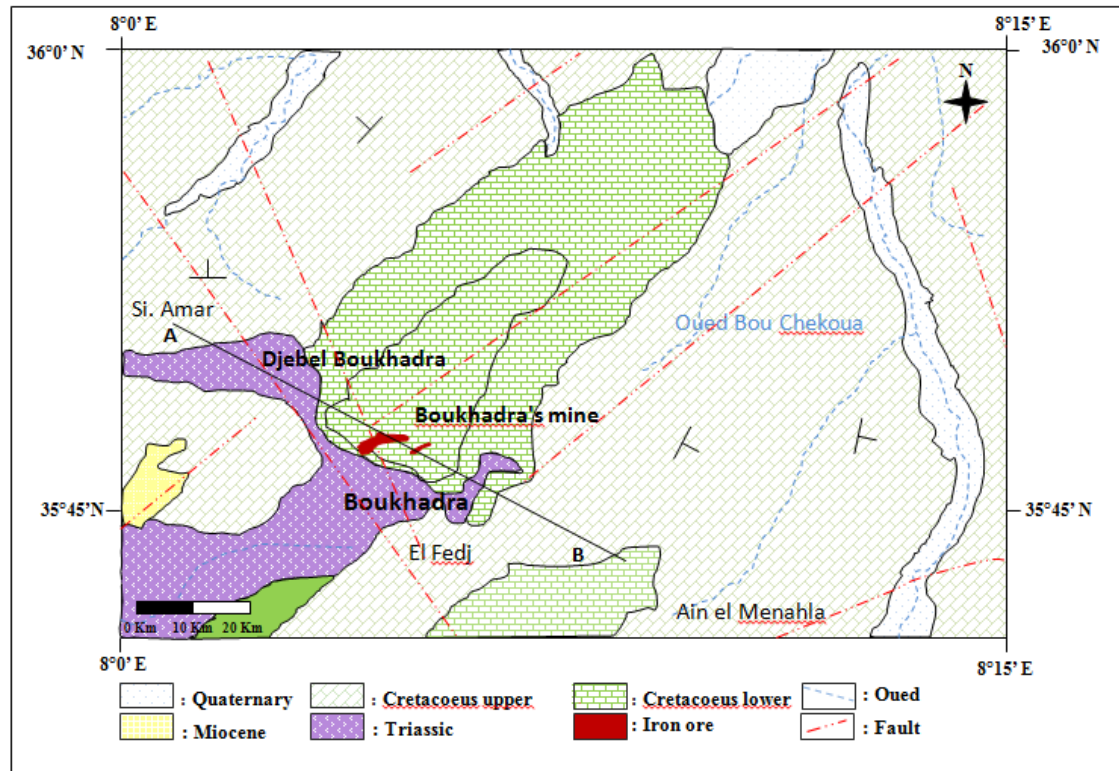


Figure -3- Esquisse géologique du Djebel Boukhadra et ses environs [4].

II.3.1.1. Le Trias :

Les formations du Trias sont visibles dans la partie Sud-Ouest de l'anticlinal de Boukhadra, se présentant sous la forme d'affleurements étendus, parfois recouverts par des sédiments plus récents. Ces dépôts comprennent principalement des marnes bariolées contenant du gypse, des dolomies, des débris calcaires et des grès. Les marnes bariolées, accompagnées de divers types de roches telles que les dolomies, les cargneules et les grès micassés, constituent généralement la majeure partie des formations diapiriques. Le gypse est fréquemment abondant, et l'épaisseur des dépôts triasiques dépasse souvent les 50 mètres [14].

II.3.1.2. L'Aptien :

Les sédiments les plus anciens datent de l'Aptien, qui se divise en deux types lithologiques distincts : le faciès carbonaté (calcaire) et le faciès terrigène (marnogreso-calcaireux). Le Clansayésien est caractérisé par une série de marnes grises et grises-jaunes avec de fines couches intercalaires de calcaires gréseux. Ces marnes contiennent parfois des grès finement à très finement grenus, avec une couche de calcaire sublithographique à Ammonite, pour une épaisseur de série d'environ 90 mètres. L'examen en lame mince révèle un ciment carbonaté composé de grains de quartz xénomorphes, parfois presque joints. Les grès sont parfois minéralisés en oxydes de fer et contiennent des inclusions d'anhydrite, témoins d'un remaniement du Trias [14].

Remarque :

Par cette remarque, on attire l'attention que le minerai de fer du gisement de Djebel Boukhadra appartient au crétacé inférieur, il se localise dans les couches de l'âge Aptien dont les formations sont décrites ci-dessus. Selon la figure -4- une bonne partie du minerai a été dégagé auprès de la surface pendant les phases tectoniques et en plus des phénomènes d'érosion. Evidemment cette situation facilite le choix de l'exploitation à ciel ouvert. Les filons qui sont en profondeur ont nécessité l'exploitation souterraine.

II.3.1.3. Albien :

Les dépôts de l'Albien présentent une grande variété lithologique et peuvent être subdivisés en trois horizons : inférieur, moyen et supérieur.

- Les dépôts inférieurs se composent de marnes jaunes et gris-jaunes avec des interlits de calcaire gréseux et argileux, caractérisés par une abondante présence d'ammonites, pour une épaisseur d'environ 150 mètres,
- Les dépôts de l'Albien moyen sont constitués de marnes gris-noirs avec des intercalations de calcaire et de calcaire argileux, pour une épaisseur d'environ 130 mètres,
- Les dépôts de l'Albien supérieur se composent de marnes grises ou gris-noires avec des interlits de calcaires argileux noirs, pour une épaisseur d'environ 200 mètres,[14]

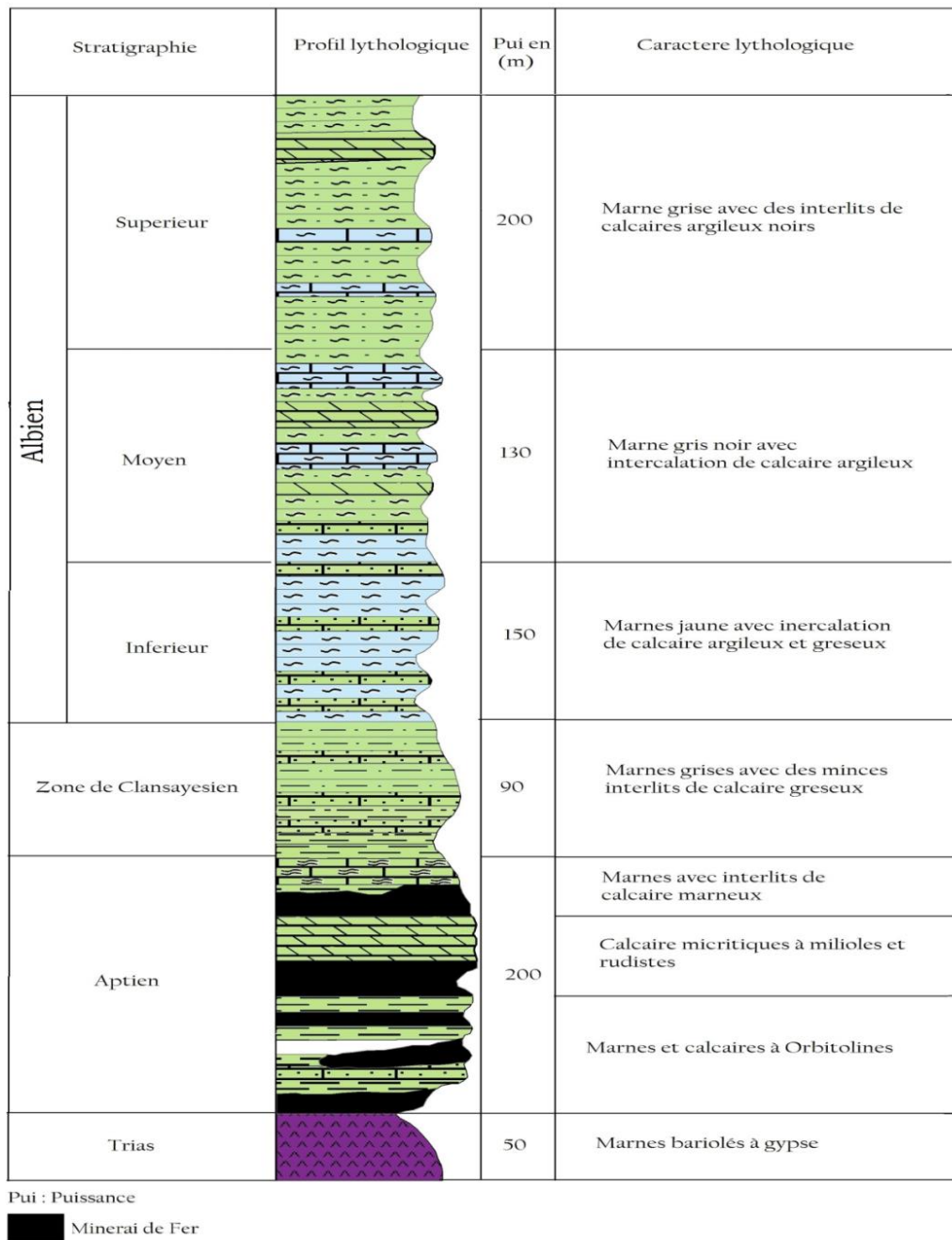


Figure - 4- Log stratigraphique du Djebel Boukhadra [14].

II.3.2. Description abrégée de la structure du massif de Boukhadra :

La structure du massif de Boukhadra peut être divisée en trois éléments distincts : la partie nord-est (un anticlinal en forme de demi-ellipse), la zone effondrée de Bled Dhissa, et les bordures des évaporites triasiques.

II.3.2.1. La partie nord-est : l'anticlinal de Boukhadra :

L'anticlinal de Boukhadra s'étend sur environ 7 à 8 km du sud-ouest au nord-est, avec une largeur variante entre 3 et 5 km. Il est caractéristique de l'Atlas saharien oriental, avec son noyau formé par les niveaux calcaires compétents du Crétacé. Il est relié au

sud-est par la structure synclinale de l'Haoud es Srhir. Cette formation résulte des compressions néogènes qui ont façonné cette région en une succession d'anticlinaux et de synclinaux, souvent traversés par des évaporites triasiques. (Figure -3-)

II.3.2.2. La partie sud-ouest : la zone effondrée de Bled Dhissa :

La région limitée au nord-est par le Djebel Boukhadra et au sud-est par l'Haoud est Srhir constitue un bassin effondré qui se connecte au fossé de Tebessa-Morsott. L'affaissement de Dhissa est confirmé par les calcaires turoniens du Koudiat el Hamra qui affleurent en dessous de l'Aptien de Boukhadra. Le Bled ed Dhissa s'étend entre le Koudiat el Hamra au nord et la route de Morsott au sud-est, principalement couvert de limons mais avec des affleurements de calcaires albo-aptiens au sud et des formations triasiques (calcaires dolomitiques, grès) plus au nord. (Figure -3- et -4-).

II.3.2.3. Les bordures limitrophes :

Il s'agit des affleurements crétacés qui bordent les évaporites triasiques, situés au sud-ouest de l'anticlinal de Boukhadra. (Figure -3- et figure -5-).

A- Les affleurements de la bordure ouest (zone de la gare) : Une crête orientée nord-ouest à sud-est, où les calcaires albo-aptiens se dressent verticalement ou plongent fortement vers le sud-ouest, sur environ 1700 mètres de long. Ces calcaires aptiens changent brusquement de direction pour s'aligner de l'est-nord-est à l'ouest-sud-ouest.

B- Les affleurements de la bordure est (Oum es Sba) : Une crête orientée nord-est à sud-ouest, formée par des calcaires albo-aptiens dressés verticalement et s'étendant sur environ 1500 mètres, séparés par des horizons tendres revêtus d'éboulis [14].

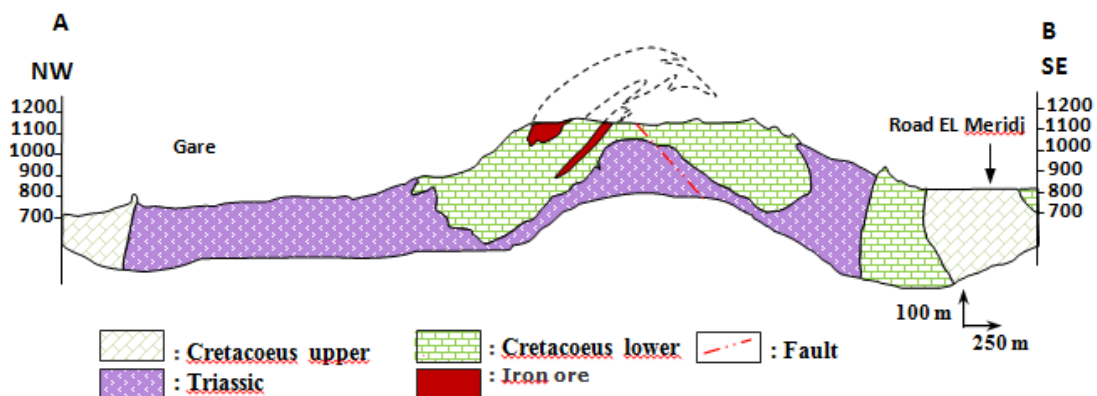


Figure - 5- Coupe transversale dans l'anticlinal du Boukhadra (D'après [93] modifier par [02]) est localisée sur la figure -3-

III. La mine de djebel Onk (Kef-Essnoun) :

III.1. Situation géographique de Djebel Onk :

Les phosphates des gisements de la région de Djebel Onk dans la Wilaya de Tébessa font partie très intéressante des ressources minérales en Algérie, ces gisements se situent dans la région de Bir El Ater (Nord-Est Algérien) (Figure-6-). Les ressources prouvées de ce gisement sont estimées à plus de 2 milliards de tonnes de phosphate [13]. Ils sont exploités par la Société Minière des Phosphates (SO.MI. PHOS). Dans ce qui suit, nous donnons un aperçu général sur le gisement de Djebel Onk : Historique, situation, subdivision, géologie, tectonique...etc. A la fin de ce chapitre, nos idées sont accentuées sur le gisement de Kef Essnoun, car il fait l'un des objets de notre travail.

III.2. Historique de l'état de site :

Les phosphates Algériens ont été découverts à BOUGHARI par PH. THOMAS en 1873. Dans la période de 1907/1908, L. JOLEAU a découvert le gisement de Djebel Onk, des informations plus complètes ont été présentées par D. DUSSERT, mais surtout FLANDRIN en 1948 qui contribua à l'apport des nouvelles plus détaillées Ce n'est qu'en 1931 que ces phosphates font l'objet d'une première concession par la compagnie des phosphates de CONSTANTINE qui était le principal producteur en Algérie suite à laquelle fût créer la société S.D.O (Société de Djebel Onk) en 1936. De 1961 à 1963, des essais de prospection radio métrique aéroportée sont effectués au-dessus du gisement de Djebel Onk. En 1963, les études géologiques et minières précédentes de l'exploitation du gisement de Djemi Djema, sont réalisées par la société SERMI (Société des Etudes des Recherches Minière), pour la société de Djebel Onk, G. RANCHIN en 1963 a rédigé un rapport, et ceci parallèlement de la société française SOFREMINES (bureau d'études français) (1962) qui avait aussi rédigé un avant – projet d'exploitation du gisement de Kef Essnoun. En Mois de Février 1965 débute l'exploitation de Djemi Djema. Durant la période 1971/1974, les travaux de recherche et de prospection sur les phosphates dans l'Est de l'Algérie qui ont été relancé par la SONAREM (Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minières), sont suivis par une compagne de prospection et d'évaluation du district minier de Djebel Onk, afin de mettre en évidence des réserves complémentaires et de mieux caractériser les gisements connus. De 1985 à 1987, l'EN FERPHOS (Entreprise nationale du fer et du phosphate) a confié à l'EREM (Entreprise de Recherche set d'Exploitation Minières) des travaux de recherche et d'évaluation des ressources en phosphate de tous les gisements potentiels de la région du Djebel -Onk, notamment le gisement de Kef Essnoun a été reconnu en détail par l'EREM au cours de l'année 1986, grâce à 32 sondages carottés notés S-2 à S-46 réalisés à la maille de 250 x 300 met 22 tranchées réalisées dans les flancs de Kef Essnoun, notées Tr 22 à Tr 44. En Novembre 1989, l'EN FERPHOS fait connaître son cahier des charges pour des études de développement du complexe minier de Djebel Onk en Avril 1992, la signature du contrat a eu lieu entre l'EN FERPHOS et le consultant BRGM (Bureau des Recherches Géologiques et Minières) et 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, le BRGM a fourni un rapport d'expertise géologique de tous les gisements de Djebel Onk [5].

En 1999, l'ORGM (Office de recherches géologiques et minières (l'ancien BRGM), a fourni un rapport d'exploration de la partie Nord du gisement de Bled El Hadba et un rapport de recherche géologique complémentaire du même gisement en 2015. Par la suite, en 2016/2017, un bureau d'étude allemand nommé (DMT) a réalisé une étude pluriannuelle des gisements de Djebel Onk Sud et Bled El Hadba [5].

III.3. Contexte général du Djebel Onk :

Le Djebel Onk se trouve dans le nord-est de l'Algérie, à l'extrémité orientale des monts de Nememcha, qui constituent les derniers contreforts de l'Atlas Saharien. Il marque la frontière naturelle entre les hauts plateaux constantinois et la région saharienne. Les terres sont semi-désertiques, avec une population peu nombreuse.[5]

Du point de vue administratif, la région relève de la wilaya de Tébessa, située environ à 100 km au sud et à 20 km de la frontière algéro-tunisienne, reliée à Bir El Ater (Daïra) par la route nationale RN 16.

Sur le plan topographique et géomorphologique, le massif du Djebel Onk est constitué principalement de calcaire s'étendant sur 20 km de longueur, avec un sommet culminant à 1198 mètres (Djebel Tarfaya), et des altitudes les plus basses aux environs de 635 mètres au pied du Djebel Onk. La région est traversée par de nombreuses vallées d'oueds qui prennent leur source sur le flanc nord du secteur et convergent plus au sud. En général, ces oueds sont à sec, à l'exception des périodes hivernales. Le secteur d'étude délimité dans la figure 1 est encadré par les coordonnées Lambert suivantes : X= 981,500 à 984,500 et Y= 165,000 à 170,000 [5].

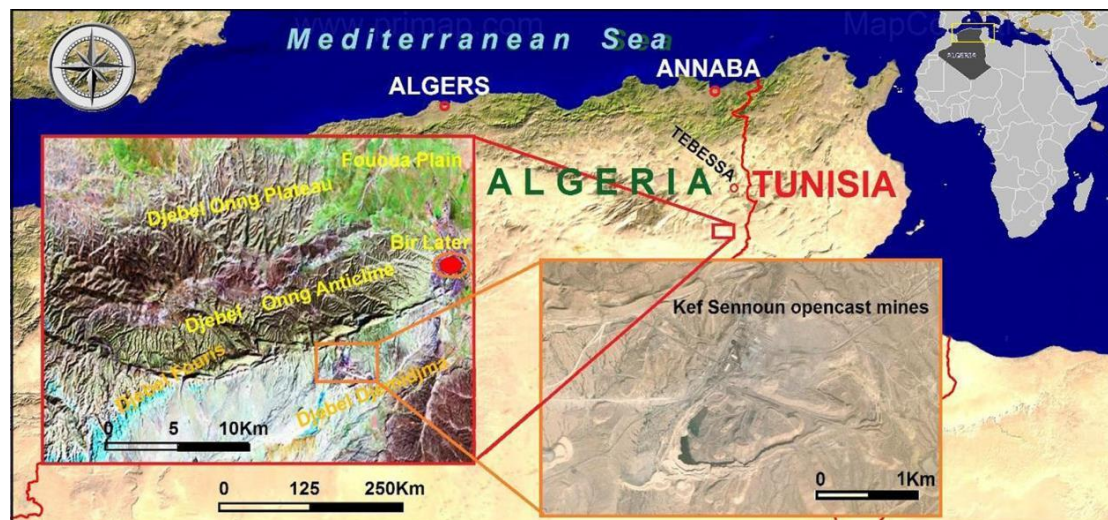


Figure - 6- Carte de situation géographique de Djebel-Onk [13]

Le bassin de Djebel Onk se trouve dans une région caractérisée par des climats sub-désertiques, marqués par deux saisons bien distinctes : un hiver froid et rigoureux, et un été chaud où les températures peuvent dépasser les 45 degrés Celsius. Les précipitations sont très faibles et le réseau hydrographique est rarement sollicité. Cependant, les averses d'orage, souvent violentes, qui dévalent les vallées descendant du Djebel Onk, constituent un problème majeur. Ces pluies torrentielles occasionnelles peuvent entraîner des inondations et altérer le cours de certains ravins [6].

Les vents de sable sont fréquents pendant la saison sèche. La densité de population dans la région est faible. L'installation du complexe minier de phosphates à Bir El-Ater a contribué à l'amélioration de la situation économique locale, favorisant l'expansion et le développement de la ville [6].

Sur le plan minier, la région de Djebel Onk est divisée en cinq secteurs distincts (figure-7- et figure -9-) :

- 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 (au nord du centre minier de Djemi Djema)
- Gisement d'Oued Betita (sud-est du centre minier de Djemi Djema)
- Gisement de Bled El Hadba (sud-est du Djebel Onk).

Le gisement de Kef Essnoun, qui est au centre de notre étude, est situé sur le flanc sud du Djebel Onk, à environ 9 km au sud-ouest de la ville de Bir El Ater. La photo présentée dans la figure -8- illustre la morphologie du gisement de Kef Essnoun [18].

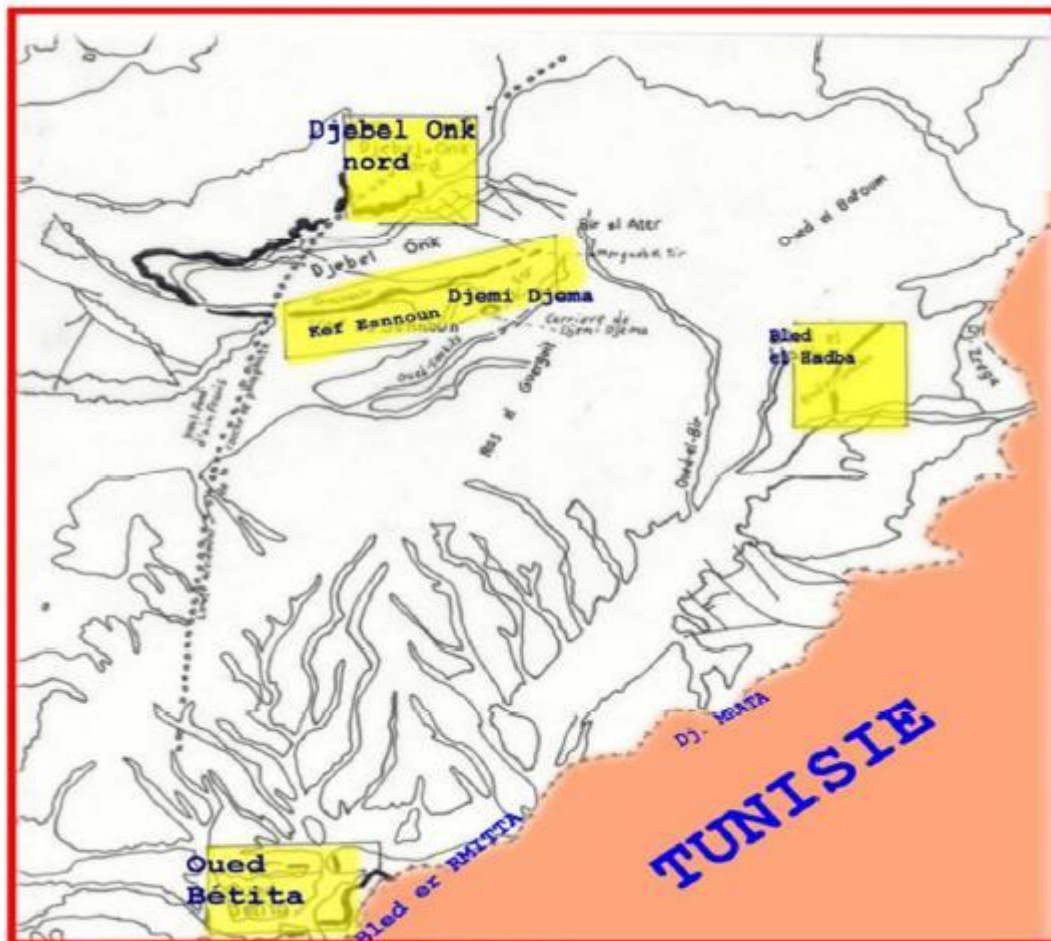


Figure - 7- Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk [18].

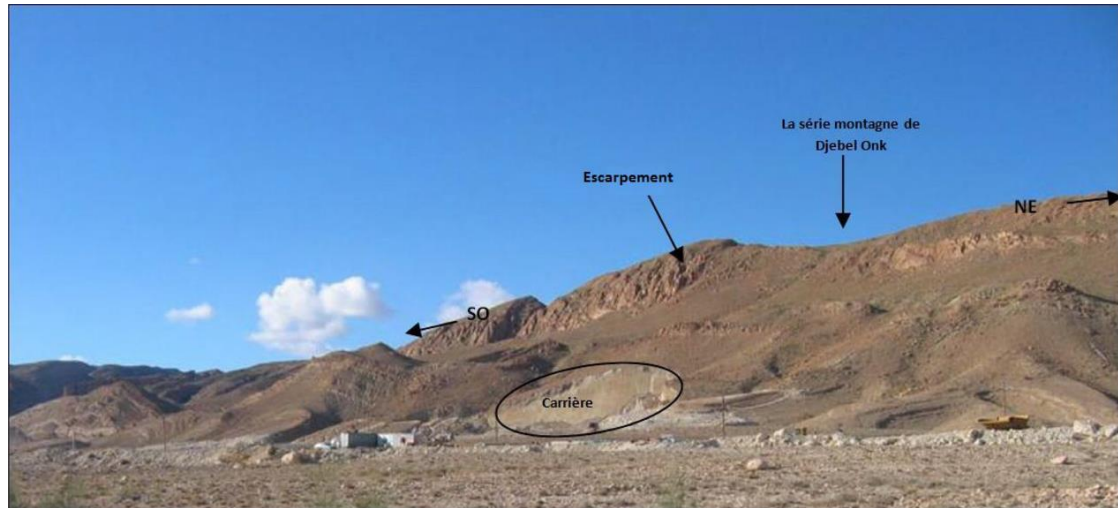


Figure - 8- photo montre la situation morphologique du gisement de Kef Essnoun [18]

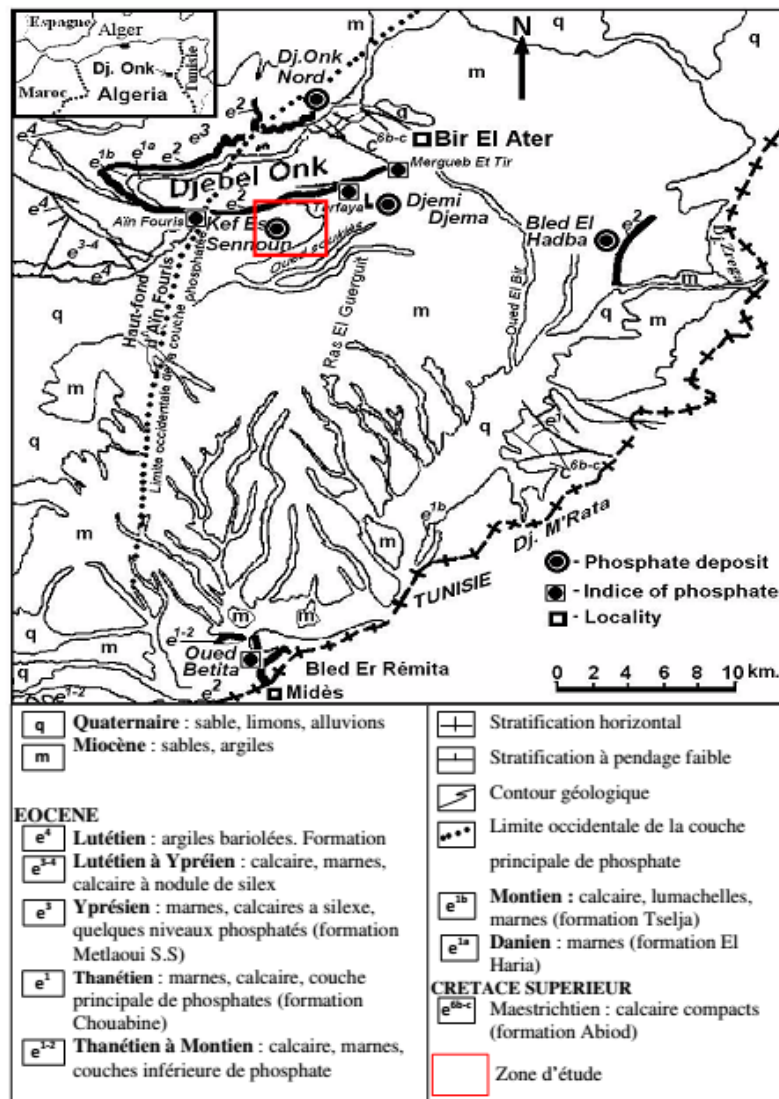


Figure - 9- Carte de situation géographique et esquisse géologique des gisements de Djebel Onk [7].

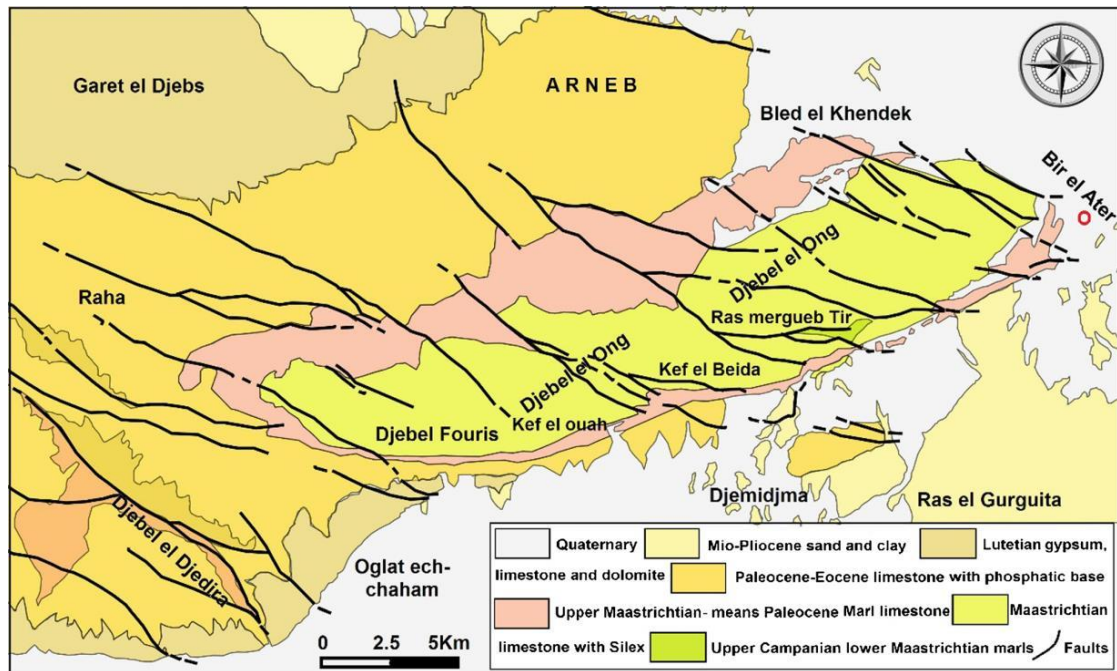


Figure - 10- Esquisse géologique du secteur de Djebel Onk [19].

III.4. Stratigraphie :

Les recherches ultérieures [19] ont établi que la stratigraphie de la zone d'étude est structurée comme suit (voir figure -10- et figure -11-) :

III.4.1. Crétacé :

Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal du Djebel Onk. Du point de vue tectonique, ces formations sont très accidentées. Seuls les dépôts du Maastrichtien y affleurent [7].

- Maastrichtien :

Les sédiments du Maastrichtien sont représentés par des calcaires blancs massifs avec des intercalations marneuses au cœur de l'anticlinal de Djebel Onk. Le sommet est marqué par une surface ferrugineuse et forée [7].

III.4.2. Paléocène :

Cette période est caractérisée par des dépôts marins relativement épais (350 mètres).

- Danien :

Le Danien est subdivisé lithologiquement en deux sous-étages : inférieur et supérieur. Le premier est composé d'argiles marneuses d'apparence schisteuse, de couleur variant du gris foncé au brun vert, entrecoupées de marnes dures et irrégulières. Des filons de gypse traversent cet ensemble. Son épaisseur est de 30 à 40 mètres. Le second est constitué de calcaires blancs très durs, souvent avec des fractures conchoïdales,

alternant avec des marnes argileuses et schisteuses. Son épaisseur varie de quelques centimètres à un mètre.

- Montien :

Cette période est caractérisée par des calcaires détritiques à lumachelles avec des intercalations de marnes et de dolomie, ainsi qu'une faible quantité de silex. On y trouve de nombreux niveaux d'huîtres de différentes couleurs, avec une épaisseur moyenne d'environ 100 mètres.

- Thanétien :

Cette période est particulièrement importante car elle renferme la principale minéralisation phosphatée. Elle est divisée en deux sous-étages.

Thanétien inférieur : Il est composé de marnes gris foncé à noires schisteuses, avec la présence de conglomérats à la base et de minces couches phosphatées, ainsi que deux niveaux de marnes à faune. À la partie supérieure, on trouve des intercalations phosphatées pouvant atteindre 2 mètres, surmontées de calcaires et de marnes contenant de gros gastéropodes. Son épaisseur varie de 30 à 40 mètres.

Thanétien supérieur : Cette couche est exploitée dans les gisements de Djebel Onk. Elle commence par une couche dolomitique à gastéropodes, suivie d'une couche phosphatée d'une épaisseur moyenne de 30 mètres. Cette couche présente des variations d'épaisseur d'un gisement à l'autre dans le bassin de Djebel Onk, par exemple dans la zone de Djemi-Djema où elle atteint environ 30 mètres d'épaisseur, située entre des 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 (maximum de 17 mètres) et diminue progressivement vers l'ouest, jusqu'à disparaître complètement (biseau stratigraphique) [19].

III.4.3. Eocène :

Cette période se divise comme suit :

- Yprésien :

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et a une épaisseur de 32 mètres. À la base (Yprésien inférieur), on trouve des dolomies et des calcaires dolomitiques avec des intercalations de phosphates très dolomitiques, ainsi que de nombreux débris de silex noirs. L'Yprésien supérieur est constitué d'une alternance de calcaires, de calcaires dolomitiques et de marnes.

- Lutétien :

Cette période recouvre les séries Yprésiennes de manière concordante. Elle est répandue dans la région de Djebel-Onk (épaisseur de 270 mètres). On y distingue, de bas en haut :

Le Lutétien inférieur caractérisé par une diminution significative des calcaires, remplacés par des marnes blanches crayeuses. On y trouve des géodes de quartz et des nodules de silex, avec une faune caractéristique. Son épaisseur varie de 40 à 50 mètres.

Le Lutétien supérieur est constitué d'un faciès évaporitique, avec du gypse et de

l'argile verdâtre, de l'argile phosphate verte et des bancs de calcaire à la base. En haut, on trouve des argiles vertes avec des bancs de gypse intercalés. Son épaisseur est de 65 mètres. La faune caractéristique comprend *Ostréa Multicostata* et *Cardia Placunoides*.

Remarque :

Les niveaux phosphatés appartiennent au Paléocène- Eocène d'âge Thanétien Yprésien. La spécificité de ce niveau c'est leur situation tous près de la surface également par l'effet de la tectonique et de l'érosion, ce qui a facilité le choix de l'exploitation à ciel ouvert.

III.4.4. Miocène :

Cette période est représentée par un complexe de roches terrigènes, de conglomérats, d'argiles, de sables et de schistes, avec trois formations lithologiques distinctes :

- Miocène inférieur :

Il est principalement constitué de conglomérats et de sables avec de minces couches d'argile siliceuse. Sa couleur est claire, gris blanchâtre. Son épaisseur est de 200 mètres.

- Miocène moyen :

Il est principalement argileux, de couleur marron, parfois schisteux, avec des intercalations de sables fins à moyens. Son épaisseur atteint 250 mètres.

- Miocène supérieur :

Il est composé d'une série de sables argileux et de conglomérats. Son épaisseur est de 350 mètres.

III.4.5. Quaternaire :

Les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région et sont principalement constituées de dépôts d'éboulis de pente, de sables, de graviers, de dépôts éoliens, alluviaux et fluviaux.

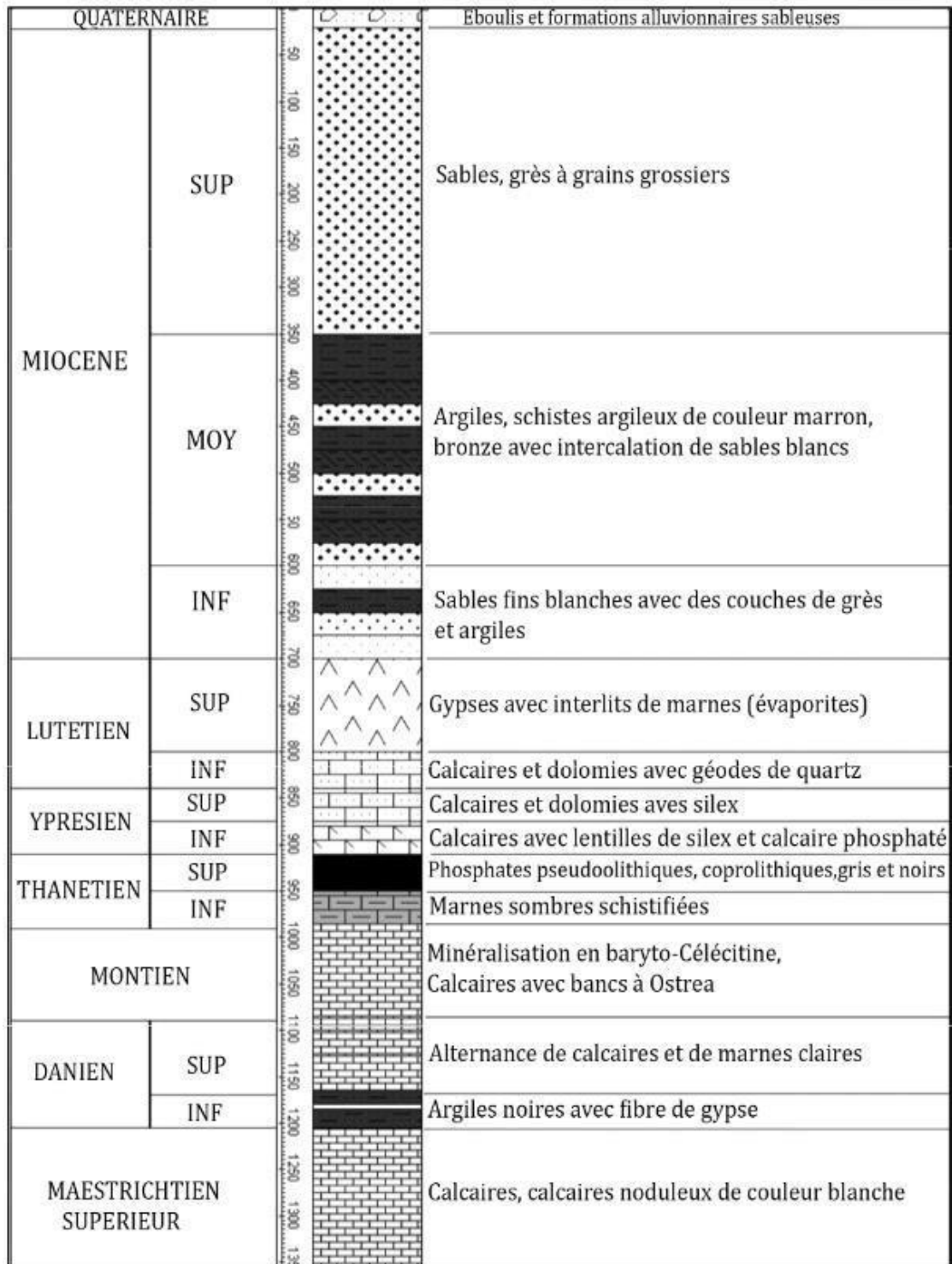


Figure - 11- Colonne stratigraphique de la région de Djebel Onk (Algérie orientale) [17].

III.5. Tectonique :

La région de Djebel Onk se trouve à l'extrémité orientale de l'Atlas Saharien. La série supérieure datant de l'Eocène dans le bassin de Djebel Onk - Gafsa - Mélaoui est configurée en une succession d'anticlinaux et de synclinaux dissymétriques, souvent

faillés sur leurs flancs, avec une orientation générale SW-NE, et des accidents transversaux N 120° à N 140° E [8].

Les anticlinaux de Djebel Onk, Djebel Djemi-Djema et Oued Bétita se trouvent en bordure de la flexure Sud-Atlasique, marquant une zone d'affleurement entre le domaine mobile de l'Atlas et la plate-forme stable du Sahara. Ils appartiennent à la branche Nord de cette flexure Sud-Atlasique orientée E-O. L'anticlinal de Djebel Onk s'étend des monts de Nememcha vers l'Est en un périclinal sous les formations du Miocène, dans une direction E-NE. Cet anticlinal présente une asymétrie, avec un pendage de 80° au sud et de 10° au nord [8].

La région de Djebel Onk a traversé trois phases tectoniques d'ampleur variée, qui ont contribué à sa structure actuelle [9] :

III.5.1. Tectonique Paléocène - Eocène (syndimentaire) :

Une phase de compression NW-SE, contemporaine de la sédimentation Paléocène, s'est traduite par des ondulations et des failles syndimentaires. Ces déformations précoces ont entraîné des lacunes dans la sédimentation du Paléocène à l'Eocène et ont conduit à la formation de hauts-fonds et de sillons qui ont influencé la sédimentation des phosphates. Elles pourraient être associées à la remontée des évaporites triasiques sous forme de diapirs, notamment au Paléocène - Eocène [9].

III.5.2. Tectonique post-Eocène moyen et tardi-Miocène :

Cette phase, contemporaine de l'émersion de la série au Lutétien supérieur, correspond à une période de plissement majeur des Aurès et de déformations distensives transverses (N120° à N150°), entraînant le début de la déformation de la série allant du Crétacé supérieur à l'Eocène en petits horsts et grabens allongés selon la direction N170°E. Ces plissements sont en grande partie antérieurs aux dépôts de sable du Miocène et ont contribué à la formation de l'anticlinal de Djebel Onk [9].

III.5.3. Tectonique tardi-Miocène, post-Burdigalienne à Pliocène - Pléistocène :

Il s'agit de la phase majeure du plissement de l'Atlas Tunisien. Les plissements des séries Crétacé supérieur, Paléocène, Eocène et Miocène se manifestent sous forme de grandes structures antiformes et synformes, formant des horsts et des grabens dans les structures antérieures. Ces déformations ont donné naissance à des méga-plis tels que Djebel Onk et Djemi Djema, créant ainsi la structure actuelle de la région de Djebel Onk.

IV. Conclusion :

A travers ce chapitre, à partir des conditions géologiques des zones étudiées, nous avons tiré des remarques très intéressantes concernant l'âge des couches constituant les gisements, type de minerai, la situation des minerais par rapport à la surface ainsi que le type d'exploitation :

- Pour le Djebel Boukhadra, c'est gisement de fer localisé dans les couches du Crétacé inférieur d'âge Aptien. La situation du minerai en profondeur varie d'un endroit à un autre ce qui a nécessité la combinaison entre l'exploitation à ciel ouvert et souterraine.
- Pour le cas de Djebel Onk, concerne un gisement de phosphate, les niveaux phosphatés appartiennent à la limite Paléocène- Eocène, ils sont d'âge Thanétien-Yprésien. Dans les mines de Djebel Onk, l'exploitation des phosphates se fait à ciel ouvert vue l'épaisseur modeste des roches de couverture.

Dans les deux cas de ces mines, des problèmes d'instabilité sont survenues, et ont interrompues voire même arrêté les cycles d'exploitation. Ces instabilités sont fréquentes beaucoup plus dans les carrières c'est-à-dire dans le cas d'exploitation à ciel ouvert, elles sont généralement sous forme de glissement surtout pour le cas de Djebel Onk, en ce qui concerne le cas de Djebel Boukhadra, pour l'instabilité rencontré, on a constaté que la masse tombée à glisser par effondrement selon une pente bien défini, donc elle est proche de glissement que d'effondrement. Il est évident donc que le type d'instabilité est fortement lié d'une part aux conditions géologiques (nature des formations, fracturation, plan de discontinuité, ... etc.), d'autre part aux conditions d'exploitation tel que la hauteur et l'angle d'inclinaison des gradins ... etc.

Pour cette raison, le chapitre qui suit va être consacré à l'examen des différents types d'instabilité et de leurs mécanismes ainsi qu'aux conditions nécessaires pour une bonne conception des gradins.

**Chapitre II : Les types d'instabilités dans les
mines**

II.1. Introduction :

L'exploitation minière est l'une des activités les plus anciennes de l'humanité. Presque depuis le début de l'âge de pierre, il y a 2,5 millions d'années ou plus, elle a été la principale source de matériaux pour la fabrication d'outils. Mais de nombreux désastres surviennent dans les mines, dans le cas d'exploitation à ciel ouvert, les mouvements les plus fréquents sont les glissements des terrains, les éboulements ...etc. Pour le cas d'exploitation souterraine, les problèmes les plus marquants de l'instabilité sont généralement les affaissements, les effondrements, les venues soudaines de l'eau souterraine...etc. Dans le cas de notre étude et d'après nos visites sur terrain, le problème des instabilités dans la mine de la région est lié beaucoup plus aux glissements des terrains. A cet effet, dans ce chapitre on se base sur une synthèse de la revue de littérature concernant les glissements de terrain.

Les glissements de terrain, qui proviennent du déplacement de la fracture et du mouvement du sol et affectent n'importe quelle partie du monde, sont l'un des risques naturels les plus courants. Ils impactent à la fois les pentes naturelles et artificielles et entraînent chaque année d'importantes pertes en vies humaines et en biens. Par conséquent, la stabilité des pentes est un facteur crucial à prendre en compte lors de la gestion de diverses activités d'aménagement de territoire et de conception minière.

II.2. Position du problème :

D'un point de vue stabilité, l'étude d'une exploitation à ciel ouvert se ramène au dimensionnement des talus de la fosse.

Une fosse possède plusieurs talus qui ont des orientations différentes et qui souvent rencontrent des terrains pouvant avoir des caractéristiques géotechniques différentes (figure -12-). Son dimensionnement consiste donc à définir les angles de ces talus de manière à assurer la stabilité générale.



Figure - 12- fosse de la mine de diamant de Nyurbinsky, au Russie [10].

Un talus minier est défini par les paramètres illustrés par la figure -13-

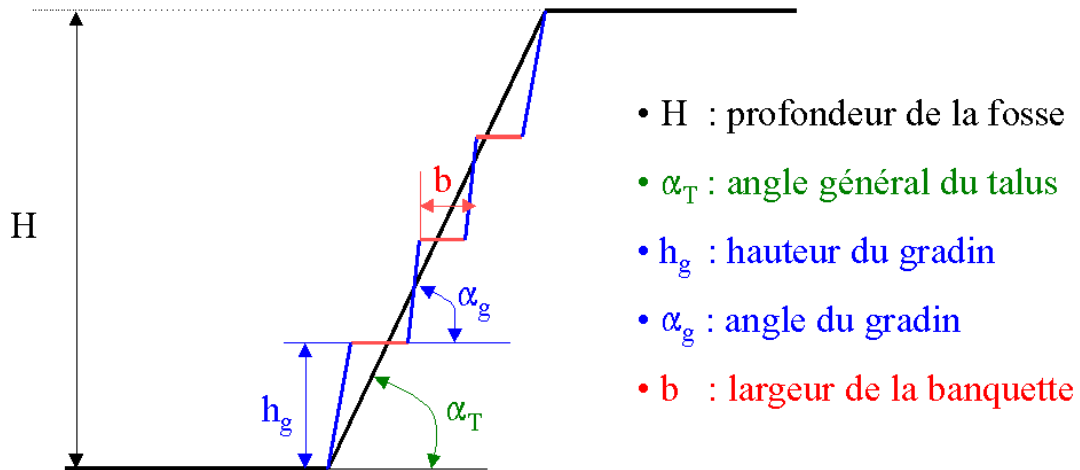


Figure - 13- Définition d'un talus minier [20].

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

Un gradin est analysé comme un talus de faible hauteur. Son angle α_g est donc défini de la même façon qu'un talus. La hauteur du gradin h_g est déterminée en prenant en compte essentiellement des considérations techniques (équipements disponibles, critères de sélectivité, ... etc.). Il est évident que pour un talus donné, il y a une relation géométrique entre la profondeur H , l'angle général α_T , la hauteur h_g , l'angle α_g et la largeur des banquettes (avec éventuellement la rampe). La largeur des banquettes est généralement définie en dernier lieu. Elle doit permettre la circulation et le croisement des engins utilisés dans l'exploitation. Ainsi, le problème fondamental dans la stabilité d'une exploitation à ciel ouvert se ramène au dimensionnement des angles des talus. Insistons encore une fois sur le fait que l'angle général d'un talus doit être défini pour la profondeur ultime de la fosse (Figure-14-) [20].

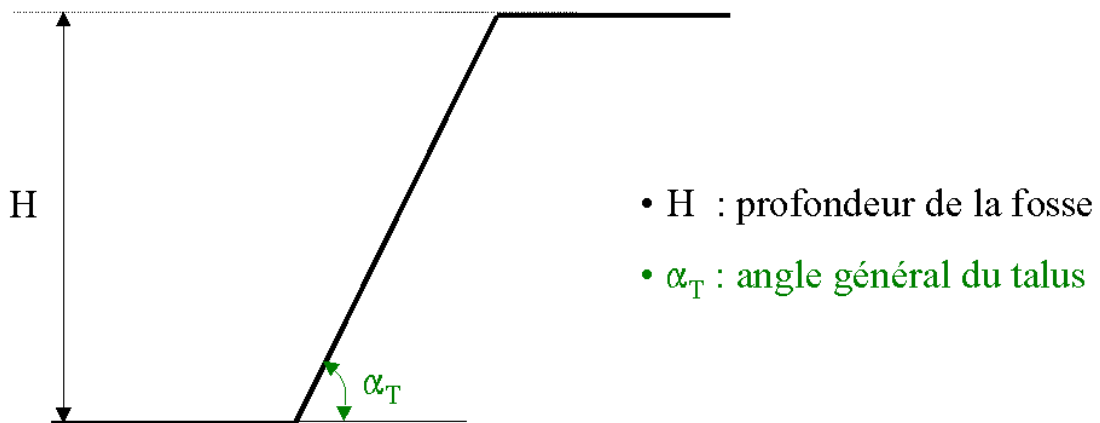


Figure - 14- Angle général d'un talus [20]

La profondeur maximale de la fosse est généralement déterminée en fonction de divers critères techniques et économiques, tels que la configuration du gisement, le coût d'extraction à ciel ouvert par rapport à l'exploitation souterraine, et le taux de découverte. Une fois cette profondeur maximale décidée, il est nécessaire de définir l'angle de la pente pour garantir la stabilité de l'exploitation. De plus, cet angle influencera considérablement le taux de découverte. On observe ainsi une tendance chez les exploitants miniers à augmenter significativement cet angle afin de réduire la quantité de stériles extraits. (Figure-15-).

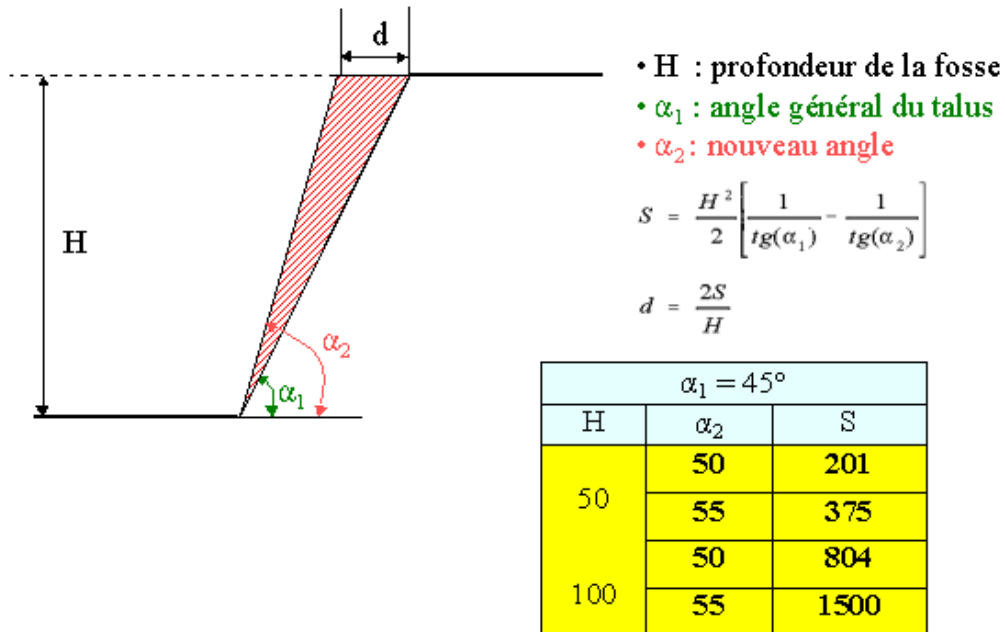


Figure - 15- Influence de l'angle général sur le volume (S) de stérile extrait (volume de terrain économisé par tranche unitaire en faisant passer l'angle de 45, à 50 et à 55°) [20].

II.3. Instabilité des massifs rocheux :

II.3.1. Généralité :

Les instabilités rocheuses surviennent lorsque divers éléments et facteurs convergent, conduisant d'une manière ou d'une autre à une transition d'un état de stabilité précaire à une situation instable. Cette transition se manifeste par des mouvements de roches ou de sols, qui peuvent prendre différentes formes telles que glissements, écroulements, chutes, etc. Ces mouvements se distinguent par leurs caractéristiques, telles que leur volume, leur vitesse, et la distance parcourue. [10].

II.3.2. Principales causes des mouvements de terrain :

Les mouvements de terrain résultent d'un déséquilibre des forces dans le versant, où les forces motrices surpassent les forces résistantes, suite à des processus physiques et/ou chimiques influencés par divers facteurs. Les processus d'altération à long terme, entraînant une diminution des forces résistantes, ainsi que les variations de la nappe

phréatique, contribuent de manière continue à l'instabilité d'un versant. De plus, une pente peut subir une déstabilisation rapide.

Le passage de l'état stable à l'état instable est dû à de multiples causes qui s'ajoutent aux conditions initiales propres au terrain. On distingue les facteurs passifs et les facteurs actifs, ces derniers jouant le rôle de déclencheurs dans le processus. (Figure-16-).

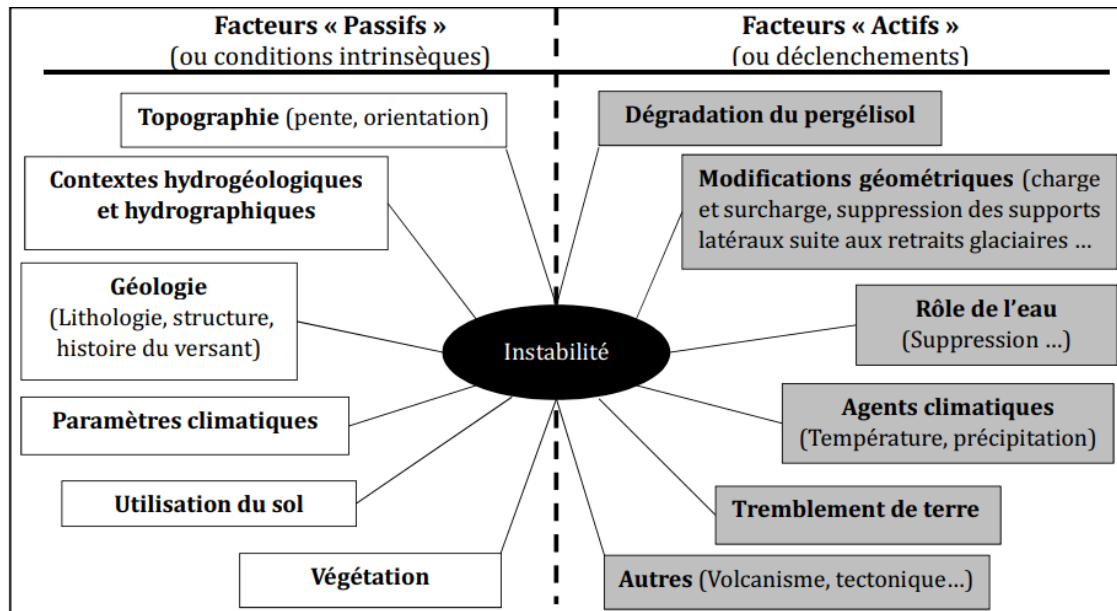


Figure - 16- Les différents facteurs d'un glissement de terrain [10].

a) Facteurs passifs :

- **La géologie :**
 - La lithologie, qui comprend la composition, la texture, la granulométrie et d'autres caractéristiques. Par exemple, dans le contexte d'un glissement de terrain, les argiles sont particulièrement sensibles à l'eau.
 - La structure géologique, comprenant le pendage des couches rocheuses et la présence de joints tels que les strates, les diaclases et les failles. En général, les terrains dont le pendage est opposé à la topographie sont plus stables.
- **La pente :** Les pentes les plus sujettes aux glissements ont une inclinaison qui va de 20 à 30°
- **L'orientation :** les mouvements de terrain se dirigent vers la ligne de plus grande pente.
- **La végétation :** La végétation joue un rôle significatif en intervenant dans les échanges d'eau, notamment par l'évapotranspiration, ainsi qu'en contribuant à la cohésion et à la fixation du sol.
- **Le contexte hydrogéologique et hydrographique :** En premier lieu il concerne, la perméabilité du massif, les circulations d'eau souterraine, le drainage (hydrogéologie) et, en deuxième lieu le réseau hydrographique

(ruissellement, proximité d'une source).

- **Le contexte climatique :** Englobant la pluviométrie annuelle totale, la répartition des précipitations annuelle, la possibilité d'accumulation de neige, et la température moyenne ainsi que l'évolution climatique.

b) Facteurs actifs et déclenchant (causes directes) :

- **Le climat :**

1. Causes hydriques

- L'infiltration d'eau dans un terrain (pluie, neiges etc.) a des conséquences sur la cohésion du matériel qui offre, de fait, moins de résistance au cisaillement.
- Des surpressions se produisent sous des blocs ou sous terrain lui-même, s'il y'a une importante présence d'eau. Notamment lorsqu'une partie du terrain est gelée.
- Le poids du sol augmente avec l'humidité, ce qui augmente les forces déstabilisantes.

2. Causes thermiques

- Alternance de phases de gel/dégel (massage thermique et cryoclastie).
- Dégradation du pergélisol, « ciment » des montagnes, avec le réchauffement global

- **Causes mécaniques :**

1. Vibrations :

- Sismicité et vibration dues à un séisme ou à des activités humaines (explosion), donc augmentation momentanée du poids du terrain qui peut suffire pour que le seuil de stabilité soit franchi et que le terrain se mette en mouvement.
- Le phénomène de thixotropie : soumis à des vibrations, certains matériaux comme les argiles, par exemple, peuvent passer de l'état solide à l'état liquide.

2. Modification de la géométrie :

- Modification de la répartition des masses par érosion en pied de versant, par exemple due à l'action d'une rivière, ou par surcharge en haut d'une pente, comme lors de la construction d'ouvrages de génie minier ou civil.
- L'origine du déclenchement d'une instabilité des talus est rarement unique, mais résulte plutôt d'une combinaison de facteurs passifs et déclencheurs [10].

II.3.3. Facteurs influençant la stabilité des mines à ciel ouvert :

Dans les mines à ciel ouvert les facteurs influençant la stabilité des talus [10] sont :

- La hauteur des gradins ;
- La nature géologiques et structurales des terrains ;
- L'eau souterraine ;
- La méthode et les phases d'exploitation ;
- Les facteurs d'ordre géométrique (concavité ou convexité du bord du talus).

II.3.3.1. La hauteur des gradins :

La hauteur des gradins influe considérablement sur la valeur du coefficient de sécurité et donc sur la stabilité des talus. Plus la hauteur du gradin est grande, plus il devient instable.

II.3.3.2. La nature des terrains :

La nature des terrains est un paramètre crucial à considérer dans toute étude de stabilité. Cela implique principalement l'analyse de la structure du massif et des caractéristiques physico-mécaniques du sol. En ce qui concerne la structure du massif, l'examen des discontinuités telles que les accidents tectoniques, les joints de stratification, les failles et les diaclases joue un rôle fondamental dans le calcul du coefficient de sécurité. Quant aux caractéristiques physico-mécaniques :

- Le paramètre physique pris en compte lors du calcul de la stabilité est le poids volumique des terrains en place.
- Le paramètre mécanique le plus important est sa résistance au cisaillement, qui permet d'évaluer les caractéristiques de cisaillement telles que la cohésion et l'angle de frottement interne.

II.3.3.3. L'eau souterraine :

L'eau joue un rôle très important dans la stabilité des talus. D'une manière générale, la présence d'eau dans un terrain modifie les paramètres géotechniques du terrain, la pression interstitielle dans ce cas est une force motrice.

II.3.3.4. La méthode et les phases d'exploitation :

La modification de l'état des contraintes dans un massif rocheux à la suite des travaux d'exploitation peut entraîner une diminution de la résistance au cisaillement, ce qui peut provoquer des ruptures. Le calcul de la stabilité des gradins doit également prendre en compte les surcharges ponctuelles causées par les engins d'exploitation.

II.3.4. L'instabilité des massifs rocheux :

Les mouvements du terrain sont des phénomènes géologiques de nature très diverse. De nombreuses classifications ont été proposées pour révéler la complexité de ces phénomènes. Schroeder (2010) a réparti les instabilités en classes selon le volume total des matériaux mobilisés lors de l'écroulement ainsi que leur taille.

- Chutes de pierres : mouvement d'un petit nombre d'éléments avec des volumes unitaires inférieurs à quelques décimètres cubes (dm^3) ;
- Chutes de blocs : mouvement d'un petit nombre d'éléments avec des volumes unitaires atteignant quelques mètres cubes (m^3) ;
- Éboulements : mouvement en masse de volumes de plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de mètres cubes (m^3).

Schroeder (2010) a introduit une autre classification dépendante du mécanisme et de la cinématique du mouvement. Dans cette optique, on peut distinguer deux grandes familles d'instabilités :

- o Les mouvements rapides
- o Les mouvements lents.

II.3.4.1. Les mouvements rapides et discontinus :

Ils se propagent de manière brutale et soudaine. Ces phénomènes regroupent les écroulements, les effondrements, les chutes de pierres et de blocs, les éboulements et les coulées boueuses. Les mouvements rapides affectent principalement les personnes, souvent avec des conséquences dramatiques. Ils ont également des impacts sur les infrastructures (bâtiments, voies de communication, etc.), allant de la dégradation à la ruine totale.

II.3.4.1.1. Les Effondrements :

Ce sont des déplacements verticaux instantanés de la surface du sol provoqués par une rupture brutale de cavités souterraines préexistantes (Figure -17- A) : soit naturelles (karstiques) ou artificielles (mines, carrières ou ouvrages souterrains).

Ces mouvements peuvent entraîner l'effondrement total du toit de la cavité et provoquent en surface une dépression généralement de forme circulaire [11].

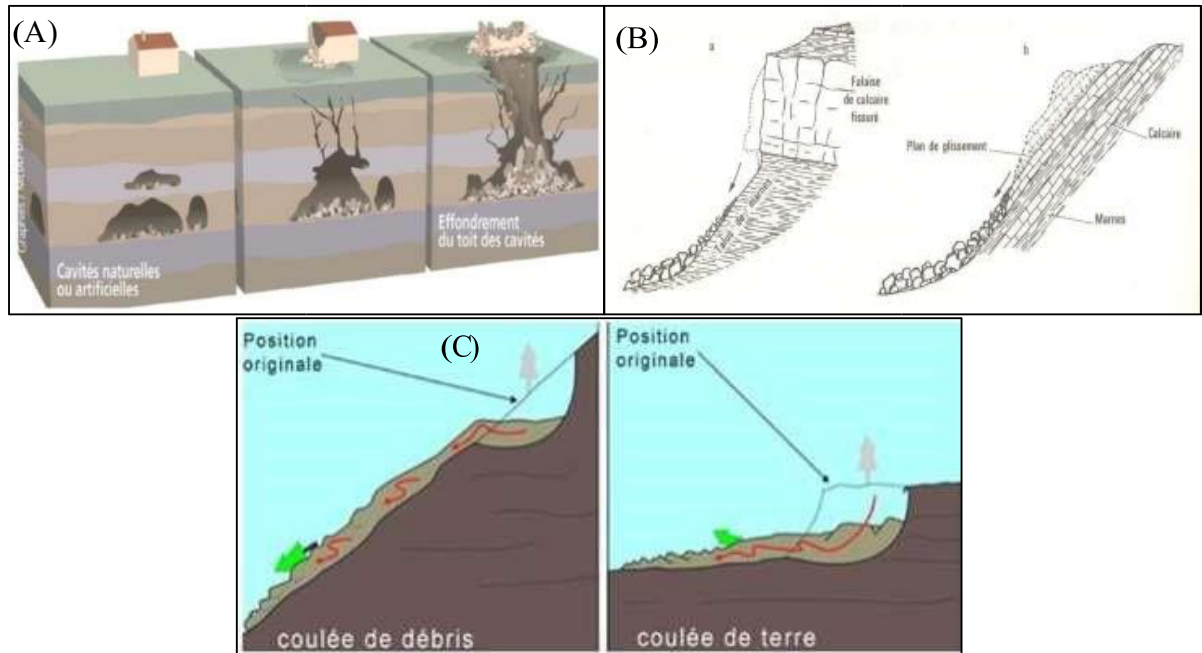


Figure - 17- Différents types de mouvement rapide et discontinus.

- A)** Effondrement de cavités naturelles ou artificielles, **B)** Deux types d'écroulement :
a) par rupture d'un plan de falaise ; b) à la suite d'un glissement plan
C) les coulées : coulée de débris et de terre [12].

II.3.4.1.2. Les écroulements :

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses qui se détachent d'une paroi en se désorganisant (Figure -17-B). Elles se manifestent par l'effondrement d'un pan de falaise verticale, formant au pied du versant des nappes de matériaux grossiers pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres. Ces phénomènes se produisent dans des configurations géologiques particulières : fissures parallèles à la surface libre ou présence d'un banc érodable sous une couche résistante, etc.. [11].

II.3.4.1.3. Les coulées :

Elles se produisent à partir de matériels meubles saturés en eau, prenant alors une consistance plus ou moins visqueuse, parfois proche de la fluidité. On distingue plusieurs types de coulées telles que :

→ Coulées boueuses et laves torrentielles :

Les coulées apparaissent dans des matériaux meubles (sols argileux ou marneux) lorsque leur teneur en eau augmente de manière significative, dépassant ainsi leur limite de liquidité. Ces coulées peuvent survenir à la suite d'une solifluxion ou d'un glissement de terrain (Figure -17-C). Elles se caractérisent par la propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu leur cohésion dès leur mise en mouvement.

Lors d'un phénomène de coulée boueuse :

- Le degré de remaniement de la masse en mouvement est total.
- La vitesse et la distance parcourue par une coulée boueuse sont très variables, dépendant de nombreux facteurs tels que la nature des matériaux, la quantité d'eau, la viscosité du mélange eau/matériau, la topographie, et la saturation en eau des sols sur lesquels se déplace la coulée.

II.3.4.2. Les mouvements lents et continus :

Seuls les mouvements rapides sont directement dangereux pour l'homme. Leurs conséquences sont d'autant plus graves que les masses déplacées sont importantes. En revanche, les conséquences des mouvements lents sont essentiellement socioéconomiques ou d'intérêt public. Ces mouvements entraînent une déformation progressive des terrains, souvent imperceptible par l'homme. Ils regroupent : l'affaissement, le tassement, le glissement, la solifluxion, le fluage, le retrait-gonflement et le fauchage.

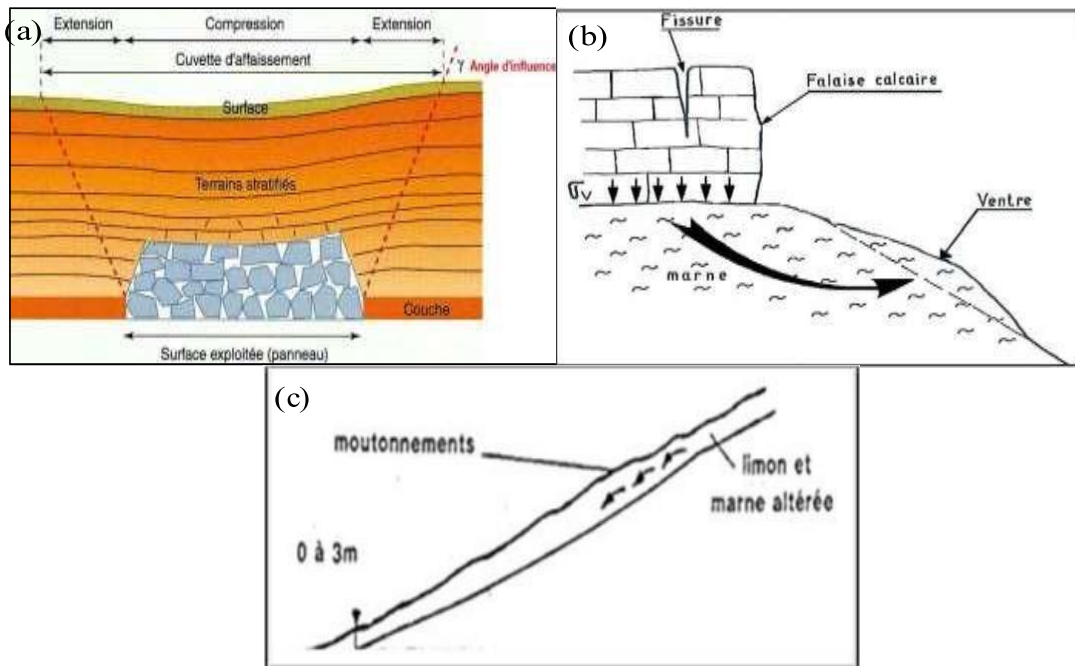


Figure - 18- Différente type de mouvements lents et continus

- **Les affaissements** : Ils se caractérisent par l'évolution des cavités souterraines naturelles ou artificielles (Figure 18-a), dont l'effondrement est amorti par le comportement souple des terrains superficiels.

- **Le fluage** : Il se manifeste par des mouvements lents et continus, mais à des vitesses faibles (Figure 18-b). Dans le cas du fluage, il est difficile de mettre en évidence une surface de rupture. Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement aux glissements) : le matériau est en fait sollicité à un état proche de la rupture. Ce type de mouvement peut soit se stabiliser, soit évoluer vers une rupture.

- **Le tassement** : Il s'agit d'une déformation verticale due à l'application de charges telles que les remblais, les fondations ou son propre poids. Les tassements peuvent être uniformes ou varier d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés, les tassements sont presque instantanés, mais dans les sols saturés, ils peuvent s'étendre sur quelques secondes dans les sols sableux-graveleux, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables.

- **La solifluxion** : Ce phénomène s'accroît sous l'effet du gel-dégel, particulièrement au moment du dégel quand le matériau de surface est saturé et qu'un sol gelé subsiste en profondeur (Figure 18-c). En général, les solifluxions touchent superficiellement (profondeur inférieure à 2 m) les sols meubles, et spécialement les versants marneux. Elles sont caractérisées par une zone de départ inexistante et une faible extension des masses en mouvement.

II.3.4.3. Les types de glissement de terrain :

Les glissements de terrain sont des mouvements qui affectent les talus et les versants naturels. Ils peuvent provoquer des dommages importants aux ouvrages de génie minier et génie civil. Ils surviennent à la suite d'un événement naturel – forte pluie, érosion de berge, séisme, par exemple – ou sont la conséquence plus ou moins directe d'actions de l'homme. Selon la forme de la surface de rupture, le nombre de familles de discontinuités et leurs orientations par rapport à la surface libre de la paroi rocheuse, les glissements peuvent se présenter sous forme circulaire, plans, de coin (dièdre) et Toppling [13].

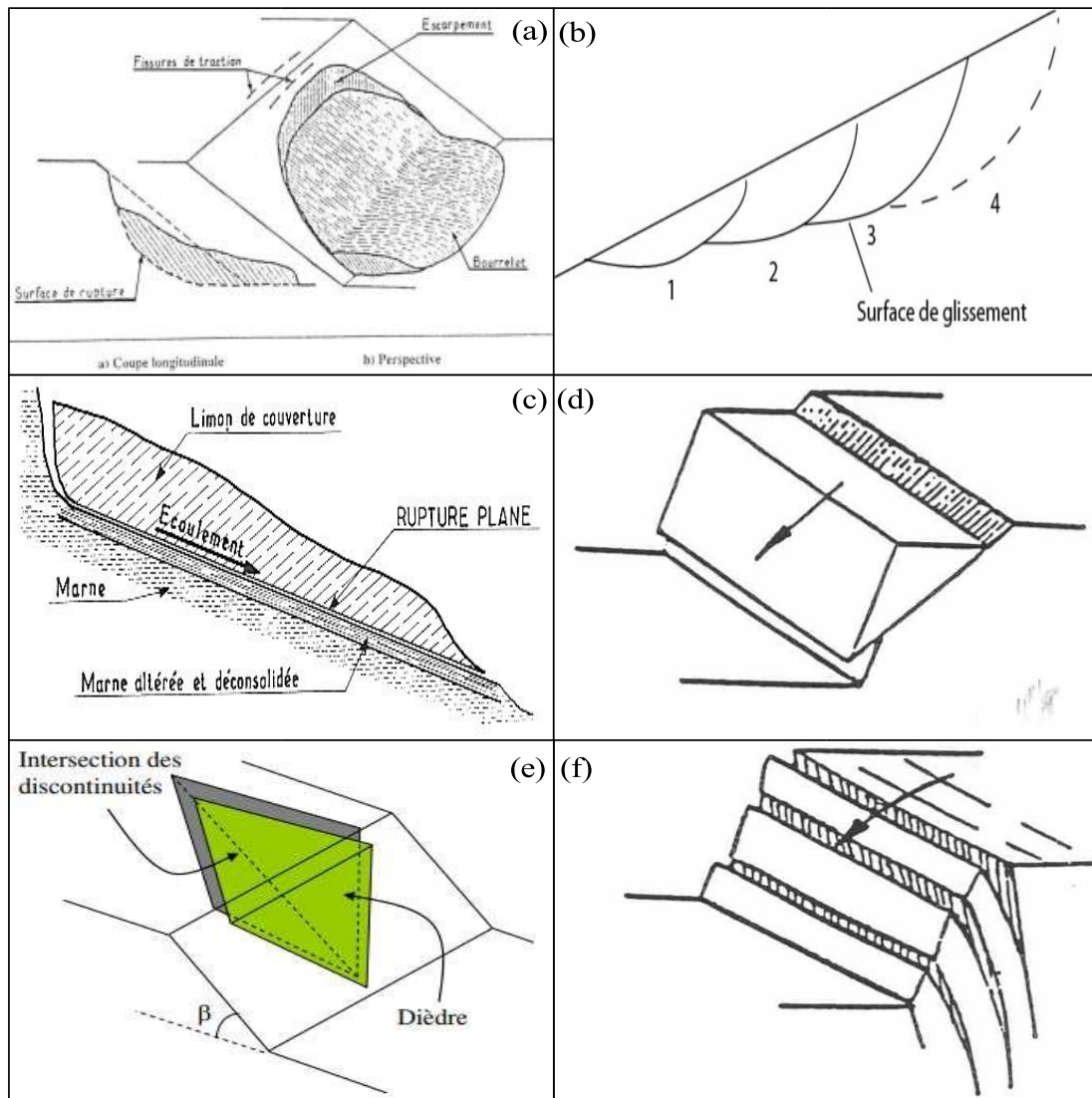


Figure - 19- Différents types de glissements.

II.3.4.3.1. Glissement circulaire :

Le terrain glisse le long d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère. En générale la surface de glissement plonge presque verticalement dans la niche d'arrachement. On distingue le glissement rotationnel simple et complexe (composé) ([13]) (Figure -19- ab)

→ **Glissement circulaire simple** : La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à un cercle, d'où le nom de glissement circulaire. Il est caractérisé par des ravinements et des arrachements importants des masses rocheuses. Dans un tel glissement on distingue (Figure -19- a) :

- Des fissures de traction et un escarpement au sommet correspondant au départ de la surface de glissement
- Un bourrelet formé par des matières glissées à la base.

→ **Glissement circulaire complexe** : Il s'agit de glissements multiples emboîtés les uns dans les autres dus souvent à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, ce qui entraîne des glissements successifs remontant vers l'amont. Il est formé de plusieurs petits décrochements et de ravinements (Figure -19- b).

II.3.4.3.2. Glissements plans :

Il se produit suivant un plan au niveau d'une surface de discontinuité géologique (zone entre deux matériaux de nature différente, failles, joints de stratification, etc.) (Figure -19- cd). La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques mécaniques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon [13]

II.3.4.3.3. Glissement de coin (dièdre) :

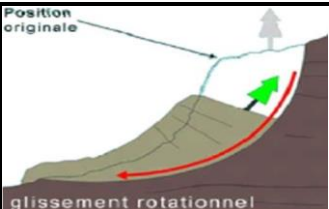
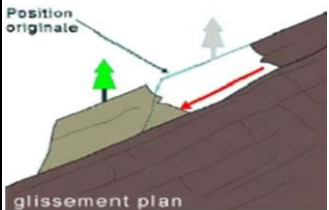
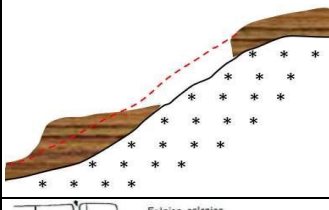
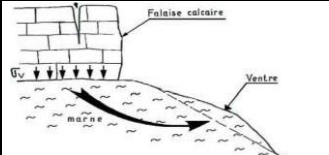
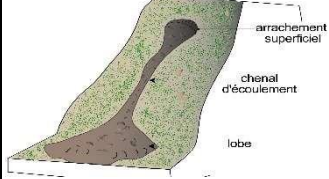

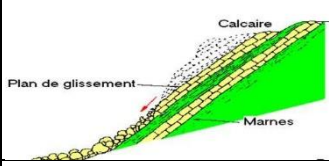
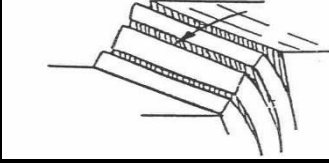
Etant formé par deux plans de discontinuités (Figure -19- e) dont l'orientation permet le glissement du bloc vers la surface libre [13].

II.3.4.3.4. Basculement (Toppling) :

C'est un glissement bien marqué des bancs rocheux provoquant une sorte de fauchage de tête de bancs (Figure -19- f). Il ne se produit que dans des conditions spécifiques de pendage des bancs (ils doivent être assez redressés), de pente du talus rocheux (assez raide) et d'orientation relative (la stratification et le talus doivent avoir des directions voisines). Il se produit par décollement des plaques et leur basculement [10]

Les différents types de mouvements de terrain sont donnés dans Le tableau -1-

Tableau - 1- Principales classes et types de déstabilisation sur les versants en fonction des terrains concernés [13].

Classes	Types	Schémas	Terrains concernés	Remaniements interne	Vitesses moyennes
Glissements de terrains	Glissement circulaire		Roches peu cohérentes : -Marnes ; -Alluvions ; -Moraines	Plutôt faible	Quelques centimètres à quelques mètres par jour
	Glissement plan				
	Glissement de niveau d'altération		Altérites		Quelques mètres par jour
Coulées	Coulées de solifluxion		Roches meubles	Plutôt fort	Discontinu (saison)
	Coulées boueuses				Plusieurs mètres par secondes Variable selon la fluidité
Ecoulements	Ecoulement de surplomb		Roches cohérentes stratifiées ou non	Variable selon le stade	Déclenchement très rapide
	Ecoulement d'aval pendage				Choute en quelques secondes
Basculement (Toppling)	Fauchage				Très lent, quelques cm par an

II.3.4.4. Méthodes de confortement des glissements :

Selon Durville (1966), les méthodes utilisées pour stabiliser un versant en mouvement sont :

II.3.4.4.1. Les terrassements :

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement demeure le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement :

- Actions sur l'équilibre des masses : allègement en tête, remblai en pied.
- Actions sur la géométrie de la pente : purge et reprofilage.
- Substitutions partielles ou totales de la masse instable.

- Remblai de pied :

Le chargement en pied d'un glissement est une technique souvent utilisée et généralement efficace. L'ouvrage, appelé également banquettes, berme ou butée, agit par contrebalancement des forces motrices (Figure -20- a). Étant donné son poids, l'ouvrage de butée ne doit pas déclencher d'autres glissements.

- Allègement en tête :

L'allègement en tête de glissement consiste à terrasser dans la partie supérieure (Figure -20- cd). Il en résulte une diminution du poids moteur et, par conséquent, une augmentation du coefficient de sécurité. La méthode de dimensionnement consiste en un calcul de stabilité le long de la surface de rupture déclarée en prenant en compte la modification de la géométrie en tête. On peut également substituer le matériau terrassé par un matériau léger (polystyrène, matériau à structure alvéolaire, etc.).

- Reprofilage :

Les conditions de stabilité d'un talus étant directement liées à sa pente, on peut assez simplement augmenter la sécurité par retalutage du terrain naturel (Figure -20- ef). Dans ce sens, le procédé s'apparente à l'allègement en tête, il consiste en un adoucissement de la pente moyenne. Ce type de traitement est particulièrement bien adapté aux talus de déblais et il est de pratique courante. L'exécution du reprofilage a l'avantage d'améliorer la stabilité par rapport à une pente unique et de créer des voies d'accès pour l'entretien ou des travaux complémentaires. L'adoucissement de la pente est généralement mal adapté aux versants naturels instables car il met en jeu des volumes très importants.

- Purge :

Les techniques de terrassement s'accompagnent fréquemment de purges du matériau déplacé par le glissement (figure -20- b). Cette solution est généralement limitée aux glissements de taille modeste. Dans certains cas, on peut purger l'ensemble du matériau glissé à condition que la surface mise à nu soit stable [13].

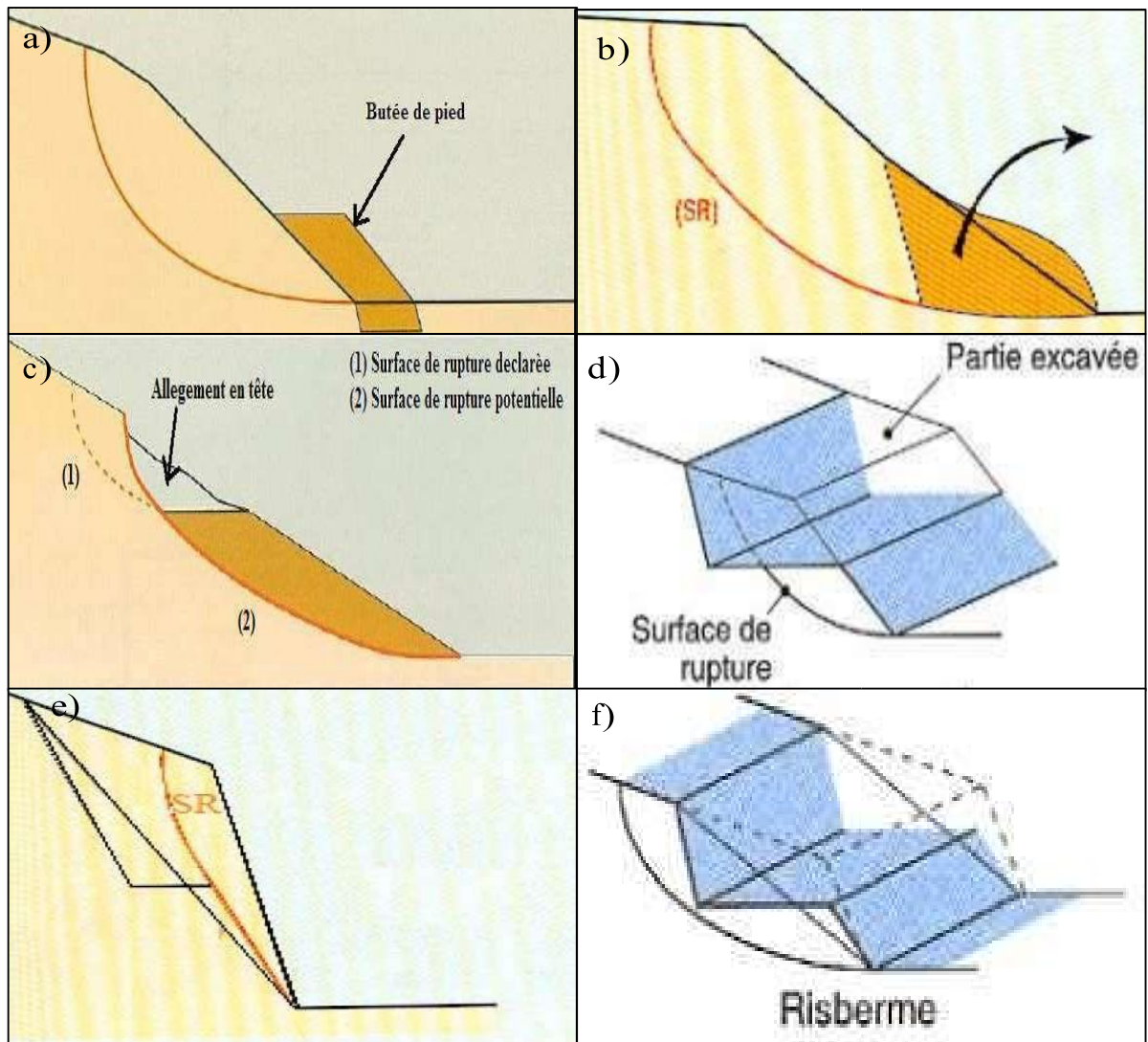


Figure - 20- Méthodes de stabilisation par terrassement [13].

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, en se basant sur les concepts théoriques, nous avons essayé de cerner les différents types de mouvement pouvant avoir lieu dans les terrains en versant de manière générale et dans les sites des mines à ciel ouvert (stabilité des gradins) de manière particulière.

On constate donc que plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'instabilité des talus. Parmi ces facteurs, principaux sont toujours liés à la nature géologique du terrain d'un côté et d'un autre aux conditions de conception des talus (gradins). Bien que les sites miniers sont sensibles et comportent toujours des dangers et des instabilités potentielles, il est indispensable de prendre ces facteurs en considération lors de la conception des gradins. Des facteurs passifs peuvent se transformer rapidement en facteur actifs et ils peuvent intervenir individuellement ou en combinaison au déclenchement d'instabilité. Pour cette raison, il est recommandé toujours d'opter à l'analyse de stabilité pendant les études de conception selon la nature du site concerné.

Minimiser les dégâts et réduire les instabilités dans un site minier constituent un défi depuis l'antiquité, ceci nécessite une bonne expérience dans le domaine de géologie et de géotechnique.

Dans le chapitre suivant nous allons présenter les différents types d'instabilité rencontrée dans les mines de la région de Tébessa, ainsi que des applications pour l'analyse de stabilité selon les cas rencontrés. Nous devons signaler que la représentation ci-après en chapitre III concerne seulement les deux mines de Djebel Boukhadra et de Djebel Onk, pour la mine de Djebel Ouenza, malheureusement aucune donnée n'a été disponible vue des contraintes administratives à l'échelle de la mine.

**Chapitre III : Evaluation de la stabilité dans les
mines étudiées**

III.1. Introduction :

L'analyse de stabilité est une phase très importante dans les études des sites géotechniques, plus précisément les sites en versant, parmi ces sites les mines à ciel ouvert, celles-ci constituent des sites privilégiés aux instabilités potentielles. Malgré les normes prescrites pour la conception des gradins, les cas d'instabilité sont fréquents et c'est également le cas pour la région étudiée.

Dans ce chapitre et pour le cas des deux mines dont les différentes conditions sont déjà citées en chapitre I, nous avons effectué une analyse de stabilité que nous jugeons conforme à chaque cas, là où nous avons opté pour une analyse cinématique par projection stéréographique pour le cas de mine de Boukhadra à l'aide du logiciel Dip 7.0 et un calcul du coefficient de sécurité pour le cas de la mine de Djebel Onk à l'aide des logiciels Géo studio et Slide 7.0. Après avoir abouti à certains résultats des interprétations sont établies.

III.2. Cas de gisement de Boukhadra :

La mine de Boukhadra est l'une des plus anciennes mines en Algérie, elle a été découverte à l'époque romaine, depuis cette époque la mine a été exploitée, plusieurs organismes lui ont succédé jusqu'à la nationalisation après l'indépendance.

III.2.1. Donnée générale de la carrière BK II :

-Productivité de la carrière : 200000 T/an

-Organisation du travail de la carrière :

- ✓ Nombre de jours ouvrables par an : 225 j/an
- ✓ Nombre de jours ouvrables par semaine : 5j/s
- ✓ Nombre de poste par jour : 2 p
- ✓ Durée d'un poste : 7.5 heures

-Système d'exploitation :

Le système d'exploitation prévoit des opérations de production comme suite :

- Réalisation de tranche de découpage (plate-forme initial)
- Foration des trous de mine avec des sondages d'abattage
- Chargement des trous de mines et tir
- Chargement de la masse abattue par camions vers le concasseur pour le minerai et vers le terril pour le stérile.

-Les principaux paramètres du système d'exploitation sont :

Le tableau -2- ci-dessous résume les paramètres du système d'exploitation choisi pour la carrière BKII

Tableau - 2- les paramètres du système d'exploitation dans la mine de boukhadra

La hauteur du gradin (m)	15 à 35
L'angle d'inclinaison du gradin ^o	78 ^o
La largeur minimale de la plate-forme de travail (distance de la projection des roches) (m)	43.5m
La largeur minimale de la berme de transport (m)	12
Le nombre maximal de gradins en production (travail)	04
La vitesse d'approfondissement de la carrière (m)	16-17
La longueur totale de front de travail (m)	300-400
L'avancement moyenne du front de travail (m/an)	50-60

Après avoir arrêté les paramètres nécessaires pour l'exploitation à ciel ouvert, qui en principe doivent inclure toutes les conditions du site (la géologie, la tectonique, la combinaison avec l'exploitation souterraine...etc.) on constate que ces paramètres n'ont pas satisfait pour le site en général et des carrières d'exploitation à ciel ouvert en particulier. Un effondrement est survenu depuis l'année 2012 et s'est développé jusqu'à avoir été la cause d'un éboulement qui a interrompu l'exploitation

III.2.2. Evolution de l'instabilité déclenchée dans la mine de Boukhadra :

III.2.2.1. Les différentes phases d'effondrement de BKII :

D'après les photos satellites du google earth pro. Ainsi que le rapport établi par Hiba BOULAHBEL nous avons essayé d'établir un diagnostic pour la cinématique du mouvement décrite par Hiba BOULAHBEL comme un effondrement.

a) Phase 1 :

En 2012, il y a eu un effondrement dans la partie nord du gisement, impliquant un effondrement du sol vers le bas d'une cavité souterraine entre les coupes 294-295-296-297-298, au niveau de la carrière BKII, axe nord. L'extraction se fait au niveau 1285 en utilisant une méthode d'abattage parallèle, créant ainsi un vide important jusqu'à la surface, constitué d'une couche mince incapable de supporter les contraintes, en raison des conditions hydrogéologiques et de la présence d'une couche de marne jaune qui favorise l'effondrement massif de la roche dans le vide précédemment créé.

Voici l'évolution des vides naturels avant et après la phase 1 : figure -21-

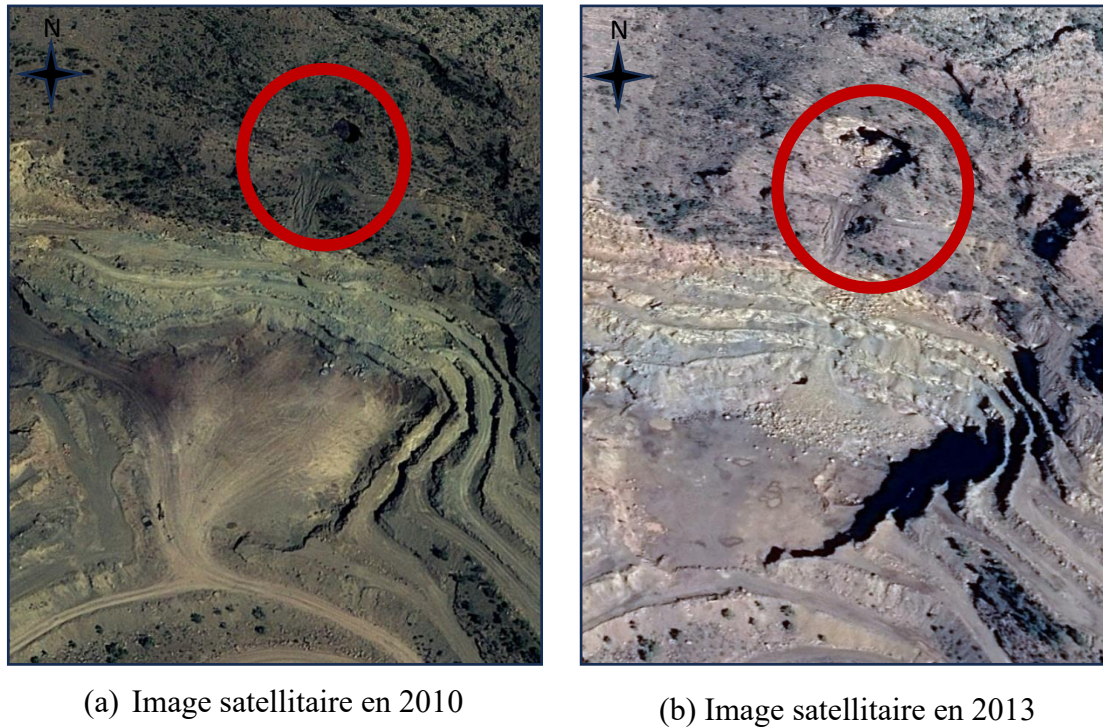


Figure - 21- Photo montre l'évolution de glissement de BK II (google earth pro,2024)

b) Phase 2 :

Le 24 septembre 2019, un effondrement observé dans l'axe sud du gisement, spécifiquement au niveau de la carrière BKII entre les coupes 08-09-10. L'exploitation se déroule entre les niveaux 1105 et 1135, utilisant une méthode à ciel ouvert pour la partie supérieure jusqu'au niveau 1135 (limite inférieure de la carrière), et une méthode d'abattage en rabattant pour la partie inférieure jusqu'au niveau 1105 par le souterrain. Cela a créé un vide dans la carrière, et actuellement, l'exploitation est concentrée dans le troisième étage, entre les niveaux 1105 et 1135. Parmi les causes de l'effondrement, on trouve le jumelage de gradins (de H=15 à H=35) et la combinaison de l'exploitation souterraine et à ciel ouvert au niveau 1135.

La figure -22- montre l'emplacement Coupes horizontales des Niveaux 3^{ème} étage souterrain :

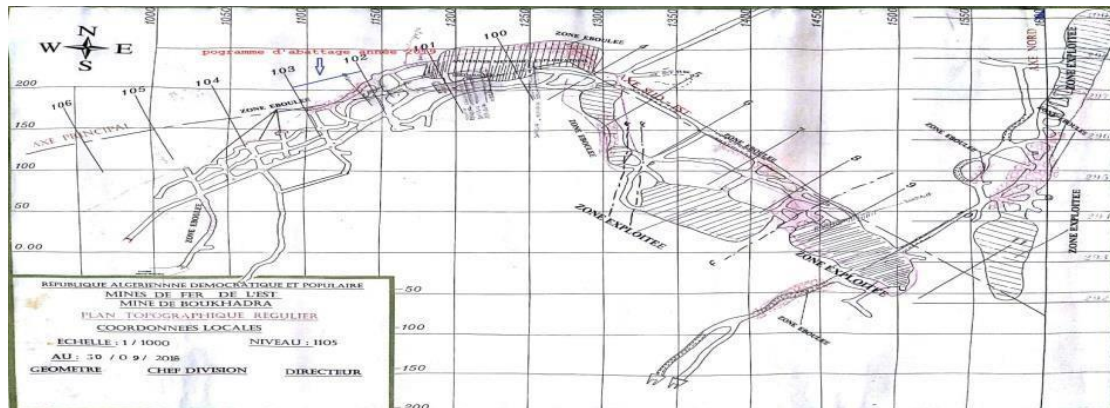
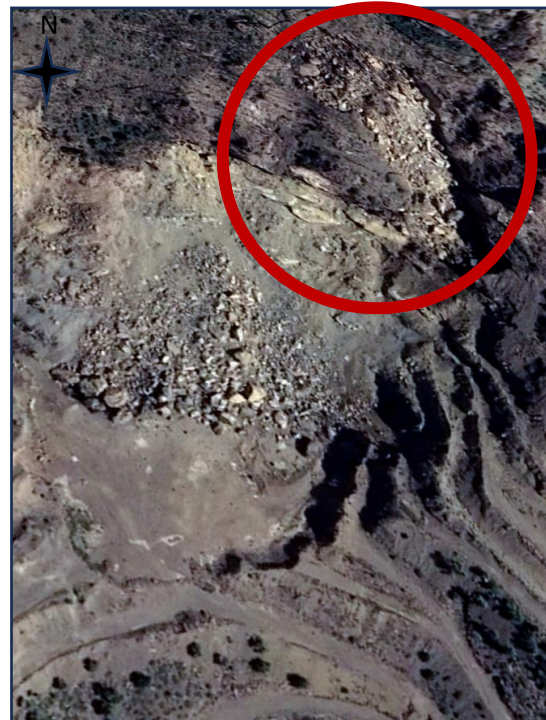


Figure - 22- Niveau 1105 au 3^{ème} Etages [24].

La figure -23- (a) et (b) montre l'évolution des vides naturels avant et après l'effondrement.



(a) Image satellitaire en 2017



(b) Image satellitaire en 2020

Figure - 23- Photo montre l'évolution de glissement de BK II (google earth pro),2024

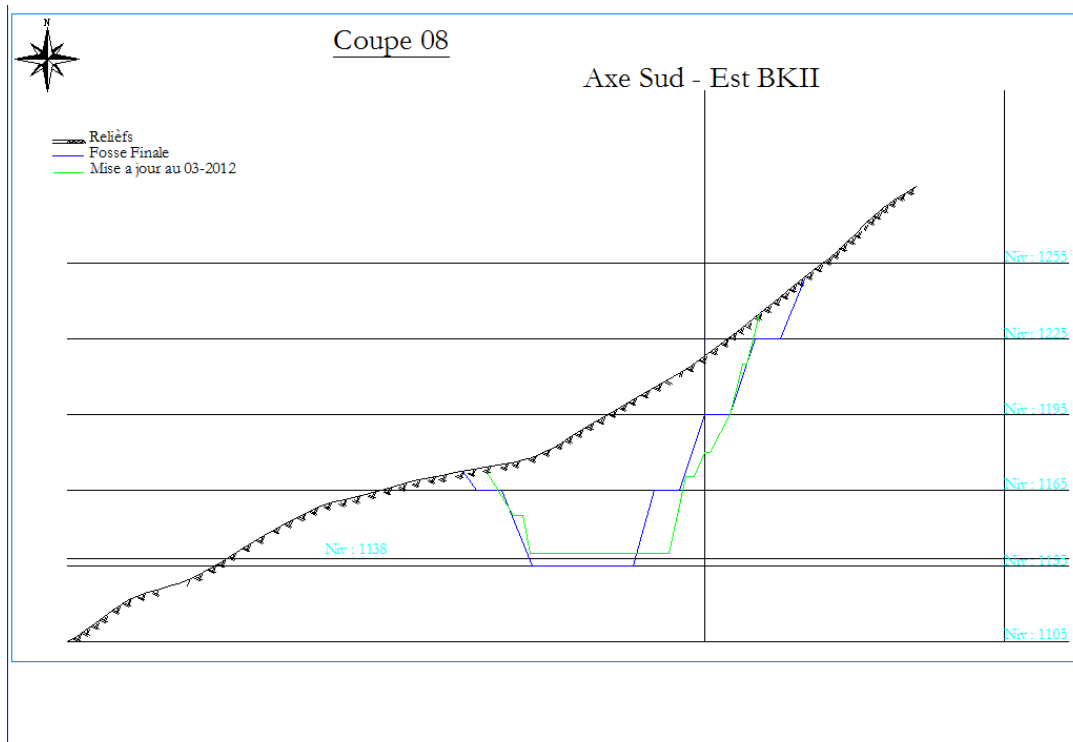


Figure - 24- Coupe 08 [24].

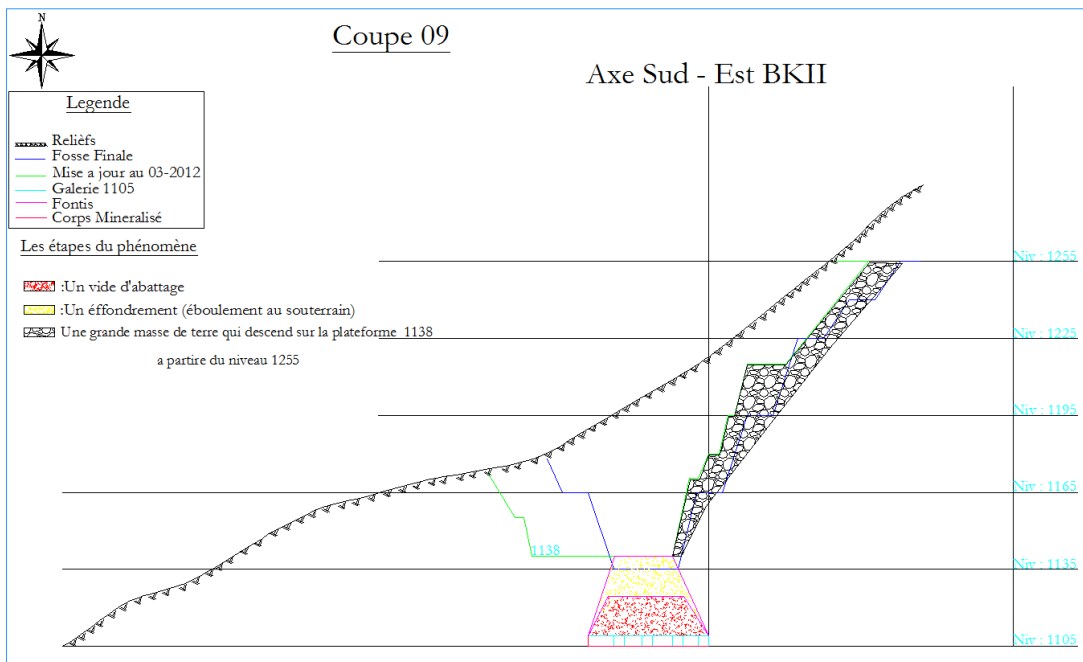


Figure - 25- Coupe 09 [24].

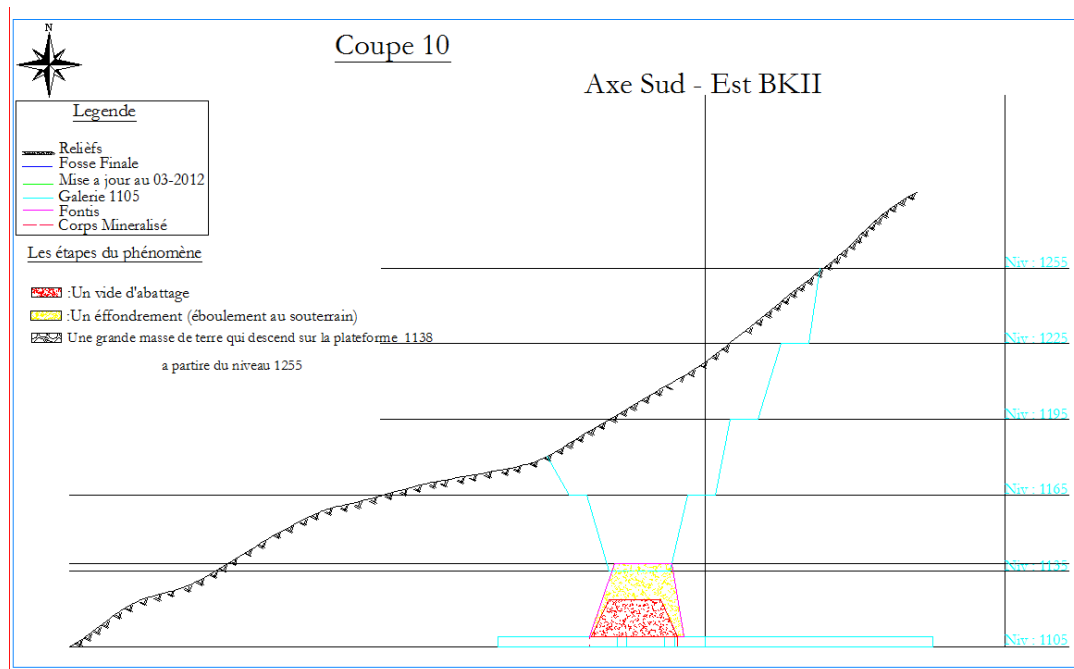


Figure - 26- Coupe 10 [24].

c) Phase 3 :

Le 5 octobre 2019, un effondrement s'est produit dans la carrière BKII, axe sud, entre les coupes 07-08-09-10. La principale cause de cet effondrement, le sol calcaire marneux, a été provoquée par la circulation des eaux pluviales à travers un processus de filtration et d'intercalation des couches de minerai et de marne dans un toit humide, ainsi que par la charge glissante des gradins de BK2. Les gradins, ayant une forme travaillant avec un angle de bord exploitable de 75° et des plates-formes d'environ 43.5 m de largeur, ont contribué à cette situation.

III.2.2.2. Diagnostique sur l'état d'instabilité de BKII :

En récapitulant pour l'instabilité rencontrée dans la mine de Boukhadra, nous pouvons expliquer le mécanisme comme suit :

- une dépression (fossé) naturelle existait en axe sud- est. Il a été observé que cette dépression été le siège d'infiltration des eaux de surface à travers les plans de discontinuité et les fissures du massif (figure -21-(a)),
- pendant l'extraction au niveau 1285, la couche de couverture (toit de la galerie) été mince là où les contraintes de battage dépassèrent la résistance au cisaillement de cette dernière, un effondrement été donc survenu, cet effondrement a contribué à l'évolution de la dépression naturelle dans la carrière BKII (figure -21- b)),
- depuis ce temps, la dépression constituée le siège de la circulation d'eau surtout par infiltration vue la fracturation du massif rocheux, le facteur eau s'ajoute aux secousses des contraintes de battage et à l'existence d'intercalation de niveaux marneux avec les calcaires (figure -4-) pour permettre le développement de la cavité (figure-21-(b)),

- l'extraction souterraine se continuait alors aux niveaux plus bas que le niveau 1135, d'après les figures ... (Figure-25-) le niveau 1135 constitue la frontière entre l'extraction souterraine au-dessous de ce niveau et l'extraction à ciel ouvert au-dessus, au fur et à mesure, sous l'effet des contraintes d'abattage, le développement de la dépression n'a pas cessé sur tout pour les bordures en axe sud-Est, les matériaux s'écoulent dans cet axe vers les gradins du gisement à travers cette dépression en formant un cône d'éboulis au centre de la fosse d'exploitation. Avec l'angle assez élevé (75°) des gradins ainsi que leur hauteur considérable (15 à 35 m), ces éboulis ont constitué un facteur de plus pour affaiblir les gradins et les rendre instable à tout moment (figure -23- (a)),

- En 2019 un éboulement s'est produit en déplaçant de grandes masses rocheuses dans la ligne de pente des gradins de la carrière (axe sud-Est) entraînant avec elle de bonne partie des gradins, localisés entre les coupes 08-09-10 (figure -22- et figure-23-(b)). Il est important de signaler ici que les couches ont un pendage fort vu le phénomène de diapirisme dans la région,

- la masse tombée, et les gradins détruits ont constitué un obstacle qui bloque la circulation des engins au niveau des coupes 08, 09 et 10, et par la suite interruption de l'extraction, la photo dans la figure -32- montre bien la situation de la carrière après l'éboulement.

A notre avis, plusieurs facteurs sont donc réunis pour mettre la carrière dans cette situation : la combinaison des deux types d'exploitation dans des niveaux très proches sans prendre les précautions nécessaires, la force élevée d'abattage au-dessous d'un toit mince, infiltration d'eau à travers la fosse naturelle (dépression), intercalation de couches dures (calcaire) et tendres (marne) avec un pendage fort ce qui rends les plans de discontinuité (stratification) des plans défavorable pour la stabilité, fracturation intense de la roche qui facilite la circulation de l'eau, effondrement du 2012.

A cet effet, et vu la situation de ce site (site rocheux, fracturé, ... etc.), nous avons opté pour une analyse par projection stéréographique pour au moins définir les types de mouvements pouvant avoir lieu dans le cas de ce site. Pour cette analyse nous avons choisi le logiciel DIP, pour la projection stéréographique, ce dernier, prend en considération les mesures des discontinuités (pendage et direction de pendage), les résultats sont exposés ci-dessous.

III.2.3. Application à la mine de Boukhadra :

Pour l'analyse cinématique de la stabilité du talus en question à la mine de Boukhadra, nous avons choisi le logiciel Dips 7.0 de rocsience. Dips est un programme conçu pour l'analyse interactive de données géologiques basées sur l'orientation des discontinuités (joints, fissures, faille,). Le tableau -3- ci-dessous montre les mesures effectuées dans la région affectée par l'instabilité dans la mine de Boukhadra.

Tableau - 3- Orientation des joints dans la zone d'effondrement de la mine de Boukhadra [14].

ID	Orient1	Orient2	Traverse
1	30	130	
2	25	230	
3	26	231	
4	27	229	
5	40	320	
6	45	315	
7	43	310	
8	45	270	
9	50	269	
10	85	30	
11	88	28	
12	89	29	

Le programme est une boîte à outils capable de nombreuses applications, il est conçu à la fois pour l'utilisateur débutant ou professionnel qui souhaite utiliser des outils plus avancés dans l'analyse des données géométriques dans le domaine de l'étude de stabilité des talus rocheux et des mines. Nous utiliserons l'option de Dips7.0 qui traite l'analyse cinématique du talus et définit les modes possibles et leur probabilité d'occurrence. Dans un premier temps on établit un fichier qui contient les données structurales sous forme de pendage/direction de pendage (dip/dip direction) (figure -27-).

Dips - [BKII:1]
 File Edit Analysis Window Help

ID	Dip	Dip Direction
1	30	130
2	25	230
3	26	231
4	27	229
5	40	320
6	45	315
7	43	310
8	45	270
9	50	269
10	85	30
11	88	28
12	89	29
13		
14		
15		
16		
17		

Figure - 27- DIP/DIP DIRECTION

Ensuite on définit le plan dans lequel sont prises les mesures (traverse), et on trace le grand cercle et le pôle du talus en question. Le logiciel fait automatiquement la représentation stéréographique des données et les fait sortir tel que montré sur (Figure - 28-)

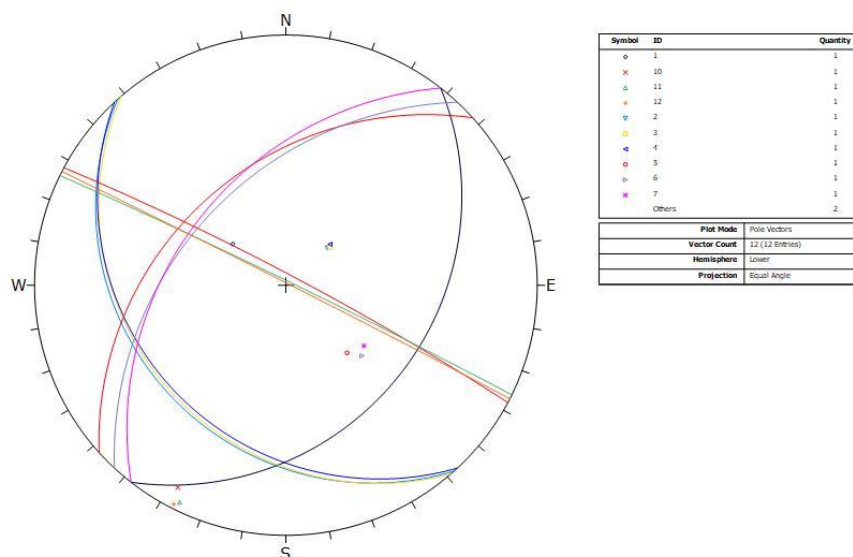


Figure - 28- représentation stéréographique des données structurales dans la zone d'effondrement (Zerough M. L., 2024).

L'analyse cinématique nous montre les différents modes de rupture possible. On note que nous avons choisi une valeur arbitraire, mais commune pour les calculs, de 35° comme angle de frottement entre les plans rocheux.

La figure -29- illustre une analyse cinématique du glissement plan des blocs rocheux à l'aide d'un diagramme stéréographique. Le diagramme identifie plusieurs zones

critiques et limites pour évaluer la stabilité des pentes rocheuses. Voici une interprétation détaillée des différentes zones indiquées :

1. Zone des vecteurs polaires critiques pour le glissement plan (Critical Pole Vector Zone for Planar Sliding) : Cette zone (indiquée en rouge) montre les orientations et les inclinaisons des plans de fractures où le glissement plan est probable. Les vecteurs polaires dans cette zone indiquent les directions de fractures qui peuvent potentiellement glisser sous l'effet de la gravité.

2. Plan de pente (Slope Plane) : Ce plan représente l'inclinaison de la pente sur laquelle reposent les blocs rocheux. La direction et l'inclinaison de ce plan sont des facteurs essentiels pour évaluer la stabilité et la possibilité de glissement des blocs.

3. Cône de friction des pôles (Pole Friction Cone) : Cette région délimite l'angle de friction interne des matériaux rocheux. Les vecteurs polaires situés à l'intérieur de ce cône sont moins susceptibles de glisser en raison de la résistance au cisaillement fournie par la friction.

4. Limites latérales (Lateral Limits) : Ces limites indiquent les bordures extérieures de la zone critique de glissement. Elles délimitent la région où les vecteurs polaires des plans de fractures peuvent encore potentiellement contribuer à un glissement plan.

5. Enveloppe de lumière du jour (Daylight Envelope) : Cette zone indique les orientations des fractures qui peuvent apparaître à la surface de la pente. Les fractures situées dans cette enveloppe ont une probabilité plus élevée de se détacher et de glisser, car elles ne sont pas retenues par d'autres masses rocheuses au-dessus.

Ces zones permettent de déterminer les risques de glissement et d'identifier les orientations des fractures qui nécessitent une attention particulière pour la stabilité des pentes rocheuses. Cela aide à la mise en place de mesures de prévention pour éviter les glissements et les effondrements.

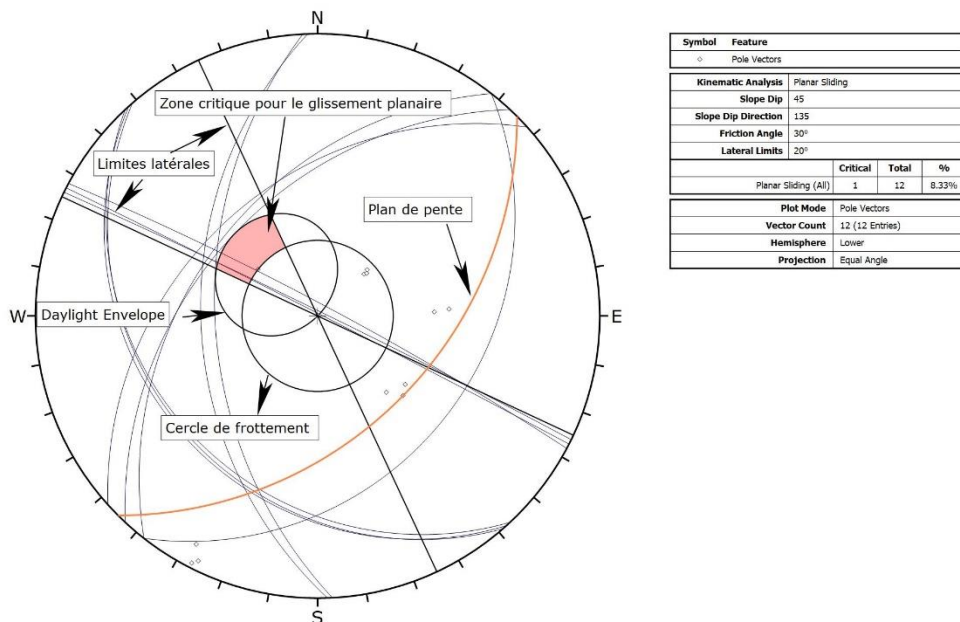


Figure - 29- Schéma montrant la zone ou les plans de rupture possibles sont plans (zone rouge) (Zerough M. L., 2024).

La figure -30- représente une analyse cinématique du glissement en coin des blocs rocheux à l'aide d'un diagramme stéréographique. Le diagramme identifie plusieurs zones critiques et limites pour évaluer la stabilité des pentes rocheuses. Voici une interprétation détaillée des différentes zones indiquées :

- 1. Zone critique pour le glissement en coin (Critical Zone for Wedge Sliding) :** Cette zone (indiquée en rouge et jaune) montre les orientations et inclinaisons des plans de fractures où le glissement en coin est probable. Les intersections des plans de fractures dans cette zone indiquent les directions susceptibles de subir un glissement en coin.
- 2. Plan de pente (Pit Slope) :** Ce plan représente l'inclinaison de la pente sur laquelle reposent les blocs rocheux. La direction et l'inclinaison de ce plan sont des facteurs essentiels pour évaluer la stabilité et la possibilité de glissement en coin des blocs.
- 3. Cône de friction des plans (Plane Friction Cone) :** Cette région délimite l'angle de friction interne des matériaux rocheux. Les vecteurs polaires situés à l'intérieur de ce cône sont moins susceptibles de glisser en raison de la résistance au cisaillement fournie par la friction.
- 4. Intersections des plans moyens (Mean Set Plane Intersections) :** Cette zone montre les points d'intersection des plans de fractures moyens. Ces intersections sont critiques pour déterminer les orientations des blocs rocheux susceptibles de glisser.

Ces zones et vecteurs permettent de déterminer les risques de glissement en coin et d'identifier les orientations des fractures qui nécessitent une attention particulière pour la stabilité des pentes rocheuses. Cela aide à la mise en place de mesures de prévention pour éviter les glissements et les effondrements.

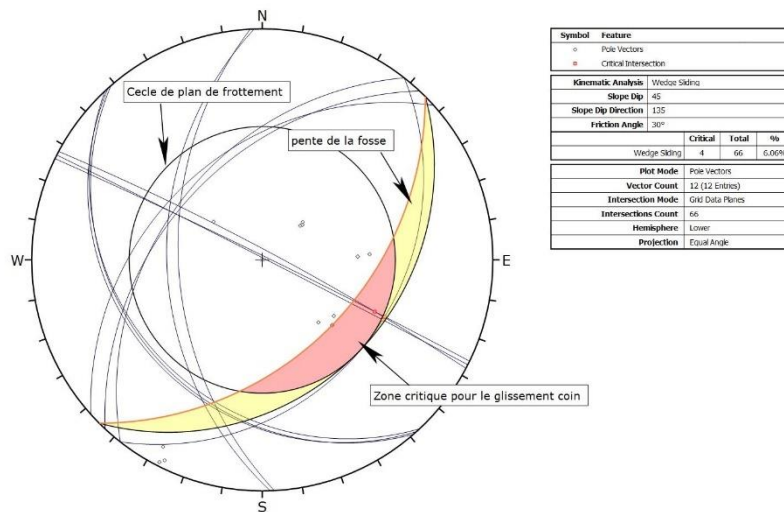


Figure - 30- Schéma montrant le lieu des ruptures de coins possibles (Zerough M. L., 2024).

La figure -31- représente une analyse cinématique du renversement direct des blocs rocheux à l'aide d'un diagramme polaire. Cette analyse prend en compte plusieurs critères simultanément. Voici une interprétation précise des trois zones identifiées dans le schéma :

1. Zone de l'intersection critique pour le renversement direct (Critical Intersection Zone for Direct Toppling) : Cette zone (indiquée en rouge) montre les orientations et inclinaisons des plans de fractures où le renversement direct des blocs rocheux est probable. C'est une région critique où les plans de fractures peuvent mener à un renversement direct sous l'effet de la gravité.

2. Plan de pente (Slope Plane) : Ce plan représente l'orientation de la pente sur laquelle les blocs rocheux reposent. La direction et l'inclinaison de ce plan sont des facteurs déterminants pour évaluer la stabilité des blocs rocheux et leur potentiel de renversement.

3. Zone de renversement oblique et du plan de base (Oblique Toppling and Base Plane Zone) : Cette zone (indiquée en orange) montre les conditions où le renversement des blocs rocheux se produit de manière oblique, c'est-à-dire avec une composante de cisaillement le long d'un plan de base. Cette situation se produit lorsque les plans de fractures ne sont pas parfaitement alignés avec la pente principale mais ont une certaine inclinaison qui favorise le renversement oblique.

Ces zones sont cruciales pour l'évaluation des risques de renversement dans les sites géologiques et aident à la mise en place de mesures de prévention adéquates pour assurer la stabilité des pentes rocheuses.

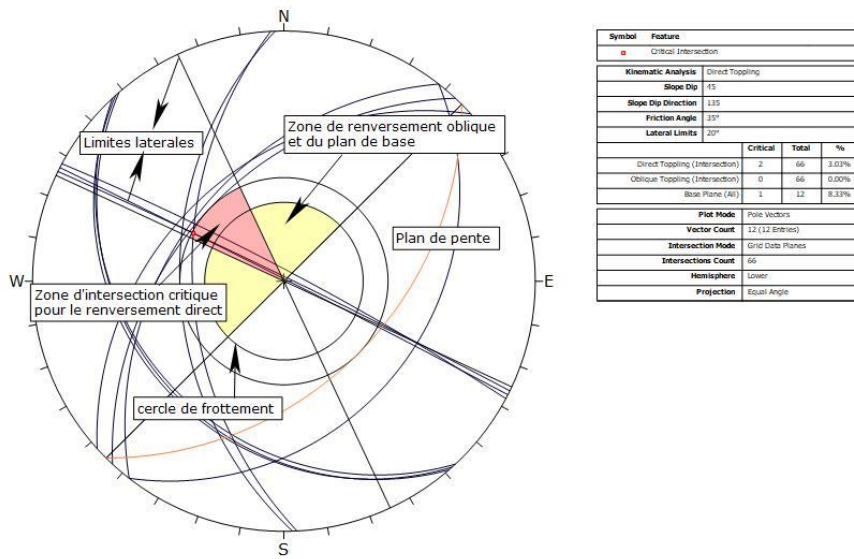


Figure - 31- Schéma montrant le lieu des ruptures possibles par renversement direct (Zerough M. L., 2024).

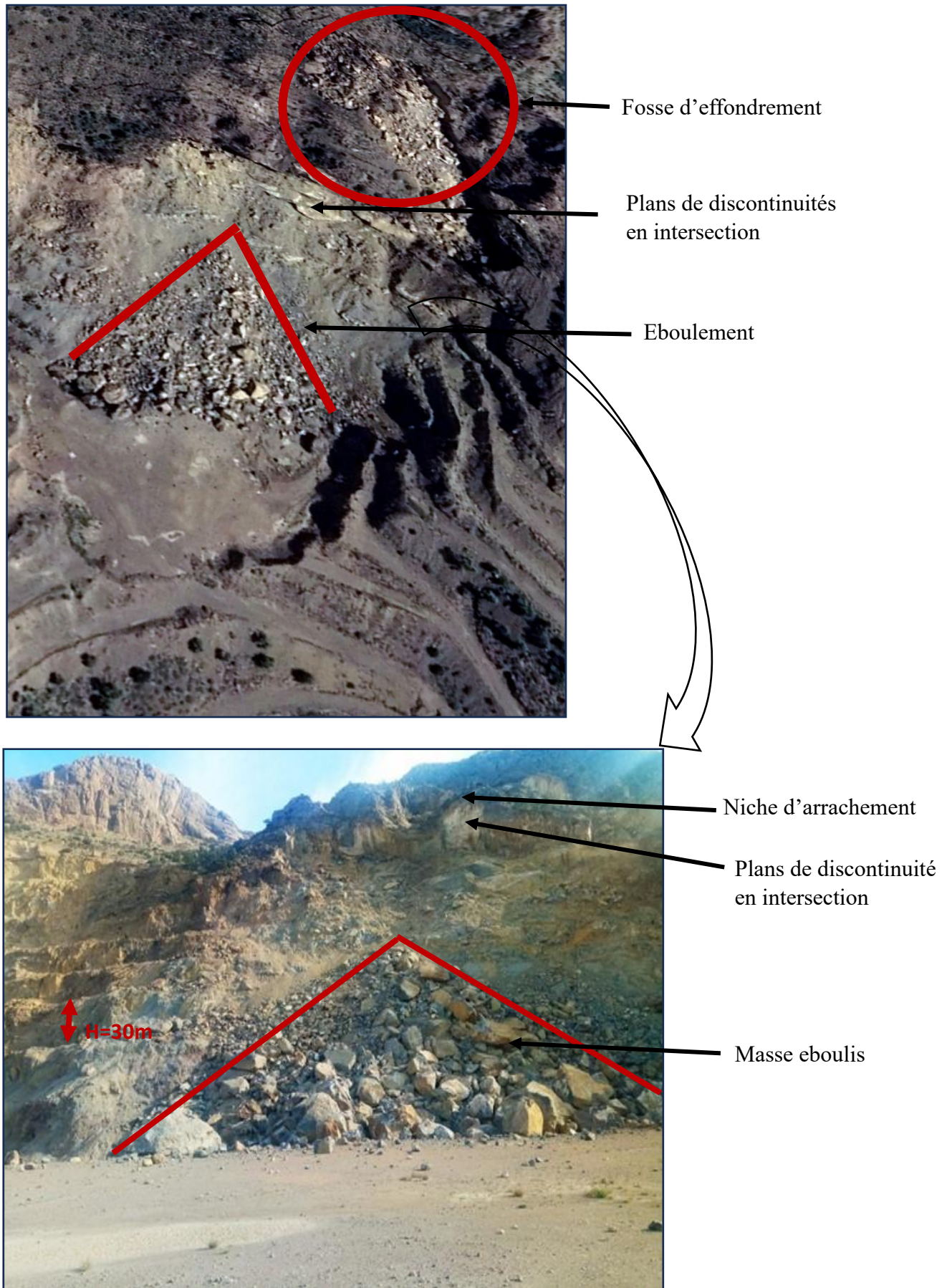


Figure - 32- : Photo montrant les gradins instables BK2, de la mine de Boukhadra (google earth pro,2024)

III.2.4. Interprétation des résultats :

D'après les résultats des projections stéréographiques on constate que la probabilité d'occurrence des glissements plan et des glissements par basculement sont les plus élevés (8%) comme c'est observé dans les figures -29- et -31- par contre la rupture des coins (wedge sliding) est la moins fréquente par une probabilité d'occurrence de 6% (figure -30-), mais à ne pas exclure. Pour cette raison il est recommandé, pendant l'ouverture de nouvelle carrière, de bien prendre en considération la direction et le pendage des plans de discontinuité (plan de stratification, plan de faille, diaclases, fracturation) l'intersection des différents plans des discontinuités et le pendage topographique. La direction des couches doit être prise en considération pendant l'ouverture de la fosse d'exploitation à ciel ouvert, car elle joue un rôle important dans la stabilité des gradins malgré que ceci est lié à la rentabilité de l'extraction du corps minéralisée.

Dans le cas de la fosse de BKII affectée par l'instabilité, et suite à la comparaison entre les observations sur le terrain et les connaissances théoriques, il est discerné que la rupture qui a affecté les gradins de la mine de BKII est de type rupture par renversement. Cette conclusion résulte de l'analyse minutieuse des données recueillies sur le terrain, juxtaposée à la compréhension théorique des mécanismes de rupture dans ce contexte spécifique ainsi que l'analyse cinématique des mouvements à l'aide du logiciel Dips 7.0.

En fin même après l'acquisition de certains résultats à l'aide de Dips 7.0 on peut signaler que pour une application plus satisfaisante il faut réaliser une série de mesures plus précieuses pour avoir des résultats adéquates avec ce logiciel.

III.3. Cas de la mine de Kef Essnoun :**III.3.1. Analyse de stabilité :****III.3.1.1. Aperçu du champ de Kef Essnoun :**

Le gisement de phosphate à Kef Essnoun est significatif. L'exploitation et le traitement de son minerai sont accordés une priorité et un caractère stratégique en raison de sa proximité avec les installations de traitement existantes, de la qualité de son minerai, de ses réserves de qualité industrielle et de ses critères d'ouverture technologique.

III.3.1.2. Caractéristiques géo-minières de Kef Essnoun :

Les caractéristiques géo-minières ont été déterminées par le CERAD et sont résumées comme suit :

- Présence d'une tectonique significative au nord (zone de dressant),
- Bonne qualité de minerai (une moyenne de 26,53 % de P2O5 et faible en MgO avec une teneur moyenne de 2,61 %),
- Sa simplicité opérationnelle (profondeur inférieure à 100 m, puissance élevée de (25 à 35 m),
- Accès facile à d'autres parties (extension et avancement).

III.3.1.3. Méthodes et paramètres de la fosse à ciel ouvert :

La mine de Kef-Essnoun est une mine à ciel ouvert qui ressemble à une fosse avec plusieurs gradins ; le facteur de récupération est d'un à deux ; par conséquent, deux gradins de roche stérile doivent être enlevés pour chaque gradin de minerai retiré.

III.3.1.4. Paramètres d'exploitation :

Les paramètres d'exploitation choisis pour la fosse sont présentés dans le tableau -4-, en tenant compte des conditions géomorphologiques du gisement et des suggestions de DMT (direction des mines de Tébessa).

Tableau - 4- : Tableau récapitulatif des paramètres d'exploitation des paramètres opérationnels. [16].

DESCRIPTION	Marne	Stérile	Phosphate
HAUTEUR DES MARCHES EN (m)	15	15	15
ANGLE DE LA PENTE EN (degrés)	30	70	70
BERME DE SÉCURITÉ EN (m)	/	Mini6	Mini6
PLATE-FORME DE TRAVAIL EN (m)	≥ 40	≥ 40	≥ 40
LA LARGEUR DE LA TRANCHE EN (m)	20	20	20
L'ÉVOLUTION DU MAXIMUM DE LA TRANCHÉE EN (m)	/	300	300
PENTE MAXIMALE EN (%)	10		

III.3.1.5. Paramètres géomécaniques :

En règle générale, l'étude géotechnique a adopté une approche prudente impliquant l'utilisation de paramètres prudents pour la masse rocheuse. Les paramètres du plan de glissement ont été calculés a posteriori à partir du modèle d'étalonnage. L'indice de résistance géologique (GSI) a été appliqué aux paramètres de la roche intacte pour tenir compte de la présence de fissures dans la structure de la masse rocheuse ainsi que des conditions en affleurement selon le critère HOEKBROWN. Ce coefficient de réduction a été estimé en se fondant sur différentes visites du site (Figure -33-) [15].

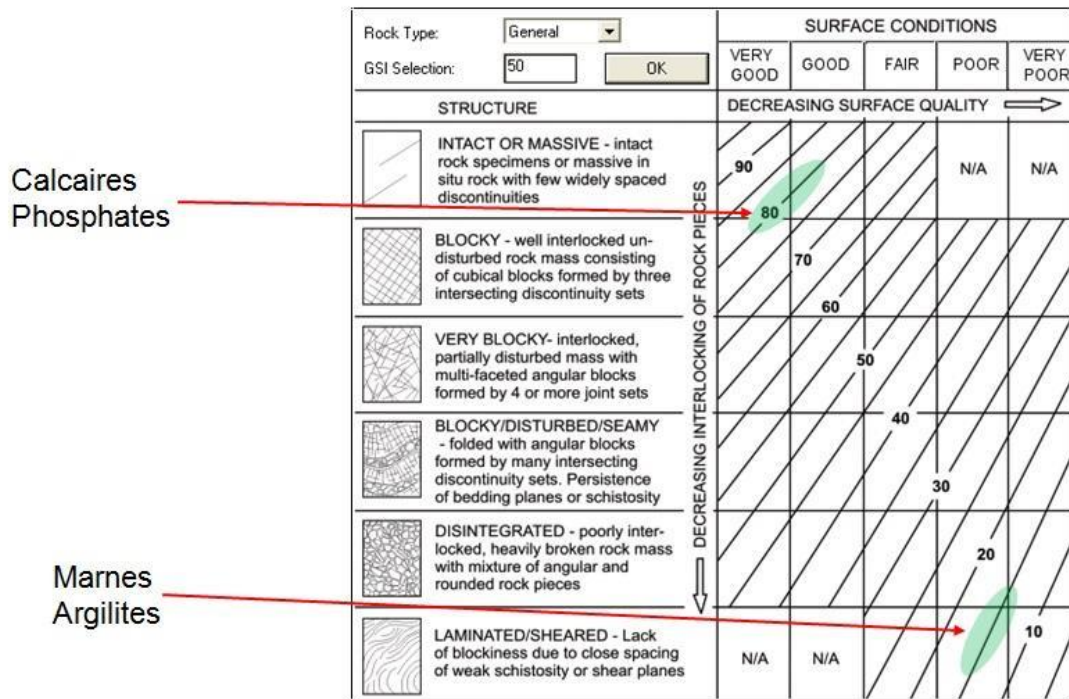


Figure - 33- Classification en vue de la réduction des paramètres relatifs à la roche [15]

Les paramètres utilisés dans les calculs sont présentés sur le tableau -5- ci-dessous.

Tableau - 5- Paramètres géotechniques utilisés dans les calculs de stabilité des pentes [15]

Masse rocheuse	Densité	Force de la roche intacte	GSI (Hoek-Brown)	Force de la masse rocheuse	Angle de friction	Angle de friction utilisé pour calculs	Cohésion	Cohésion utilisée pour calculs
	kg/m ³	MPa		MPa	°	°	MPa	MPa
Quarternaire	2000	-	-	-	35	35	<= 0,005	0
Sables	2000	-	-	-	37,5	37,5	<= 0,010	0
Calcaires toit	2700	60	80	22	37	37	5,4	2,7
Phosphate	2100	25	80	9	37	37	2,3	1,15
Argilites et marnes	2300	8	15	0,4	16	15	0,16	0
Calcaires mur	2700	40	80	14	37	37	3,6	1,8
Faïlle	1900	-	-	-	32,5	32,5	0,002	0
Remblais	2100	-	-	-	32,5	32,5	0,002	0

Rétro-analyse

Réduction par un coefficient de sécurité 1,1 (tan φ/1,1)

Réduction par un coefficient de sécurité de 2

III.3.2. Aperçu sur les différents glissements dans la mine de Djebel Onk :**a) Glissement dans la nouvelle fosse Nord-Ouest (glissement récente) :**

Le 07/09/2022, un glissement de terrain s'est produit dans la nouvelle fosse de Kef Essnoun, ce n'était pas un glissement catastrophique mais plutôt de moyenne envergure (profondeur est superficielle), il a touché deux gradins (figure -34- a et b). Il n'était pas surprenant en raison de surveillance et aussi par le calcul de facteur de sécurité, qui a donné une valeur de $F_s=1.06$ (figure-41-), on peut conclure que ce glissement été potentiel et attendu à tout moment.

Ce glissement a été traité en décapant une bonne partie de la masse glissée, le reste a été terrassé et nivelé avec le niveau du gradin inférieur (figure -35-)

Il a été remarqué que le plan de ce glissement a touché l'interface marne-phosphate dans la paroi nord de la carrière nord-ouest de la mine de Kef-Essnoun.

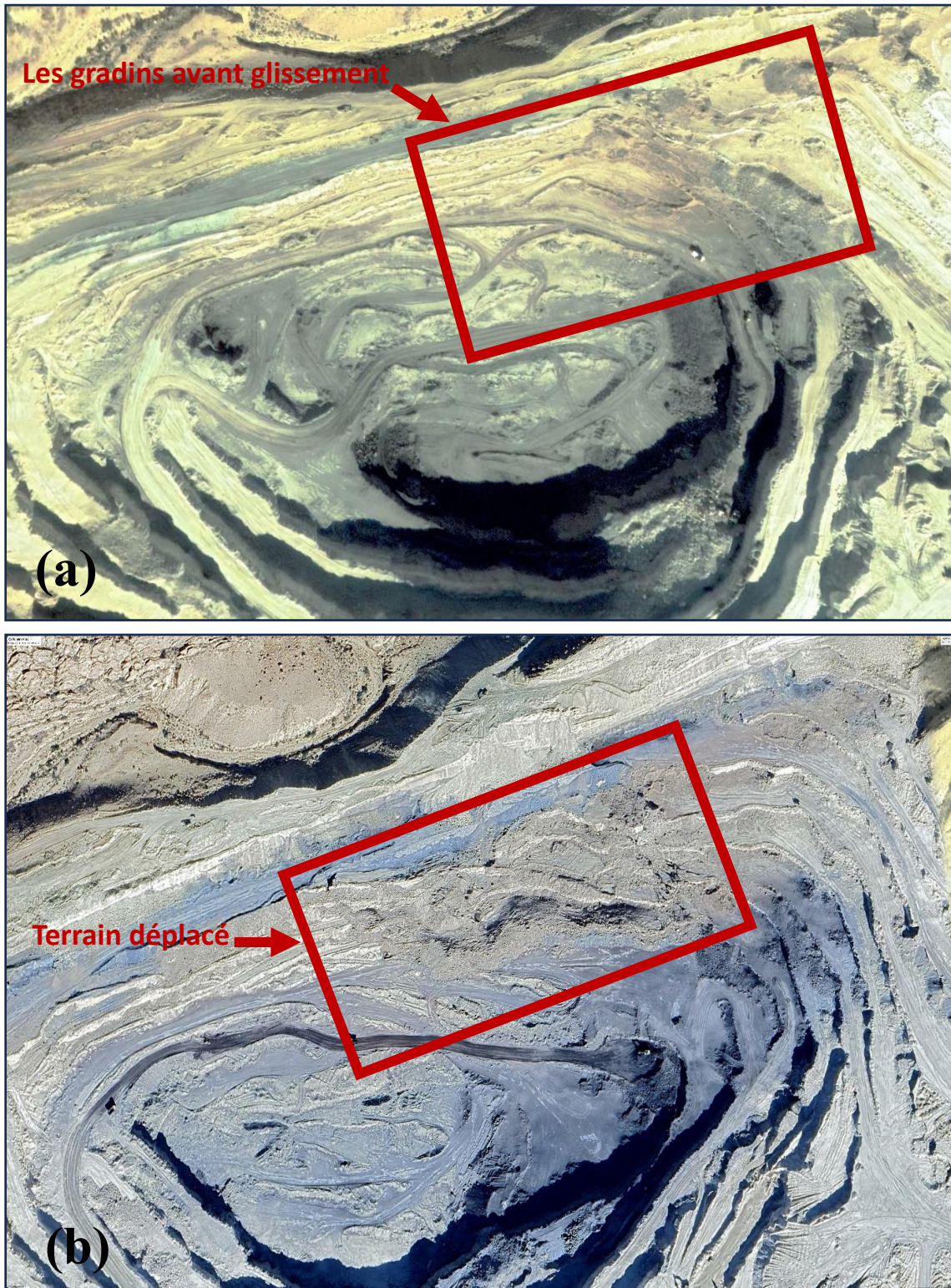


Figure - 34- photos montrant la zone avant et après le glissement de la nouvelle fosse de Kef-Essnoun (a) : les gradins avant le glissement, (b) : les gradins après le glissement. Google earth Pro (2024).



Figure - 35- l'état actuel de la nouvelle fosse nord-ouest de Kef-Essnoun après décapage de la masse glissée (photo du 02/2024).

b) Glissement de la fosse Nord-est (ancien glissement) :

Le 8 septembre 2007, un glissement de terrain s'est produit à la carrière (bord Nord-Est) de la mine de phosphate de Kef Essnoun (figure -36-), qui fait partie de Djebel Onk (Bir El Ater à Tébessa, Nord-Est de l'Algérie). Le glissement de terrain a mobilisé une masse rocheuse constituée d'une couche de phosphate, qui était recouverte de calcaire. Un terrain instable occupe toute la fosse minière avec un volume de plus de 6 Mm³. En raison de ce problème, l'opération et le travail de production ont été temporairement arrêtés pendant une longue période. Le glissement a été l'objet de plusieurs études tel que l'étude établie par SOMIPHOS en 2007 figure 37 ainsi celle de : Abid A. et al. en 2020, Bakkar H. et al. en 2020 et Makhoulouf B en 2021 où des analyses de stabilité des massifs rocheux de Kef-Essnoun ont été établies par différentes méthodes et selon l'objectif de chaque étude. Des enquêtes ont été lancées pour

résoudre le problème et d'autres méthodes ont été recherchées pour reprendre les travaux à la mine de Kef Essnoun. La recherche d'autres alternatives a été imposée et par la suite, l'ouverture d'une nouvelle fosse a été indispensable. Les travaux sont accentués sur le côté Nord-ouest de Kef-Essnoun ou des travaux de conception pour les gradins ont été effectués. Des travaux de modélisation vis-à-vis de la stabilité ont été aussi établis, nous citons dans ce cas le travail Alal I. et al. En 2020.

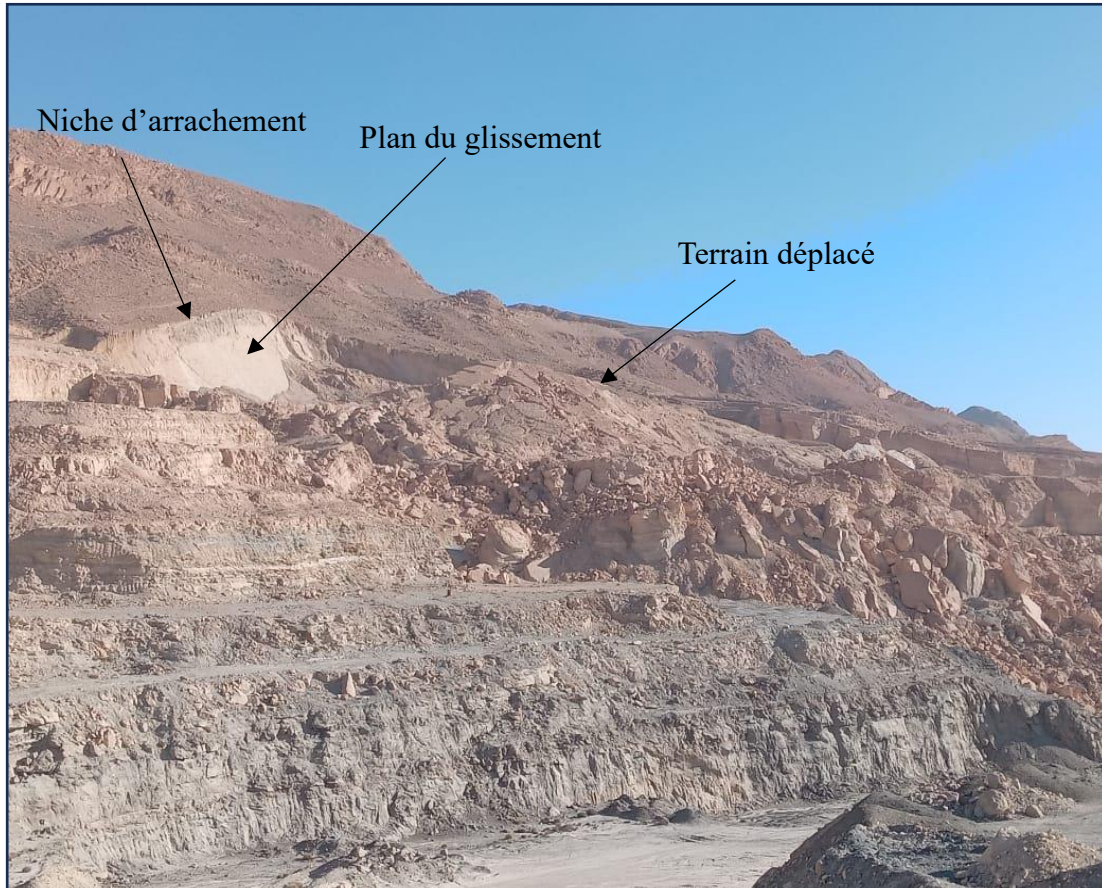


Figure - 36- Photo montrant le glissement affectant la carrière de Kef Essnoun (ancienne fosse Nord-est), (photo du 02/2024).

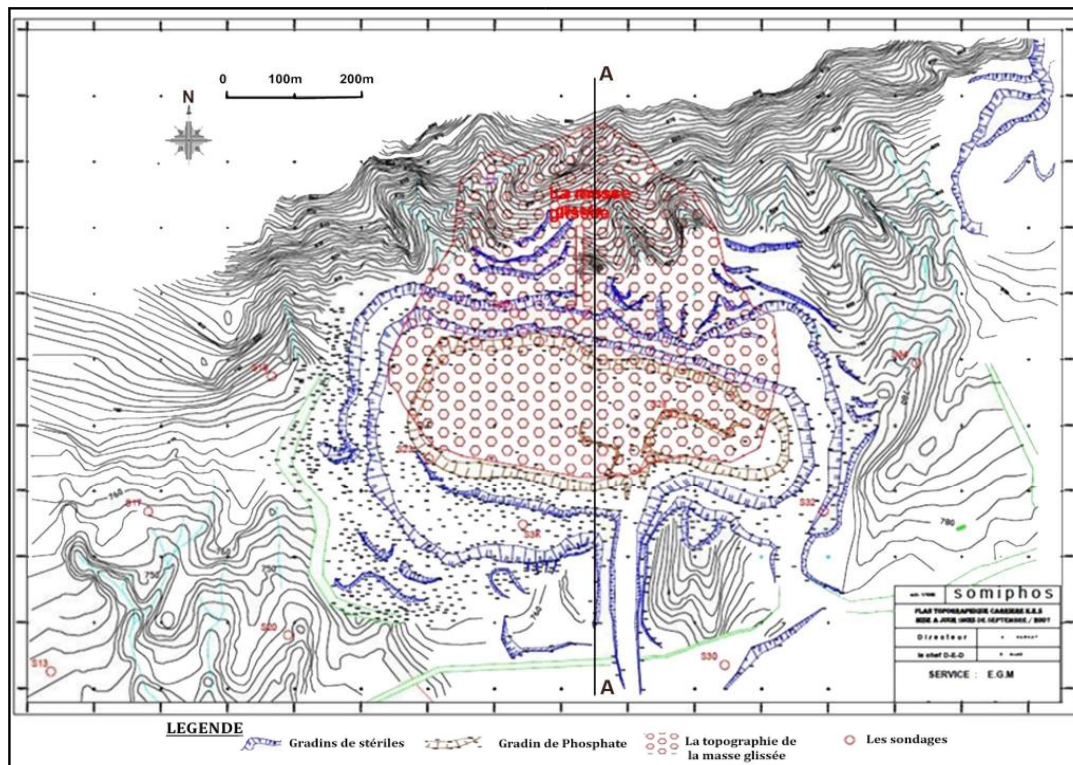


Figure - 37- Cartographie du glissement de la fosse Nord-est de Kef-Essnoun et mise à jour de la topographie (SOMIPHOS, 2007)

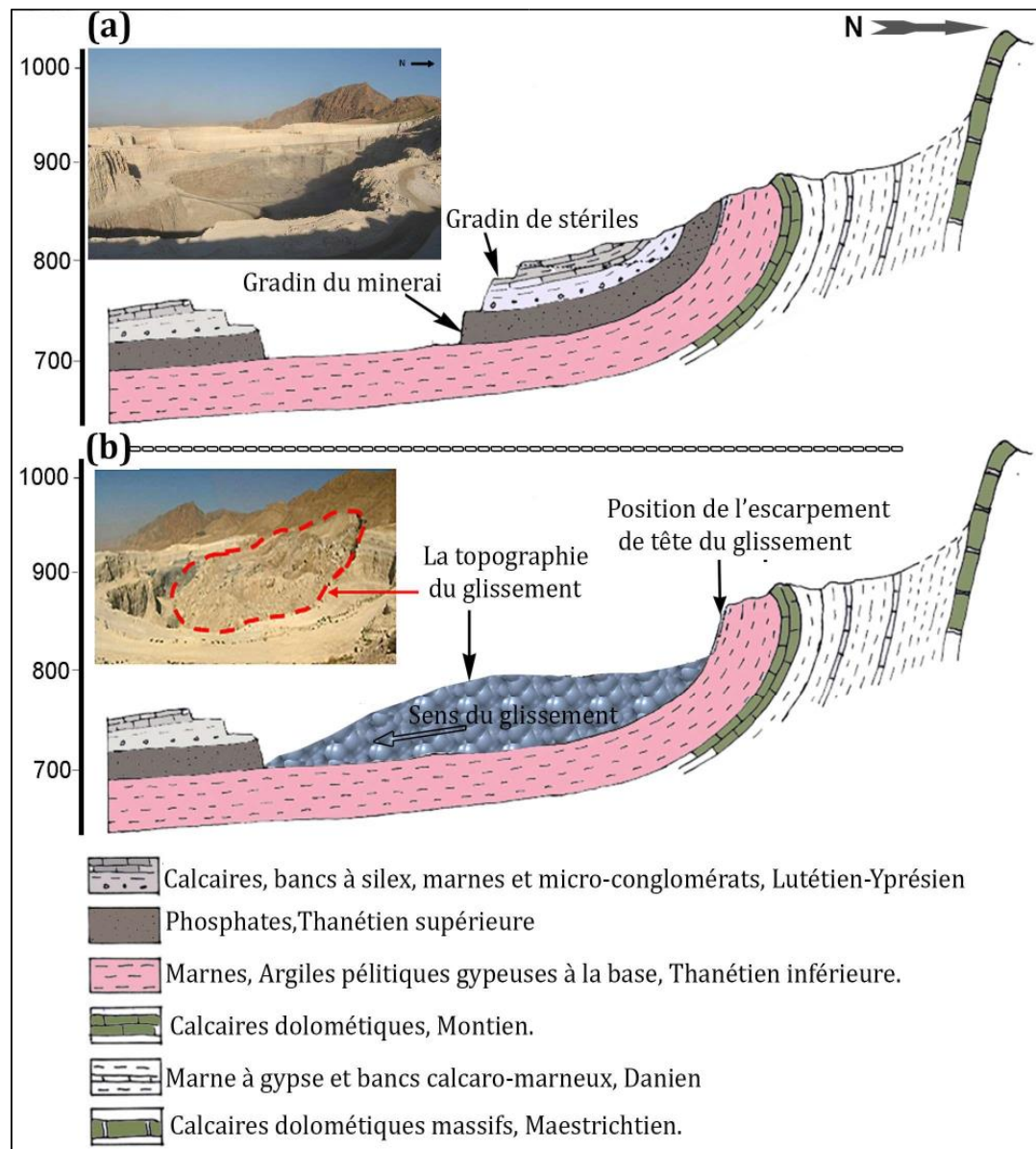


Figure - 38- Coupe géologique (A-A) Nord-Sud de la carrière de Kef-Essnoun (a) Avant le glissement et (b) Après l'ancien glissement de la fosse Nord-est [17].

III.3.3. Analyse de stabilité pour les glissements de Kef-Essnoun :

Pour évaluer la stabilité des pentes, le calcul de facteur de sécurité (F_s) est indispensable. Ce calcul fait référence au rapport entre les forces motrices et les forces de résistances. Les valeurs du facteur de sécurité peuvent être utilisées pour évaluer la stabilité de la pente, comme indiqué dans le tableau -6- ci-dessous.

Tableau - 6- : Équilibre des pentes basé sur la valeur théorique du facteur de sécurité [19].

Facteur de sécurité F_s	État des travaux.
$F_s < 1$	Danger.
$F_s = 1$	Stabilité limite
$F_s \in]1, 1.25 [$	Sécurité douteuse
$F_s \in]1.25, 1.40 [$	Une sécurité satisfaisante pour les travaux mineurs, mais en revanche, la sécurité des pentes des carrières à ciel ouvert est discutable.
$F_s > 1.4$	Sécurité satisfaisante

III.3.3.1. Paramètres des calculs :

Les paramètres pris en considération dans notre cas d'étude sont les suivants :

➤ Paramètres géologiques :

Quatre formations géologiques ont été considérées dans les calculs :

- Le calcaire supérieur de l'Yprésien.
- Le phosphate du Thanetien supérieur.
- La marne du Thanetien inférieur.
- Le calcaire inférieur du Montien.

➤ Paramètres géotechniques :

Les paramètres géotechniques prenant en compte pour le calcul des coefficients de sécurité de la partie Nord-Ouest de la carrière Kef Essnoun ont été déterminés par DMT. Ils sont mentionnés dans le tableau suivant (voir tableau -7-)

Tableau - 7- : les paramètres géotechniques des formations de Kef-Essnoun

Formation géologique	Poids volumique en KN/m_3	Angle de frottement interne en ($^\circ$)	Cohésion en KN/m_2
Calcaire supérieur de l'Yprésien	26.50	37	2700
Phosphate	20.60	37	1150
Marne	22.60	15	0
Calcaire inférieur du Montien	26.5	37	1800

Pour le calcul du coefficient de sécurité dans le cas de Kef-Essnoun nous avons utilisé les deux logiciels : Géo-studio et Slide 7.0.

III.3.3.2. Partie Nord-ouest de la carrière de Kef Essnoun :

Le calcul des coefficients de sécurité a été effectué avec le logiciel GEOSLOP (méthode Morgenstern-Price).

La modélisation des talus analysés correspond au tracé des coupes géologiques passant à travers les plates-formes d'exploitation (partie sud) et par les calcaires et les marnes les plus pentus dans la zone dressant.

L'emplacement et les distances entre les coupes sont mentionnés dans la figure ci-dessous. Figure (-40-).

Nous avons appliqué calcul de coefficient de sécurité sur la coupe 1-1 qui a été réalisé après la conception des gradins et avant le glissement de 2022, là où la valeur 1.06 de F_s montre bien l'état limite du site donc une instabilité potentiel est bien nette. (Figure-41-).

Il est intéressant de signaler que ce glissement a eu lieu effectivement en septembre 2022 comme c'est déjà évoqué ci-dessus. Heureusement la profondeur du glissement a été limitée à l'interface marne-phosphate et n'a pas atteint l'interface marne-calcaire plus profond comme c'est obtenu par le calcul. Après ce glissement une solution a été opté par la direction de la mine elle consistait au décapage de la masse glissée et au nivellement du terrain. Heureusement cette solution a été adéquate vue l'envergure limitée en masse et en profondeur du glissement. Des mises au jour de la topographie ainsi que des coupes (modèle géologique) du terrain ont été également établis (figures 40 et 42). Nous remarquons que le changement de la topographie de la carrière été modeste ceci est dû bien sûr au petit volume de glissement.

Pour affirmer l'effet positif de cette solution sur la stabilité des gradins, nous avons établis un autre calcul sur la même coupe dont la mise à jour a été effectuée après la solution de décapage, (figure 43). De même les coupes passant par les gradins supérieurs ont été inclus dans notre calcul de coefficient de sécurité par GEOSLOP (figures 44, 45 et 46), on remarque que les valeurs de coefficient de sécurité (F_s) révèlent un état stable pour le site.

Pour l'ancien glissement nous avons établis le calcul sur la seule coupe acquise au niveau de la direction de la mine (figure -48-), la valeur de coefficient de sécurité F_s montre bien sur l'état de l'instabilité bien nette.

La solution appliquée pour cette fosse est de procéder au remblaiement de la fosse pour stopper l'évolution du mouvement vers le bas de la fosse (Figure-39-).

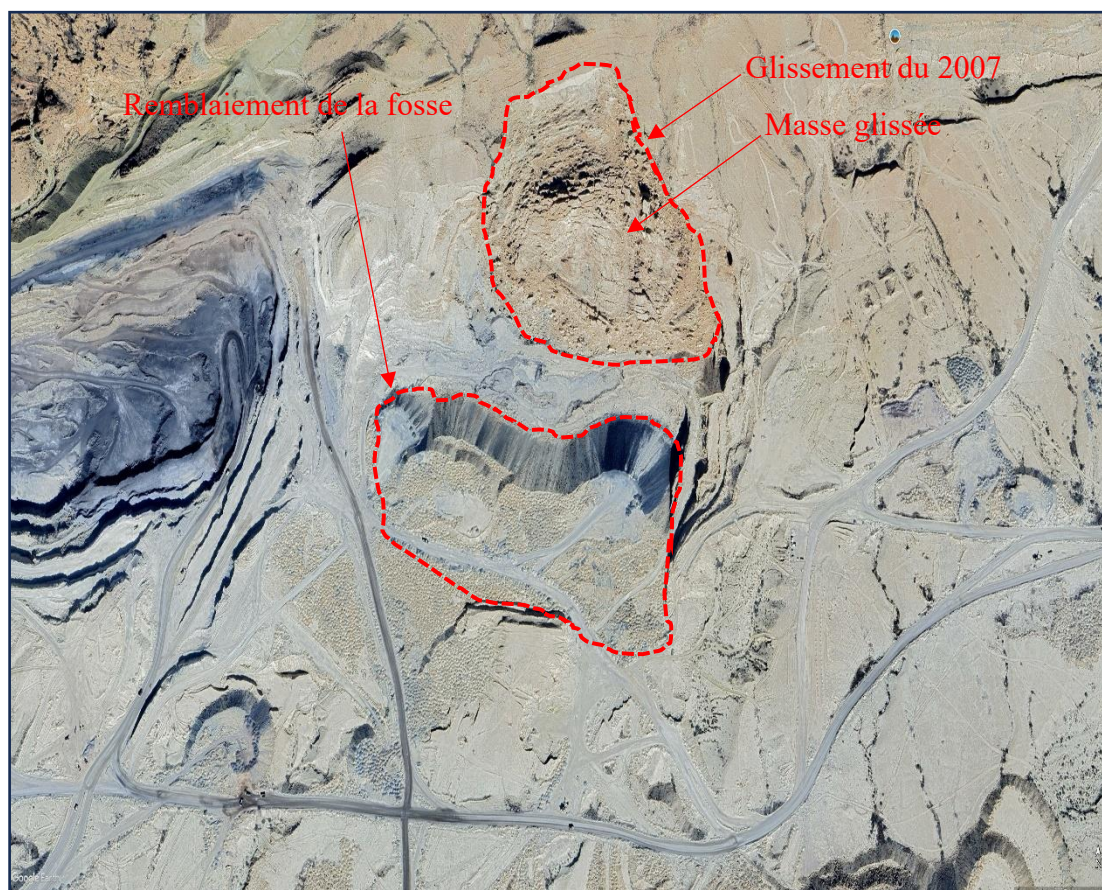


Figure - 39-Photo satellitaire de l'ancienne fosse Nord-est de Kef-Essnoun avec les remblais (état actuel). Google earth Pro (2024).

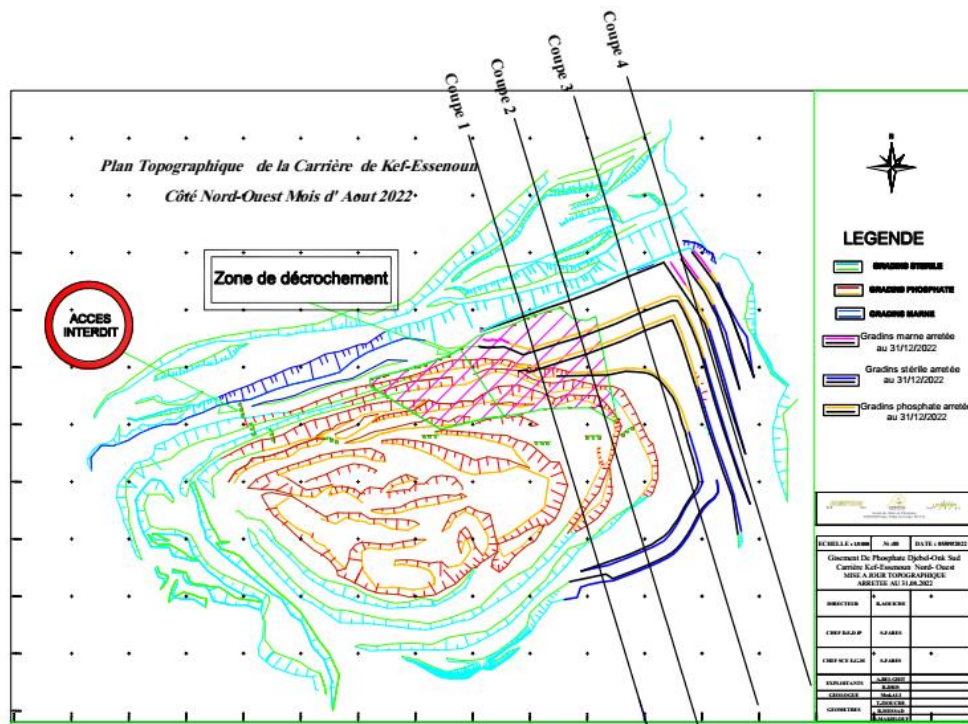


Figure - 40- Plan topographique de la carrière de Kef-Essnoun coté Nord-Ouest d'Aout 2022 [16].

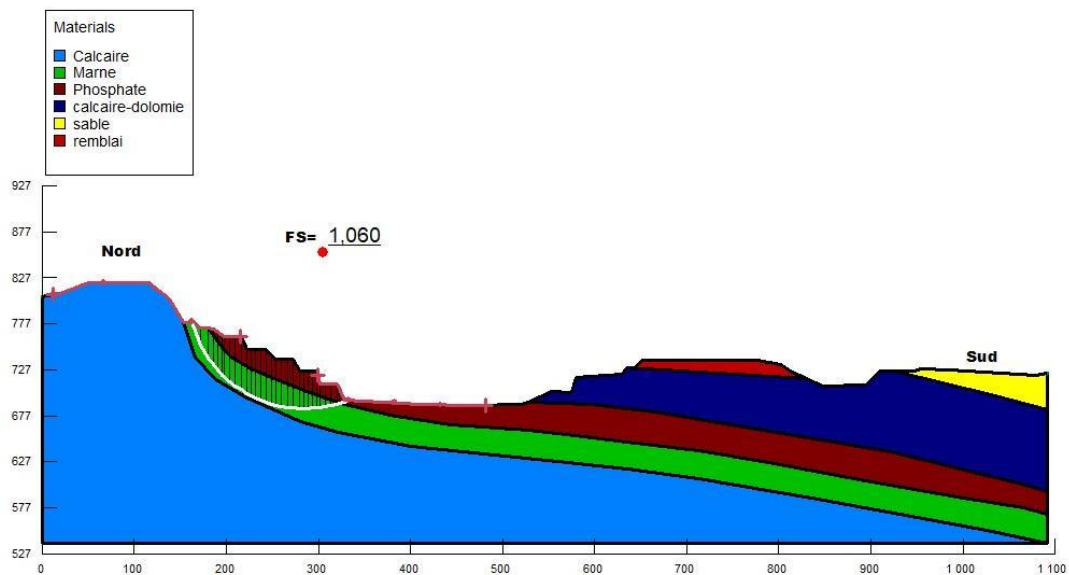


Figure - 41- La surface du glissement avant le glissement en 2022 de la nouvelle fosse Nord-Ouest, (Zerough M. L., 2024).

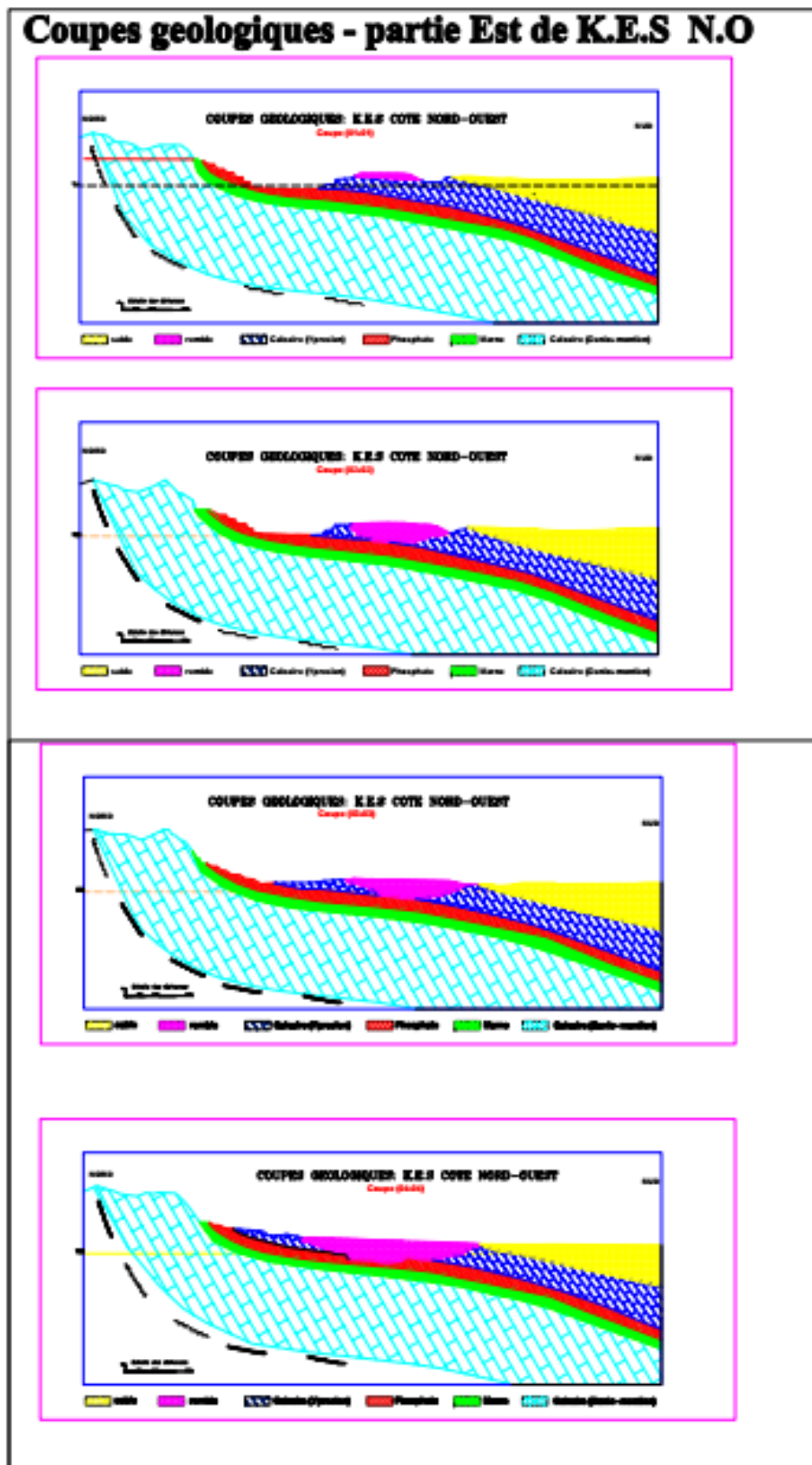


Figure - 42- Coupes géologiques de la carrière de Kef Essnoun partie Nord-Ouest après le décapage de la masse glissée en 2022 [16].

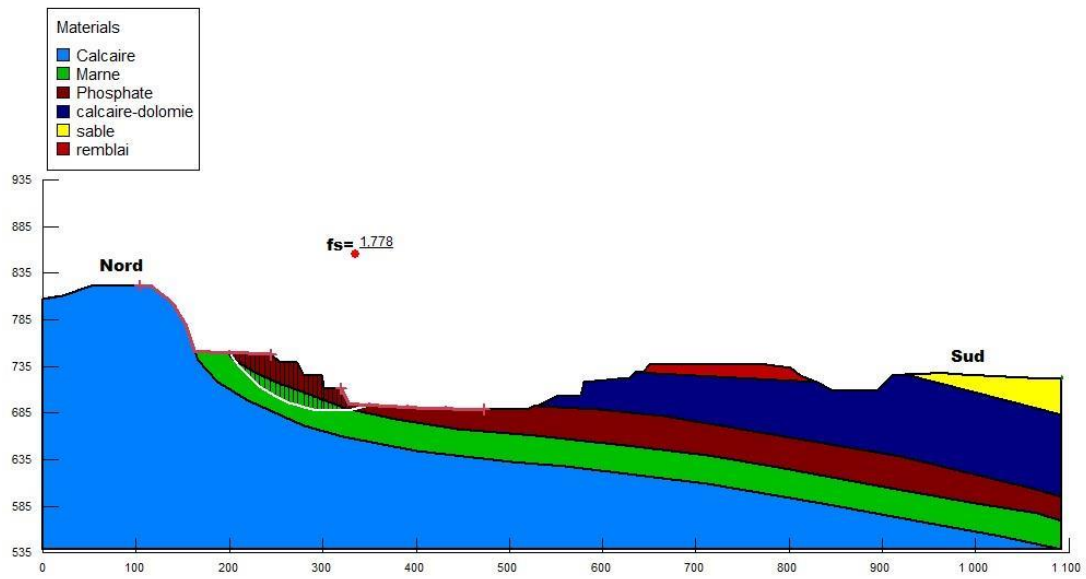


Figure - 43- : Modèle géotechnique de la coupe 1-1 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).

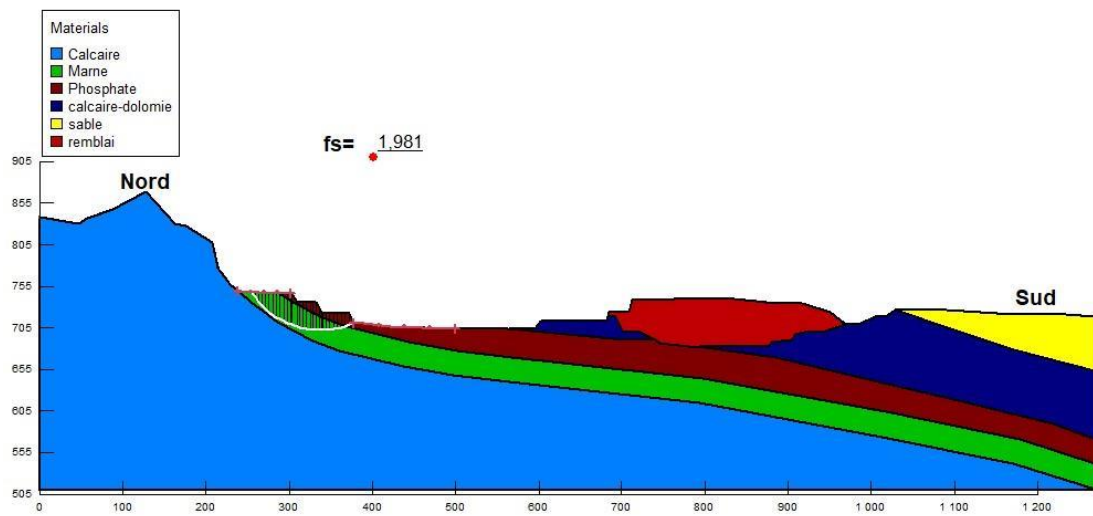


Figure - 44- Modèle géotechnique de la coupe 2-2 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).

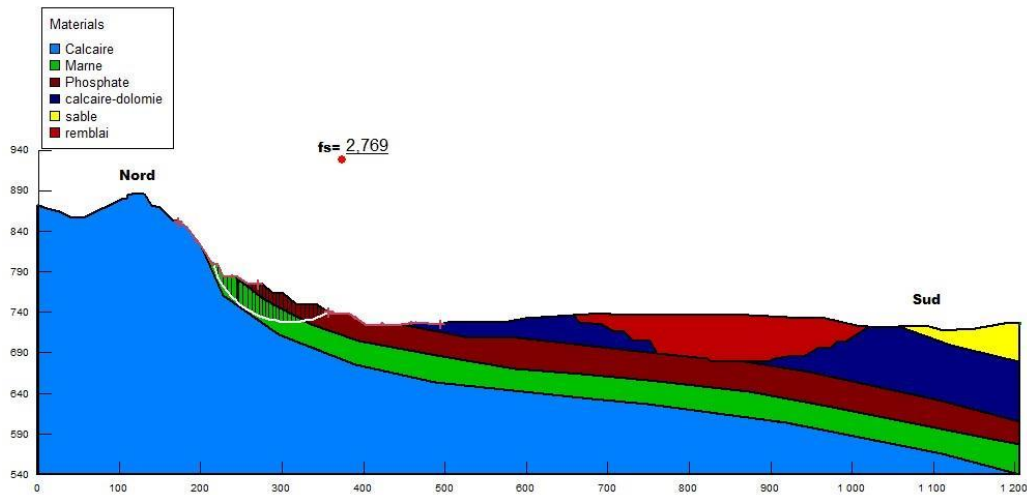


Figure - 45- Modèle géotechnique de la coupe 3-3 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).

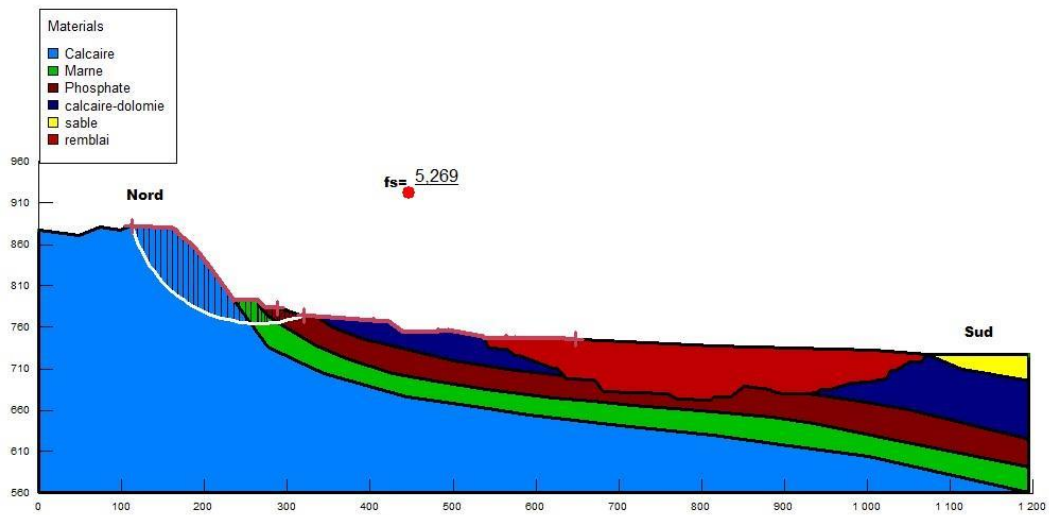


Figure - 46- Modèle géotechnique de la coupe 4-4 après le décapage de la masse glissée en 2022 (Zerough M. L., 2024).

III.3.3.3. Partie Nord-est de la carrière de Kef Essnoun :

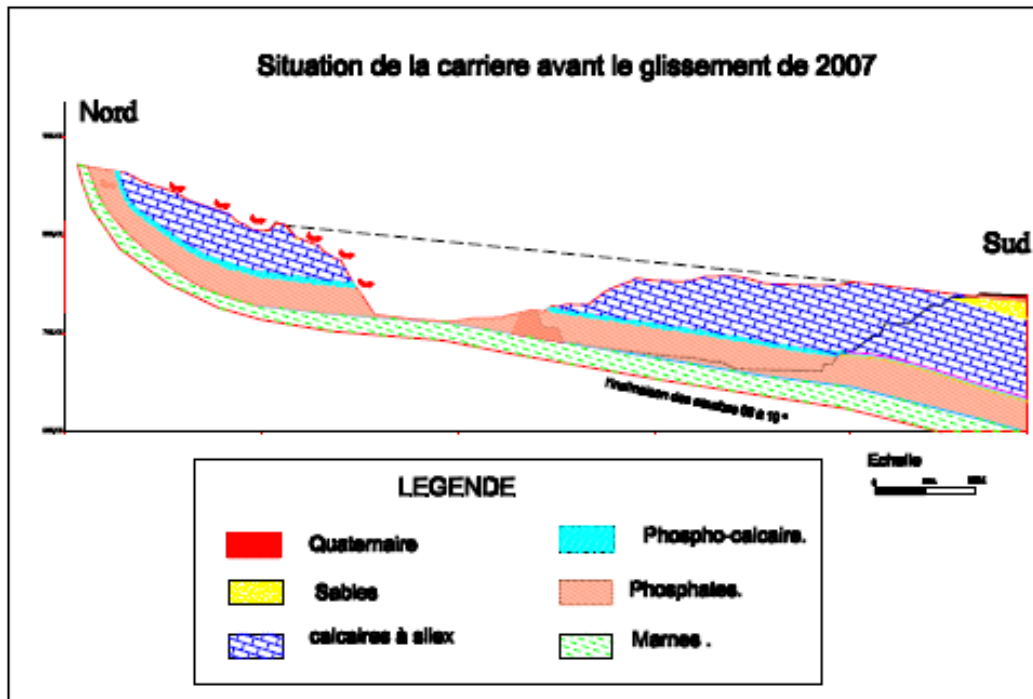


Figure - 47- coupe avant glissement (ancienne fosse Nord-est de Kef-Essnoun) [17].

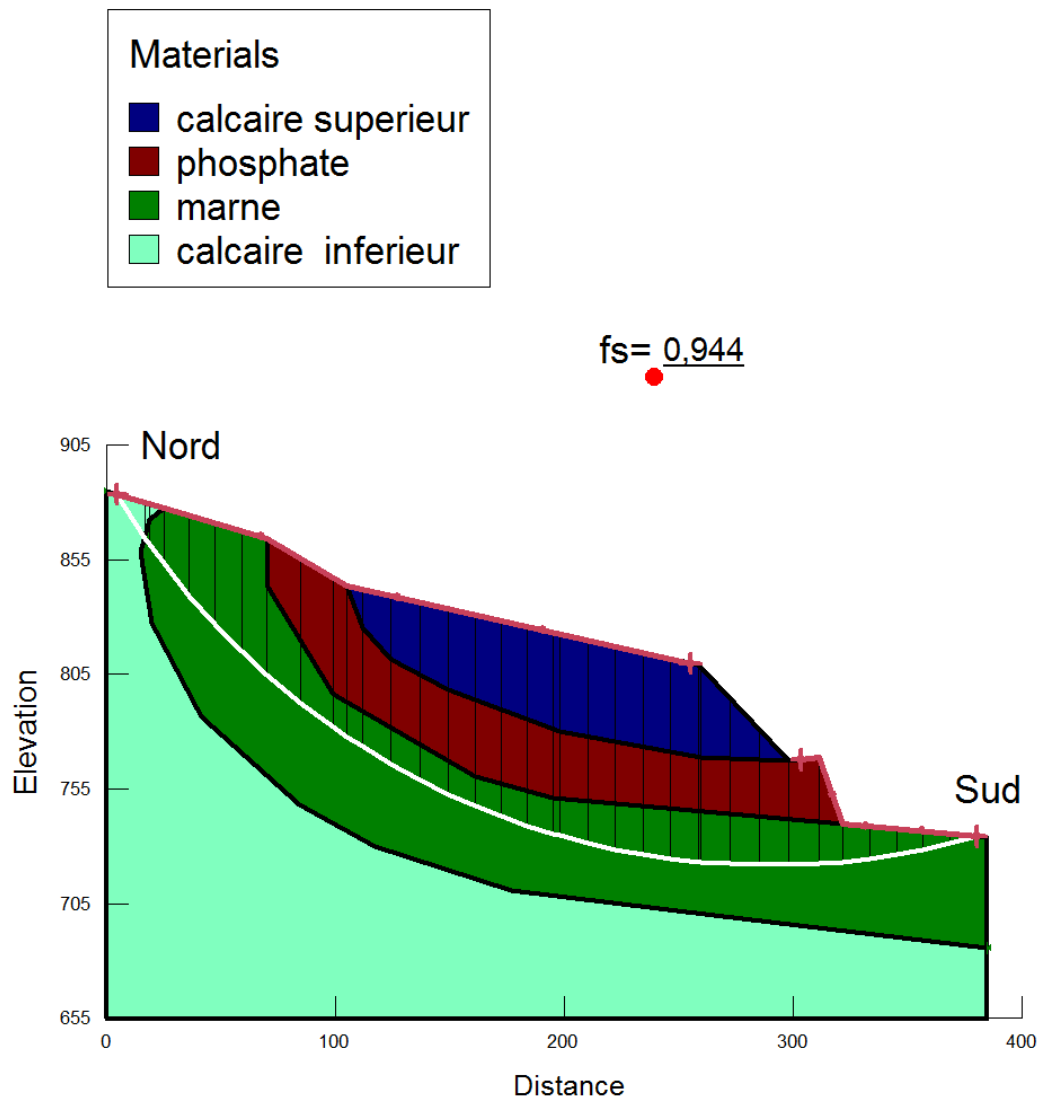


Figure - 48- la surface du glissement avant le glissement 2007 (ancienne fosse Nord-est) [17].

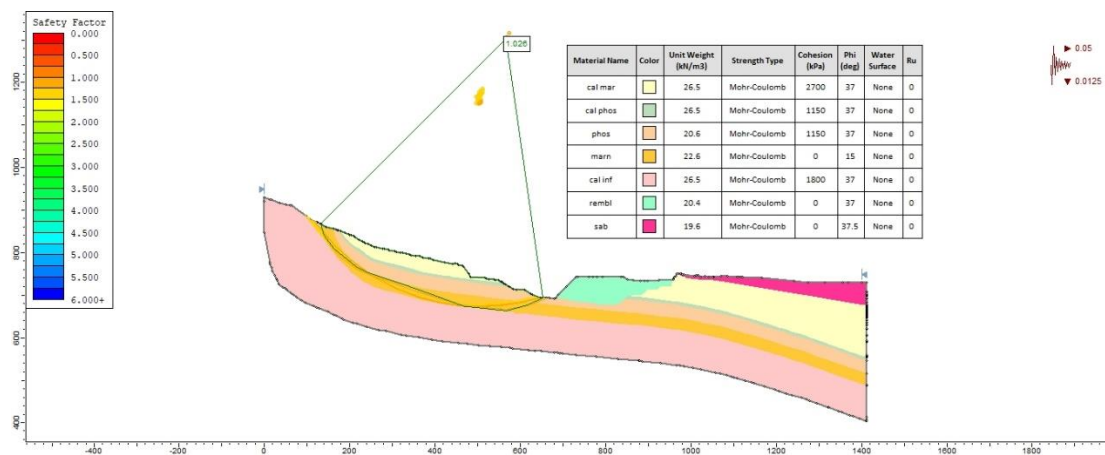


Figure - 49- Evaluation de la stabilité $Fs=1,026$ (cas d'un glissement non circulaire) (Zerough M. L., 2024).

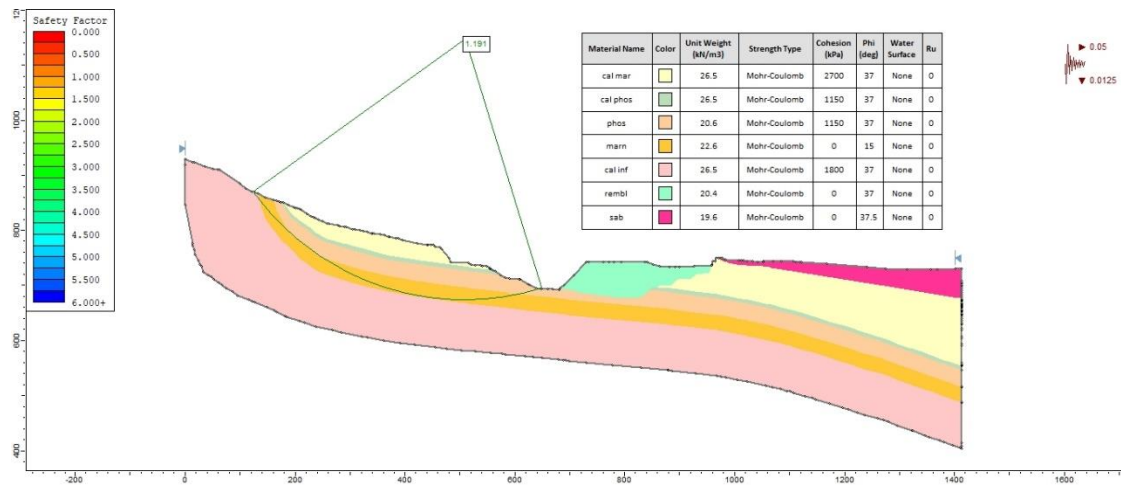


Figure - 50- Evaluation de la stabilité $F_s=1,191$ (cas d'un glissement circulaire) (Zerough M. L., 2024).

III.3.4. Interprétation des résultats :

Après avoir effectué les calculs pour le coefficient de sécurité à l'aide du logiciel GEOSLOP (méthode des différences finies) et ceci en utilisant les coupes disponibles pour les deux fosses (ancienne fosse Nord-est et nouvelle fosse Nord-ouest). Dans le cas de la nouvelle fosse nous avons effectué le calcul à titre préventif, donc pour prévoir des glissements potentiels, par contre pour l'ancienne fosse, et comme le terrain présente une lithologie assez homogène et même les conditions structurales sont identiques pour les deux fosses, nous avons établi les calculs pour certaines comparaisons qui peuvent nous aider à prédire l'état de stabilité de la fosse au futur.

Malgré que la nouvelle fosse a subi réellement un glissement de faible envergure en 2022, nous avons tiré des remarques très importantes qui montrent l'utilité d'une analyse de stabilité pendant la phase de conception des gradins pour une mine à ciel ouvert. Les remarques sont résumées comme suit :

- pour la nouvelle fosse, la méthode des différences finies confirme l'instabilité du site, le facteur de sécurité étant égal à 1,060 des glissements sont donc possibles, la surface de rupture est localisée le long de l'interface marne-calcaire. Si des glissements auront lieu avec une telle profondeur, on aura une catastrophe pareille à celle de l'ancienne fosse,

- pour l'ancienne fosse, par la même méthode (différences finies) les résultats sont conformes aux études ultérieures (Abid et al., 2020, Makhlouf, 2021), la surface de rupture est également localisée à l'interface marne-calcaire,

- pour ce qui est des conditions géologiques, d'après les coupes géologiques et également nos observations directes sur site, l'inclinaison des couches est dirigée dans le même sens que la pente topographique. Au sommet du flanc Nord de Kef Essnoun, cette inclinaison est assez forte et se redresse peu à peu en se dirigeant vers le Sud avec

une concavité assez nette, ce qui donne aux plans de stratification une forme subcirculaire vers le haut du flanc et devenant presque plane en allant vers le Sud,

-Dans le cas des deux fosses, le model présenté par les deux coupes (figures -41- et -48-), le GEOSLOP propose un plan de glissement circulaire et c'était le même cas pour les études ultérieures. Ce résultat nous amène à se poser la question comment un glissement circulaire peut se produire dans un terrain rocheux ?

Pour répondre à cette question, nous avons proposé l'idée suivante :

- ✓ Le logiciel GEOSLOP ne permet pas à l'utilisateur de choisir le type du plan pour lequel le calcul s'effectue. La concavité des couches, décrite ci-dessus et présenté par les coupes dans les deux cas (fosses ancienne et récente), permet au programme de simuler les plans de stratification au cercle et propose ainsi le plan circulaire pour le cisaillement,
- ✓ Une application par le logiciel Slide 7.0, a été établie pour confirmer notre idée et en même temps pour plus de vérification, cette application est faite pour la nouvelle fosse Nord-ouest avec la coupe de base (coupe réalisée avant le glissement, 2022),
- ✓ Par le logiciel Slide 7.0, nous avons effectué le calcul pour les deux cas disponibles au choix : glissement non circulaire (figure -49-) et glissement circulaire (figure -50-). Les résultats montrent un état d'instabilité avec un coefficient de sécurité $F_s=1.026$ pour le cas du non circulaire et $F_s=1.191$ pour le cas circulaire. Le plan de cisaillement dans les deux cas est presque le même et passe exactement par l'interface marne-calcaire. Effectivement, la marne est généralement le siège de plan de glissement, elle constitue une couche savon sur laquelle les couches sus-jacentes peuvent glissées, ou elle-même peut glisser sur une couche dure. A notre avis, les résultats confirment notre idée. D'après la figure -49-, le plan de cisaillement est proche de celui du glissement plan.

A cet effet, on remarque d'après les résultats obtenus, les conditions topographiques, géologiques, et structurales, que le site de Kef Essnoun est sujet aux glissements plans à profondeur considérable, cet état doit être pris au sérieux pour toute conception de nouvelle fosse, le dimensionnement des gradins doit être fait sur cette base pour minimiser le risque. La profondeur du forage des trous de dynamitage ne doit pas dépasser l'interface marne-phosphate.

III.3.5. Conclusion :

A travers ce chapitre, selon les données disponibles pour chaque cas, nous avons essayé de procéder à une évaluation de la stabilité dans les mines de la région de Tébessa. Les sites miniers dans cette région souffrent généralement de problèmes de stabilité qui sont liées essentiellement à la conception de la mine et aux conditions géologiques en générale.

Pour la mine de Djebel Boukhadra, nous avons opté à une analyse cinématique par projection stéréographique à l'aide du logiciel Dip, les résultats ont montré que le site peut souffrir généralement des mouvements de type glissement plans et glissement par basculement, le type glissement de coin n'est pas fréquent mais également non exclu. Les systèmes de fracturations, les discontinuités et les pendages des couches sont des facteurs essentiels et peuvent se transformer facilement en facteur déclenchant sous l'effet de changement des conditions au limite (secousses de dynamitage et d'abattage, infiltration d'eau... etc.).

Pour la mine de Djebel Onk et exactement de Kef Essnoun, nous avons effectué un calcul du coefficient de sécurité à l'aide du logiciel Geoslop ainsi que le logiciel Slide 7.0, les résultats ont montré que des instabilités potentiel sont prévues de type glissement plan dont le plan de cisaillement se localise dans l'interface marne-calcaire. Cette situation est facilitée par l'inclinaison des couches qui est presque parallèle à la topographie. Les futures conceptions dans ce site doivent prendre en considération cette situation.

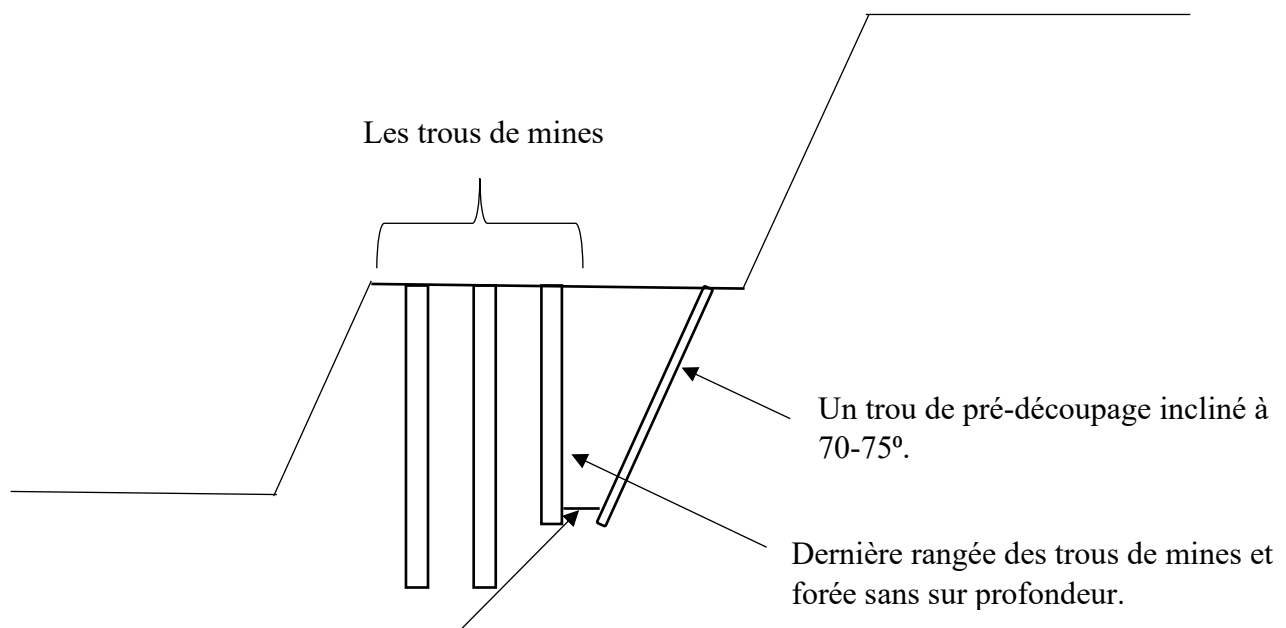
Recommandation :

- Respecter la programmation minière court, moyen et long terme,
- Faire des tirs de pré-découpage au toit de la fosse et aux autres murs
- Eviter le sous-cavage,
- Respecter la maille de foration et la profondeur des trous de la dernière rangée (rangée sans sur profondeur),

Pré-découpage :

La technique de pré-découpage est utilisée dans les mines à ciels ouvertes pour améliorer la stabilité du bord de fosse est conserver le front stable. Le pré-découpage consiste d'une rangée de trous qui a une maille serrée par rapport aux trous de mines et des diamètres inférieurs aux diamètres des trous d'abattage.

Les trous de pré-découpage sont réalisés pour créer une discontinuité sur le long du talus est toujours forés à un angle de $70-75^{\circ}$ par rapport à l'horizontal et elle est tiré toujours avant le tir principal voir figure -51- :



La distance entre la dernière rangée des trous de mines et la ligne de pré-découpage doit être au minimum 1.5m [21].

Figure - 51- Positionnement des trous de mine par rapport aux trous de pré-découpage (Zerough M. L., 2024).

Conclusion générale :

Située au Nord-Est de l'Algérie aux confins Algéro-Tunisienne, la région de Tébessa présente une richesse particulière dans le domaine minier. Depuis l'époque romaine, l'époque de la colonisation des mines ont été exploitées, plusieurs organismes leur ont succédé jusqu'à la nationalisation après l'indépendance, ces mines se différencient par le type de minerai (fer et phosphate) et sont sous la direction de l'ancienne société FERPHOS qui s'est divisé actuellement en SOMIFER et SOMIPHOS. Les mines actives actuellement sont : la mine fer de Djebel Boukhadra à Boukhadra, la mine de fer de Djebel Ouenza à l'Ouenza et les mines de phosphate de Djebel Onk à Bir El Ater. D'autre site est en état d'étude pour l'ouverture de mine tel que Bled El Hadba à Bir El Ater. Le mode d'exploitation se différencie aussi d'une mine à l'autre en fonction de la position du minerai par rapport à la profondeur, on trouve donc le mode d'exploitation souterrain et le mode d'exploitation à ciel ouvert.

Les sites des mines sont toujours exposés aux différents types d'instabilité sous l'effet de plusieurs facteurs. Notre étude a été consacrée à faire une synthèse sur ces types d'instabilités dans les mines de la région de Tébessa. A cet effet, nous avons organisé des visites pour les différentes mines aux mois de Janvier et Février 2024 (Boukhadra, Ouenza et Djebel Onk), des observations directes sur terrain avec des photographies ainsi qu'une collecte de données ont été réalisées pendant ces visites, malheureusement pour le cas de la mine de Djebel Ouenza, vu des contraintes administratives nous n'avons pas eu des données au moins pour l'ancien glissement du quartier Zerga. Pour cette raison nous avons pointé notre travail sur les deux sites où les données sont disponibles (site de Kef Essnoun au Djebel Onk et site de la mine de Djebel Boukhadra), ces deux sites souffrent de problèmes d'instabilité qui dans les deux cas ont interrompu les travaux d'exploitation.

Dans le cas de la mine de Djebel Boukhadra depuis l'année 2012, jusqu'à l'année 2019 ont succédé un effondrement qui a touché le niveau souterrain 1285 et un éboulement qui a entraîné des bermes de gradins pour la carrière à ciel ouvert, ce qui a arrêté les travaux d'exploitation. Pour cette raison, nous avons réalisé une analyse cinématique par projection stéréographique à l'aide du logiciel Dip, dont le but est de prévoir des mouvements qui peuvent avoir lieu dans ce site, bien sûr en prenant les conditions géologiques en considération. Les résultats ont montré que des glissements plans et par renversement ont une probabilité d'occurrence assez élevée, les glissements de coin ont une probabilité plus faible, mais ne sont pas à exclure.

Dans le cas de Kef Essnoun à Djebel Onk, en l'année 2007 un glissement de terrain s'est produit, il a interrompu l'exploitation, une autre fosse a été ouverte pour poursuivre le travail d'exploitation, là où également un autre glissement s'est produit en 2022, c'est pourquoi nous avons aussi effectué une analyse de stabilité pour également prévoir la stabilité des gradins au futur nous avons procédé au calcul du coefficient de sécurité par les deux logiciels Geoslop et Slide 7.0. Les résultats ont également montré que des glissements plans peuvent avoir lieu à une profondeur très considérable.

Conclusion générale

Dans les deux cas la combinaison des facteurs géologiques avec les conditions d'exploitation et la conception des gradins ont constitué les facteurs essentiels de déclenchement des instabilités.

En fin des recommandations nécessaires sont évoqué et des remèdes que nous jugeons utiles sont présentés.

Bibliographie:

- [1] Kerbati, N. R., Gadri, L., Hadji, R., Hamad, A., & Boukelloul, M. L. (2020). Graphical and Numerical Methods for Stability Analysis in Surrounding Rock of Underground Excavations, Example of Boukhadra Iron Mine NE Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, 1-9.
- [2] BOUZENOUNE, A. (1993): Minéralisations périadiabatiques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale). Thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 1 Vol. 207p
- [3] NEDJARI-BELLAHSENE, S. & NEDJARI, A. (1984) : Le Boukhadra : esquisse paléogéographique aptienne. 5ème séminaire. nationale des Sciences de la Terre, Alger, pp.102
- [4] Djellali, Adel and al. 2019. "Evaluation of Cement-Stabilized Mine Tailings as Pavement Foundation Materials." *Springer Geotech Geol Eng* 31(4).
- [5]: 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, 288 p.
- [6]: complexe minier djebel Onk Bir Ater –Tebessa, direction d'étude et développement.
- [7]: Visse L. (1952) Genèse des gîtes phosphatés du Sud-est Algéro– tunisien. XIX Congrès géol. Intern. Alger, série 1, n°27, 60 p.
- [8]: Ranchin G. (1963, a) Les phosphates de chaux sédimentaire de la région du Djebel Onk (Algérie). S.E.R.M. Paris, 85 p.
- [9] Abid Amel Chachou Chahinez 2020 Stabilité des bords de la mine de kef Essenoune, Tébessa (Nord-Est, Algérie).
- [10] Chalhoub M. 2006. Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, spécialité géologie de l'ingénieur, p. 39-45.
- [11] Hammah, R. E., Curran, J. H., Yacoub, T., & Corkum, B. 2004. Stability analysis of rock slopes using the finite element method. Communication presented à EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium.
- [12] Moret L. 1945. "Les écroulements de terrains en montagnes". Edition de la Revue des Alpes, Grenoble, p. 12
- [13] Mohamed Etude de la stabilité des talus des mines à ciel ouvert. Cas de la mine de Phosphate de Djebel El-Onk, Tébessa.
- [14] Nour Rahouadja KERBATI, 2021 Diagnostic de la stabilité d'anciennes exploitations souterraines et utilisation du remblayage comme un support des terrains adjacents. (Cas de la mine de fer de Boukhadra)
- [15] SOMIPHOS spa 2015 etude geotechnique de stabilite talus de djebel onk et Bled El Hadba

Bibliographie

[16]: SOMIPHOS (2023): exploitation parameters summary table of parameters operating 2023.

[17] : Brahim MAKHLOUF (2021) Diagnostic géomécanique d'une mine à ciel ouvert.

[18] Kadri MA et Bougdal R (2007) Travaux de reconnaissance du glissement de terrain de Kef Essennoun (Djebel Onk). Rapport d'expertise de l'Agence Nationale de la Géologie et du Contrôle Minier (ANGCM), p 1, 6.

[19] 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, 288 p.

[20] Faouzi HADJ-HASSEN Ecole des Mines de Paris – CGES - Fontainebleau Analyse des aspects de stabilité dans les exploitations à ciel ouvert.

[21] procédure pour l'élaboration des bords de fosse (PP/215-200/011). Société Nationale Industrielle et Minière.

[22] Bekkar Hanane, Laouar Fouzia (2020) les instabilités de la mine de Djebel Onk : les causes et les remèdes.

[23] ALLAL Aïmed et RAHAL Abid, (2020) MODELISATION DU GISEMENT DE DJEBEL ONK NORD A PARTIR DES LOGS DE SONDAGE.

[24] Hiba BOULAHBEL, Souhaila NAHAL.2020 Diagnostic de l'effondrement dans la carrière de Boukhadra, Département des mines et de la géotechnologie.