Contribution à l'étude de l'équilibre des pentes rocheuses discontinues par la modélisation numérique: cas la carrière de granulats ENOF-Sétif NE Algérie

Contribution to the study of discontinuous rock slope equilibrium by numerical modeling: the case of ENOF aggregate quarry, Setif-Algeria

Farid Zahri [1-2*], Mohammed Laid Boukelloul [1], Riheb Hadji [2] & Kourichi Talhi [1]

1-Mining Department, Faculty of Earth Sciences, Badji Mokhtar University. Mineral Processing and Environmental Laboratory, 23000, Annaba, Algeria.
2 Earth Sciences Department, Ferhat Abbas University, Setif 1, 19000, Algeria.

Soumis le : 04/04/2016 *Révisé le : 26/05/2017* *Accepté le : 30/05/2017*

ملخص

المستوى التقني الذي تم التوصل إليه في مجال هندسة المناجم، يسمح باعتماد استراتيجيات فعالة لاستغلال المحاجر المفتوحة مع مراعاة استقرار المنحدرات الصخرية المتقطعة .غير أن الميزات الجيوميكانيكية للتراكيب الجيولوجية، طبيعة وتماسك الكتل الصخرية و قدرة الصخور، الخ ، تتحكم في أنماط عدم الاستقرار في هذه المناجم. يهدف هذا العمل إلى تحديد أنماط و أنواع التقطعات التي قد تحدث في محجرة ENOF بجبل القسطار و ذلك باستعمال مقاربة متعددة الخطوات . وتستند هذه المنهجية أساسا على النمذجة العددية، الأساليب الإحصائية، هندسية، التجريبية والجيوميكانيكية فضلا عن الاستخدام المتكامل لبرمجيات Roclab، DIPS، STATISTICA وPalxis. أظهرت نتائج الدراسة حالة الاستقرار السيئة للموقع كما سمحت بوصف و تقدير مختلف آليات عدم الاستقرار تحت شروط مختلفة. هذه النتائج قابلة للتطبيق في الموقع المدروس مما يسمح للاستغلال الأمثل مع الحفاظ على الاستقرار و الأمن للموقع .

الكلمات المفتاحية : عدم الاستقرار-*RMR-SMR-MEF*

Résumé

Le niveau de technicité atteint dans le domaine de Génie-minier, permet l'adoption des stratégies l'exploitation effectives des carrières à ciel ouvert tout en tenant compte de l'équilibre des pentes rocheuses discontinues. Cependant les caractéristiques géo mécaniques des structures géologiques, la nature et la compétence de la matrice rocheuse, contrôlent les modes de ruptures dans ces ouvrages miniers. Le but de l'étude consiste à identifier les différents modes de rupture susceptibles de se développer dans la carrière ENOF de Djebel Gustar par une approche multi-étapes. Cette méthodologie repose essentiellement sur la modélisation numérique, les méthodes statistiques, géométriques, empiriques et géomécaniques, ainsi que sur l'utilisation complémentaire des logiciels Roclab, Dips, Statistica et Palxis. Les résultats de cette étude démontrent que la stabilité du site est médiocre, et identifient les différents mécanismes d'instabilités sous divers conditions. Elles permettent également la mise en place d'un schéma valide d'exploitation du site tout en assurant la stabilité des pentes rocheuses et la sécurité du chantier.

Mots clés : *RMR-SMR-MEF-Mode de rupture.*

Abstract

The level of tecnicity reached in the field of Mining Engineering, allows the adoption of effective strategies for the exploitation of opencast careers, with taking into account the discontinuous rock slopes equilibrium. However the geomechanical properties of geological structures, the nature and the competence of the rock matrix, controls failure modes in these mines. The purpose of the study is to identify different failure modes that may develop in the ENOF career of Djebel Gustar by a multi-step approach. This methodology is essentially based on numerical modeling, statistical, geometric, empirical and geomechanical methods as well as the complementary use of Roclab software, Dips, Statistica and Palxis software. The results of this study demonstrate that the stability of the site is poor, and identify the various instabilities mechanisms under various conditions. They also allow the establishment of a valid operating diagram of the site, while ensuring the stability of rocky slopes and safety of the site.

Keywords: *RMR-SMR-FEM-Failure mode.*

[*] *Auteur correspondant : zahrifarid@yahoo.fr*
©UBMA - 2017

1. INTRODUCTION

Par sa position comme une grande métropole en Algérie ; la wilaya de Sétif occupe la première place dans la production des granulats dans notre pays avec plus de 5 Millions de m^3 soit 8,4% du totale de la production nationale. Elle compte 82 carrières dont les produits finis sont destinés en majorité à l'utilisation dans le domaine de BTP.

La stabilité des bords de ces carrières, récurrent au demeurant lors de leur exploitation, est une équation à plusieurs variables (les conditions géologiques, les paramètres mécaniques et les caractéristiques des réseaux de discontinuités) [1]. Ce dilemme impose le contrôle continu des paramètres géométriques, technologiques et de sécurité.

Le stade des connaissances dans le domaine de l'équilibre des pentes rocheuses est assez developé en international [2, 3] et un peut moins dans le notre pays [4,5] On peut differencier entre les instabilités structurales et celles géotechniques. Les instabilités structurales se produisent dans les massifs rocheux sous faible contraintes montrant une structure géologique bien développée. Elles sont induites par les discontinuités géologiques, produites sous l'influence du poids propre de la masse rocheuse par les secousses séismiques ou les activités anthropiques [6]. Les instabilités géotechniques sont induites par excès de contraintes dans les massifs [7]. Les méthodes d'étude des instabilités rocheuses sont également empiriques par classification [8], analytiques par calculs de stabilité de pentes [9]; numériques [10], et plus récemment géo mécaniques [11]. L'identification du mode de rupture des pentes rocheuses est une étape fondamentale pour effectuer une vraie analyse de stabilité [12]. En effet, une discontinuité (joints de stratification, joints de schistosité, diaclases, failles, fractures) et ses propriétés (orientation, pendage, ouverture, remplissage…) ou un groupe de discontinuités adjacent à une face rocheuse qui est sujette à des niveaux de faible contrainte peut causer la chute d'un bloc ou un effondrement complet de cette face rocheuse [13]. Cette chute de blocs peut se produire par différents mécanismes tels que: le glissement sur un plan, le glissement d'intersection, et le basculement [14, 15]. Ces modes de ruptures peuvent survenir concurremment dans les talus de grande hauteur découpés dans les massifs rocheux possédant une structure géologique très développée, comme dans notre cas d'étude présenté par la mine à ciel ouvert de ENOF Djebel Gustar, Sétif, NE Algérien. Le but de l'étude consiste en l'analyse de la stabilité des pentes rocheuses de la carrière ENOF du Djebel Gustar avec une approche multi-étapes: géométrique [16, 17] statistique [18, 19], empirique (RMR, SMR, de Bieniawski, [20], Romana [21]), géo-mécanique [22, 23] et numérique [24]. Les résultats ainsi obtenus sont réellement applicables, permettant une exploitation optimale de la carrière avec une meilleure productivité tout en préservant la sécurité du site.

2. CONTEXTE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

Le site choisi pour notre étude, dit carrière ENOF de Djebel Gustar est de coordonnées (36°00″43,82″N, 05°32′43,99″E). Il est attenant à la commune d'Aïn Lahdjar qui est située à 24 Km au Sud du chef-lieu de la wilaya de Sétif (Fig. 1). La carrière ENOF de Djebel Gustar est la plus importante carrière de granulats dans la wilaya avec une capacité installée de production annuelle de l'ordre de 344421 m^3. Les réserves exploitables sont estimées à 21 M de tonne. Conférant à la carrière une durée de vie moyenne de 38 ans avec le taux d'exploitation actuel. Le Djebel Gustar constitue la limite SE du grand massif de Djebel Youssef, [25]. Il présente une structure anticlinale allongée NE-SW à voute tabulaire et à flancs de 10° à 45° de pendage. La série stratigraphique consiste en une alternance de formations carbonatées, allant du jurassique jusqu'a l'actuel (Fig. 2). Les calcaires Aptiens, localement minéralisés (Pb, Zn), constituent les formations actuellement exploitées au niveau de la carrière (Fig. 3).

©UBMA - 2017

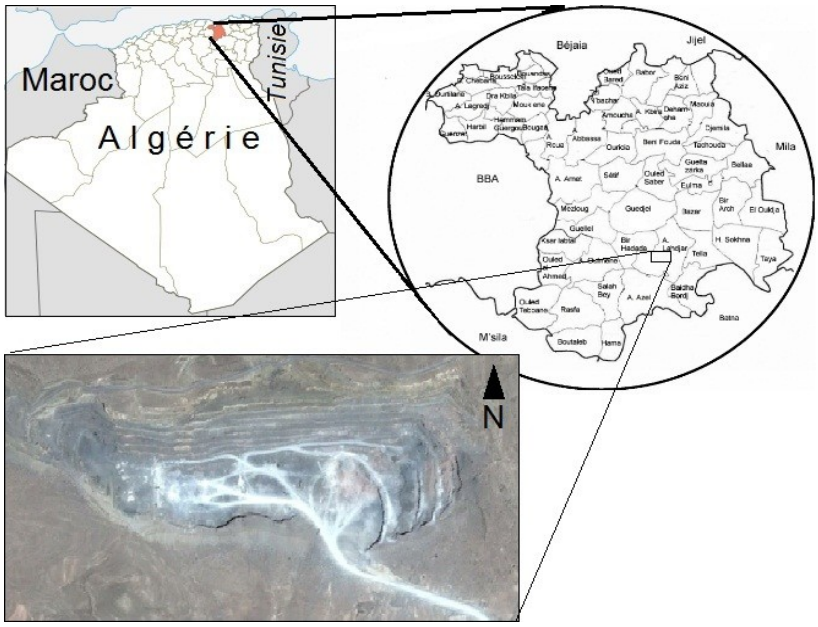

Figure 1 : Carte de localisation géographique du site d'étude.

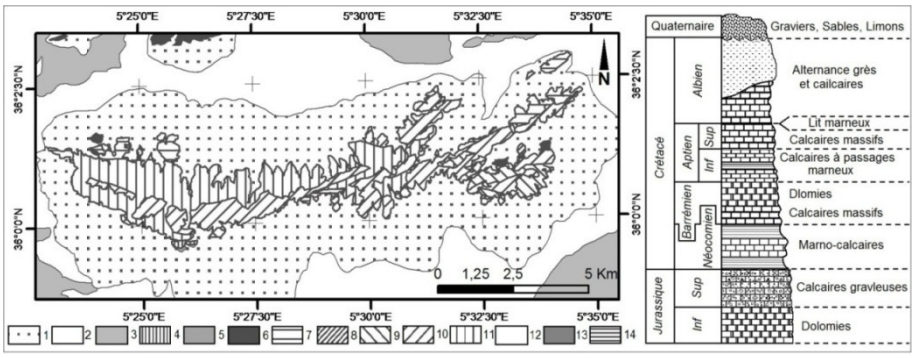

Figure 2 : Carte géologique et log lithostratigraphique de Djebel Gustar.

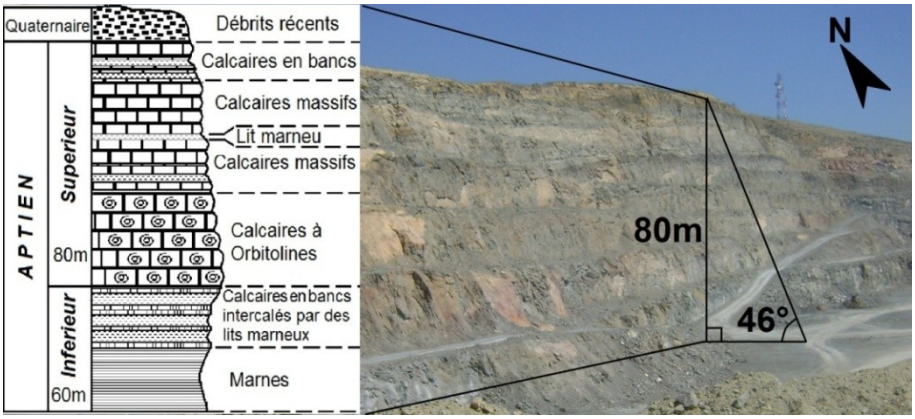

Figure 3 : Log lithostratigraphique du site d'étude.

Le gisement du Gustar est traversé par deux réseaux de failles normales d'âge Crétacé- Tertiaire dirigées vers le NW-SE, NE-SW. Elles divisent le Djebel en six compartiments avec des rejets d'ordre métrique. Outre ces failles majeures, le terrain présente d'autres systèmes de fractures de plusieurs directions.

©UBMA - 2017

3. MATERIELS ET METHODES

La méthodologie adoptée dans notre recherche est une combinaison de quatre approches distinctes, permettant d'évaluer quantitativement et qualitativement la stabilité de la carrière étudiée (Fig. 4).

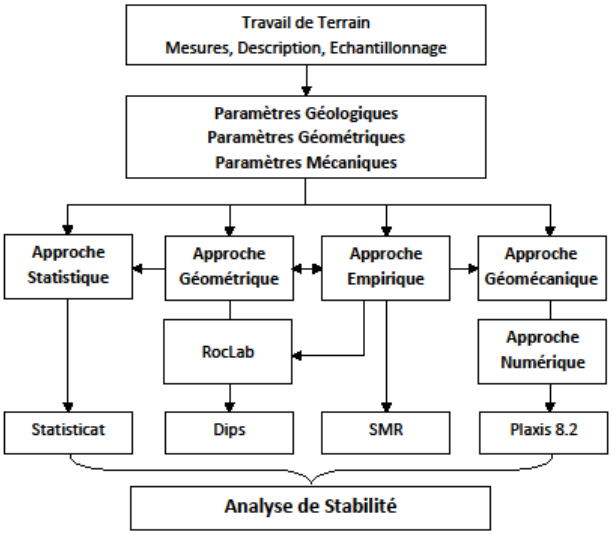

Figure 4 : Organigramme méthodologique de l'approche adoptée par l'étude

La première étape est consacrée à un travail de terrain. Elle permet l'acquisition des données, le long du front de taille de la carrière. La méthode d'échantillonnage des faces rocheuses utilisée est celle des relevés par traverses usuels [26], permettant d'amasser, pour chaque domaine lithologique, l'essentiel de l'information structurale nécessaire. Les relevés des caractéristiques de discontinuités ont été reportés sur un tableau spécialement conçue pour cette tache. Un répertoire des azimuts et des pendages de discontinuités relevées sur l'ensemble du front de taille a été établi. Pour les paramètres géologiques (rugosité et altération), elles sont estimées en comparant l'apparence de la surface de la discontinuité avec des profils standards publiés par Barton [27]. En ce qui concerne les paramètres physicomécaniques, de nombreux essais ont été effectués en laboratoire sur des échantillons de roche en provenance des différentes formations géologiques.

L'exploitation des données acquises lors de cette compagne constitue le second volet de notre travail. Cette étape commence par une approche géométrique qui tient compte de l'information obtenue à l'aide des relevés structuraux permettant ainsi de caractériser les principales familles de discontinuité, [28]. Elle permet de visualiser les familles préférentielles des discontinuités révélant ainsi les différents modes d'instabilité potentiels à l'aide d'une étude cinématique. Cette tache est réalisée à l'aide du logiciel '*DIPS V.5.1*'. Les angles de frottement internes des différentes formations sont calculés à partir du logiciel '*RocLab*' (de *Roc-Sciences*). Dans l'approche statistique on a fait une analyse statistique des paramètres distincts de discontinuités, ce qui permet de discriminer et quantifier chacune des familles définies dans l'approche précédente, en utilisant le logiciel '*STATISTICA 8.0*'

Les résultats obtenus durant l'approche géométrique des différentes familles de discontinuités sont exploitées dans l'approche empirique pour évaluer la stabilité de la carrière. Dans cette approche on a utilisé les systèmes de classification RMR et SMR :

- La classification RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski, prévoit l'évaluation des différents paramètres pour chacun desquels un coefficient est attribué. La somme de ces coefficients détermine la valeur du RMR. Ce système comprend cinq paramètres de base : *i*) la résistance à la compression uniaxiale de la roche, *ii)* la valeur de l'indice RQD pour la masse rocheuse, *iii)* l'espacement des discontinuités, *iv)* l'état des discontinuités, et *v)* les conditions hydrauliques.
- La classification SMR *(Slope Mass Rating)* de Romana [29] est obtenu à partir de la classification RMR en ajoutant un facteur d'ajustement factoriel en fonction de l'orientation relative des discontinuités et de la pente et à un autre facteur de correction en fonction de la méthode d'excavation.

$SMR = RMR_{basic} + (F_1 . F_2 . F_3) + F_4$

©UBMA - 2017

Les coefficients F_1, F_2, F_3 et F_4 sont déterminés à partir d'un tableau [29]. Le SMR propose une description des roches en cinq classes indiquant leur stabilité, les différents modes de rupture potentiels et le soutènement recommandé.
L'approche numérique repose sur la méthode des éléments finis en exploitant le code de calcul *'Plaxis 8.2'*, qui nous permet de quantifier les mécanismes de déformation et de rupture. Les paramètres mécaniques nécessaires à la modélisation sont basés sur le système RMR et ses relations empiriques. Ainsi les propriétés du massif sont déterminées avec des caractéristiques équivalentes.
Les expressions suivantes déterminent le module de Young (E), la cohésion (c) et l'angle de frottement interne (φ) équivalents.

$E_{éq}$ (GPa) = $10^{(RMR - 10) / 40}$ [30] (1)

$c_{éq}$ (kPa) = 5 RMR [31] (2)

$\varphi_{éq}$ (deg) = 0,5 RMR + 8,3 ± 7,2 [32] (3)

La comparaison des résultats quantitatifs issus de ces quatre approches permet d'évaluer qualitativement la stabilité du talus de la carrière.

4. RESULTAS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent que les réseaux de fracturation ont une forte influence sur la stabilité des pentes rocheuses. L'influence est plus ressentie si l'angle d'inclinaison de la pente augmente. Ces résultats sont considérés non contradictoire pour les aboutissements obtenus par les études antérieurs sur des environnements similaires [4, 5]. De telles observations ont été déjà notées dans les travaux réalisés par Hoek, [7] où il a été noté que l'association des réseaux de fracturation avec des pentes aigues entraînent de glissement plans et des chutes de blocs.

Approche géométrique

L'étude de la fracturation a une grande importance dans l'évaluation de la stabilité des faces rocheuses. Les calcaires Aptien actuellement exploités présentent des grandes failles à pendage Sud conformes avec le mode d'ouverture de la carrière. Les mesures de terrain permettent de déterminer cinq failles majeures avec des directions comprises entre 120° et 192°. La projection stéréographique de ces plans de failles (Fig. 5) permet de faire ressortir les différentes possibilités d'éventuelles ruptures en coin et l'intersection entre les failles [F_1&F_2 à plongement 73°], [F_1&F_3, 59°], [F_2&F_3, 58°], [F_3&F_4, 57°], [F_3&F_5, 56°]. La seule possibilité de glissement plan est présentée par la faille 3 (60/192).

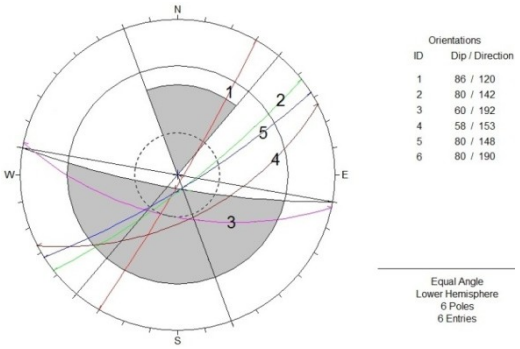

Figure 5 : Analyse cinématique par projection stéréographique des failles de la carrière de Djebel Gusatr.

Le traitement statistique des 312 discontinuités relevées sur le front de taille de la carrière révèle quatre familles principales de discontinuités pour l'ensemble des trois faciès du site d'étude (Figs. 6, a, b, c). Les résultats sont obtenus à partir de la compilation de 24 relevés structuraux par traverse. Leur traitement a été effectué en exploitant le logiciel *'DIPS 5.1'*.

©UBMA - 2017

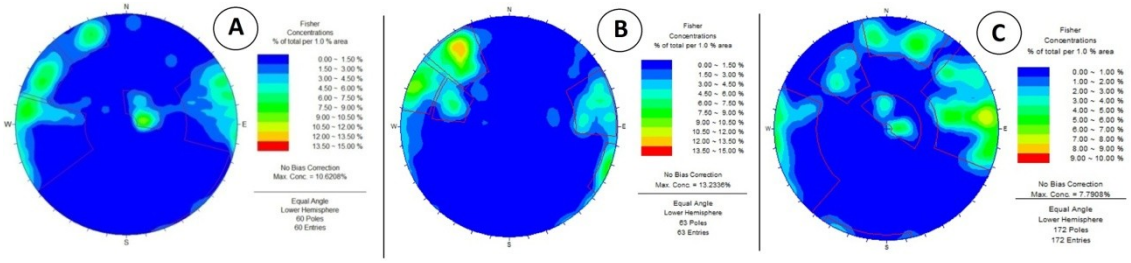

Figure 6 : Projection stéréographique des pôles des discontinuités. a) Calcaire en bancs, b) Calcaire massif, c) Calcaire à Orbitolines.

L'analyse cinématique a permit de déterminer les différents modes de ruptures (Glissement plan, rupture en coin, basculement) des talus rocheux (Figs. 7, a, b, c).

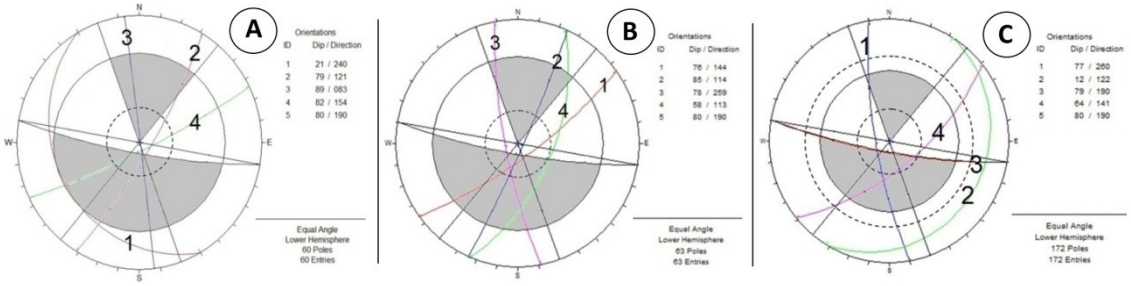

Figure 7 : Analyse cinématique par projection stéréographique des différents modes de rupture possible. a) Calcaire en bancs, b) Calcaire massif, c) Calcaires à *Orbitolines.*

La projection stéréographique tient compte de l'ensemble des familles de discontinuités, de l'orientation du talus et de l'angle de frottement. Les résultats obtenus dans cette analyse sont récapitulés dans les tableaux 1, 2, présentant les différentes familles pour chaque faciès ainsi les modes de ruptures qui les touchent.

Tableau 1 : Orientation des familles de discontinuités les plus importantes

	Calcaires en banc		Calcaires massifs		Calcaires à O*rbitolines*	
	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Pendage (°)	Direction de pendage (°)	Pendage (°)	Direction de pendage (°)
famille 01	21	240	76	144	77	260
famille 02	79	121	85	114	12	122
famille 03	89	83	78	259	79	190
famille 04	82	154	58	113	64	141

Tableau 2 : Compilation des possibilités des modes de ruptures selon l'analyse cinématique

	Rupture planaire	Ruptures en coins	Basculement
Calcaire en banc	_	F_2&F_3, F_1&F_4	F_3
Calcaire massif	_	F_2&F_3, F_3&F_4, F_1&F_2, F_1&F_3	F_2
Calcaire fossilisés	F_3	F_1&F_3, F_4&F_3, F_1&F_4	_

Notons ici que les cas de basculement mentionnés dans le tableau 3, n'ont impliqué jusqu'à maintenant que de faibles volumes pouvant être captés par les bermes de sécurité.

©UBMA - 2017

Approche statistique

Dans cette approche, l'analyse des résultats obtenus de chacune des familles de discontinuités définies dans l'approche précédente, en utilisant le logiciel '*STATISTICA 8.0*', permet de quantifier différents paramètres des réseaux de discontinuités pour l'ensemble du site.
L'orientation de la famille prédominante dans la carrière (famille 01) est 174° (Fig. 8). Cette direction est parallèle à l'axe du pli de Djebel Gustar qui est le résultat des contraintes compressives de direction NS auxquelles la genèse de la chaine Atlasique est intimement liée.
A partir de la description suggérée par l'ISRM (International Society of Rock Mechanics) [33] pour les principaux paramètres géométriques des joints. La roche est découpée en blocs de formes variées et de coins car le talus de la carrière présente plus de 3 familles de discontinuités qui se recoupent. Cette situation augmente les possibilités de glissements potentiels sur ces joints. D'autant plus l'histogramme d'ouverture (Fig. 9), Pour l'ouverture, on remarque que les familles 01 et 02 montrent des ouvertures plus importantes avec une moyenne de 3 cm, suivie par les familles 03 et 04 avec une moyenne de 2 cm, c.-à-d. elle est très largement ouverte.
L'histogramme d'espacements pour les quatre familles indiqué dans la figure 10, présente un pic de la famille 01 qui est la plus dominante avec une valeur moyenne de 40 cm, les familles 02 et 03 ont un espacement moyen de 50cm. C'est-à-dire de classe modérée.

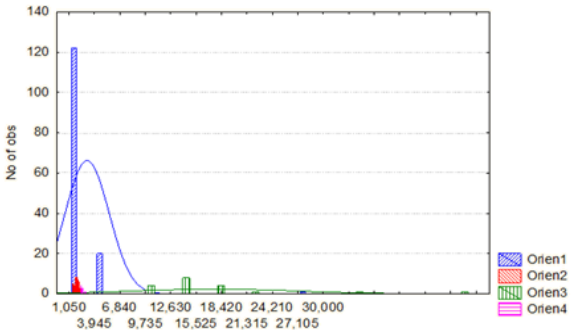

Figure 8 : Histogramme d'orientations

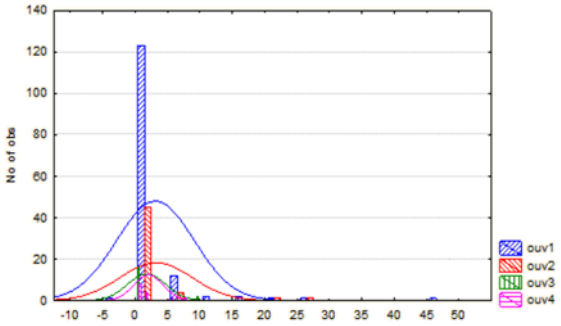

Figure 9 : Histogramme d'ouvertures

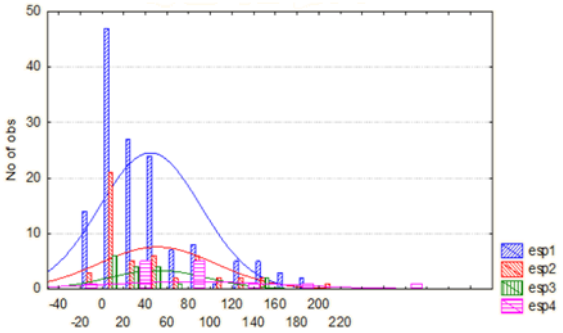

Figure 10 : Histogramme d'espacements

Si on se réfère aux caractéristiques de Piteau [34] peuvent potentiellement générer des ruptures par fauchage (*toppling*) de faible volumes pouvant être captés par les bermes de sécurité.

Approche empirique

©UBMA - 2017

Cette approche est basée sur l'indice d'évaluation de la stabilité appelé SMR obtenu à partir de la classification RMR en ajoutant un facteur d'ajustement factoriel et un autre facteur de correction en fonction de la méthode d'excavation. Le tableau 5 présente les différents résultats obtenus. A partir des résultats de cette approche, on peut conclure que la carrière présente un risque d'instabilité avec des modes de ruptures en coin et en plan notamment au niveau des intercalations marneuses.

Tableau 5 : Classification RMR, SMR des formations rocheuses

	Calcaire en Banc	Calcaire Massif	Calcaires à *Orbitolines*	Marne
Résistance à la Compression	7	7	7	2
RQD	13	13	13	8
Escapement des discontinuités	20	20	20	5
Conditions des discontinuities	6	12	20	6
Venu d'eau	15	15	15	15
RMR	61	67	75	36
SMR	41.7	47.7	55.7	16.7
Description	Moyen	Moyen	Moyen	Insuffisant
Stabilité	Partiellement stable	P. stable	P. stable	Instable
Rupture	qq joints V nombreux coins	qq joints V nombreux coins	qq joints V nombreux coins	Plane V gds Coins
Soutènement	Systématique	Systématique	Systématique	Important/correctif

Approche numérique

En vue de valider les résultats trouvés par les approches précédentes; l'application de la méthode des éléments finis s'est avéré l'un des meilleurs moyens permettant d'atteindre cet objectif. Cela donne un rendu clair sur le comportement de l'ensemble du talus ainsi que de chaque gradin. L'analyse du comportement du massif est prise en mode drainé. Les paramètres mécaniques nécessaires à la modélisation sont tirés de l'approche géo mécanique du système RMR. Le modèle est bidimensionnel calculé en déformations planes dans le profil en travers d'une section de talus. Il est constitué de 4989 éléments triangulaires à 15 nœuds. Après observation des résultats obtenus par la modélisation en (2D), plusieurs résultats peuvent être déterminés. Il a été observé que sous l'influence de leur propre poids, les gradins supérieurs du talus sont instables avec des déplacements (*Ux, Uy*) d'ordre métrique donnant une valeur maximale dans le gradin N°6. La position des zones critiques est bien individualisée en utilisant les options d'affichage du logiciel shadings (ombres) (Fig . 11). Ce mouvement est la source de deux types de déformation qui sont le glissement plan et le basculement. La réduction des valeurs de l'angle de frottement (φ) de l'interface calcaire marne provoque une augmentation dans la valeur du déplacement. Les limites des déformations par cisaillement montrent des valeurs extrêmes produites par les joints marneux, spécialement dans le premier joint intersectant le gradin N°1. Le deuxième joint produit lui aussi des valeurs inadmissibles, mais inferieures à la précédente. Les deux joints restant sont relativement stables. La figure 12 montre le modèle déformé avec un détail sur les déformations subis par le talus avec l'option d'affichage shadings.
L'évaluation de la contrainte de cisaillement est nécessaire dans notre cas. La résistance au cisaillement peut être définie comme la contrainte de cisaillement sur le plan de rupture, au moment de la rupture. Elle est distinctement trop élevée (dépassant largement le R_C) dans la base du talus et le long du joint marneux intersectant le premier gradin (Fig. 13). Les déformations maximales en extension apparaissent dans les mêmes endroits où l'on aperçoit la fissuration initiale.

©UBMA - 2017

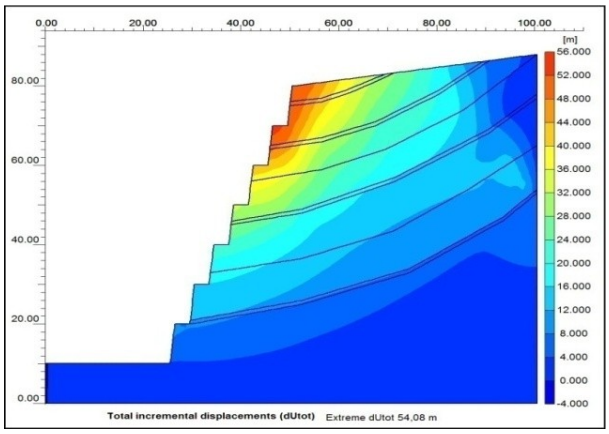

Figure 11 : Déplacements incrémentaux totaux

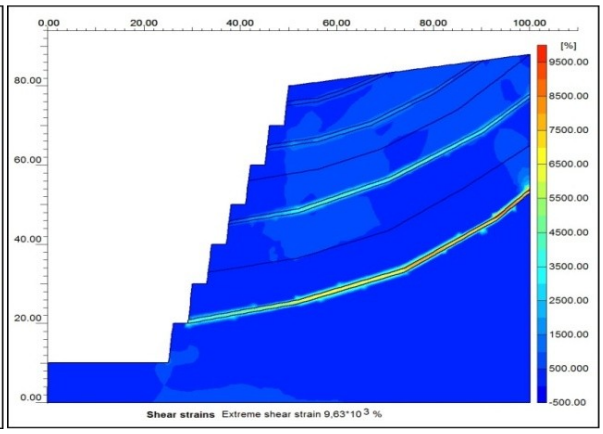

Figure 12 : Déformations de cisaillement

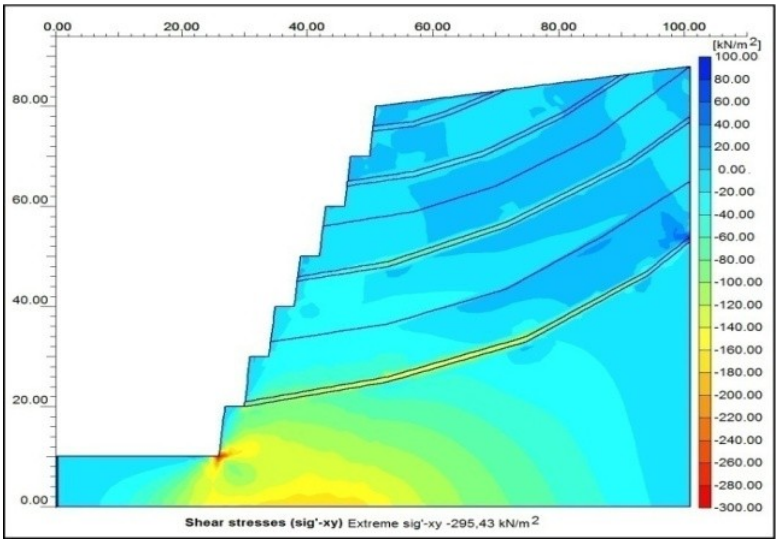

Figure 13 : Contraintes de cisaillement

5. CONCLUSION RECOMMANDATION ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette recherche est d'identifier les différents modes de rupture susceptibles de se développer à l'intérieur de la carrière ENOF. La méthode est multi étapes, elle est effectuée à l'aide de l'utilisation conjointe de quatre approches complémentaires.

Une approche géométrique consiste en la compilation des données préalablement acquises. Elle permet de déterminer quatre grandes familles de discontinuités présentes dans chaque faciès F_1 F_2 F_3 F_4. Les différents modes d'instabilité potentiels ont été caractérisés à l'aide d'une étude cinématique pour chaque faciès. Notons ici que les cas de basculement mentionnés, n'ont impliqué jusqu'à maintenant que de faibles volumes pouvant être captés par les bermes de sécurité.
Dans l'approche qui suit, une analyse statistique a été réalisée pour chacune des familles de discontinuités. Cette démarche permet de quantifier les différents paramètres géométriques des réseaux de discontinuités pour l'ensemble de site en se basant sur la description suggérée par l'ISRM et de déterminer l'orientation de la famille prédominante dans la carrière qui est parallèle à l'axe du pli de Djebel Gustar. Cette analyse permet de percevoir un net mécanisme de rupture par fauchage (*toppling*).
L'approche empirique a permit de montrer que les principaux faciès qui constituent le massif de Djebel Gustar sont partiellement stables avec des modes de ruptures en coins et en plan surtout au niveau des intercalations marneuses.
La dernière étape consistant en une analyse numérique, au moyen d'un modèle conceptuel convenablement élaboré en utilisant la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus montrent des déplacements inadmissibles dans les gradins supérieurs, des contraintes dépassant en large la

©UBMA - 2017

résistance au cisaillement des roches développées le long des joints marneux inférieurs et dans la base du talus et des déformations correspondantes trop élevées dans ces mêmes endroits..

La comparaison des résultats quantitatifs essuyés de ces quatre approches permet d'évaluer qualitativement la stabilité du talus de la carrière. Les résultats sont confirmés par différentes visites dans les carrières voisines situées dans la même mégastructure du Djebel Gustar qui sont touchés par ces mêmes mécanismes de ruptures. À partir de ces constatations, nous recommandons ce qui suit :
-Les études paramétriques sont très bénéfiques pour la détermination de l'influence des différents paramètres sur le comportement de l'ouvrage.
-La cartographie structurale à grande échelle sur tout le pourtour de la carrière est nécessaire pour parvenir à un zonage structural permettant ainsi d'implanter des plans de tir spécifiques pour chaque zone afin d'améliorer le rendement d'exploitation.
-Une analyse tenant compte des contraintes tectoniques sur la stabilité des pentes rocheuses pourrait faire l'objet d'une autre étude.
- Un soutènement par boulonnage est recommandé.

REFERENCES

[1] Priest S. D., Brown E.T., 1983. Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. Institution of Mining and Metallurgy Transactions. 92p.
[2] Monjuvent, G., & Marnezy, A. 1986. Processus d'évolution des versants dans les Alpes françaises. Géologie alpine, 62, 87-104.
[3] Antoine P., Giraud A., 1995. Typologie des mouvements de versants dans un contexte opérationnel. Bull. Int. Assoc. of Engineering geology, n°51, 57-62.
[4] Gadri L., Hadji R., Zahri F., Benghazi Z., Boumezbeur A., Laid B. M., & Raïs K., 2015. The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria. Arabian Journal of Geosciences, vol. 8(11), 8987-8997.
[5] Hadji R, Raïs K, Gadri L, Chouabi A, Hamed Y., 2017. Slope failures characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeastern of Algeria, Arabian Journal for Science and Engineering, Arab J Sci Eng 42:281–300.
[6] Malatrait N., 1975. Analyse et classement des mouvements gravitaires, Feuille St. Jean-de-Maurienne. Thèse d'état, Université Joseph Fourier, Grenoble I.
[7] Hoek E., 1990. Practical Rock Engineering 3-Slope Stability and Rockfalls, Chapter 9.www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp.
[8] Bieniawski Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications.* J. Wiley, New York,.
[9] Goodman, R.E., Shi, G.H., 1985. Block Theory and its Application to Rock Engineering. Prentice-Hall, London, 338 pp.
[10] Vengeon J.-M., 1998. Déformation et rupture des versants en terrain métamorphique anisotrope. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I, 186 p.
[11] Singh, T. N., Pradhan, S. P., & Vishal, V. 2013. Stability of slopes in a fire-prone mine in Jharia Coalfield, India. *Arabian Journal of Geosciences*, *6*(2), 419-427.
[12] Mekki F., Meksaouine M., Guenfoud M., 2011. Etude théorique du comportement des tirants d'ancrage dans un sol Pulvérulant, Revue Synthèse, UBMA (23), 22.
[13] Brady, B., Brown, E. 1985. Rock mechanics for underground mining. George Allen and Unwin. London.
[14] Goodman R.E., Bray J.W., 1976. Toppling of rock slopes. InRock Engineering for Foundations & Slopes, ASCE. 201-234.
[15] Pritchard, M.A., Savigny, K.W., 1990. Numerical modelling of toppling. Canadian Geotechnical Journal, vol. 27(6), 823-834.
[16] Goodman R. E., 1989. Introduction to rock mechanics. New York, vol. 2, 576.
[17] Priest S.D., 1993. Discontinuity analysis for rock engineering, Chapman & Hall, New York.
[18] Brady B. H. G., & Brown E. T., 1993. Rock mechanics for underground miningChapman & Hall, London, UK.
[19] Dezayes C., 2007. Réseau de fractures dans le Dogger de Bourgogne. Données pour le calcul de perméabilité équivalente, BRGM/RP-FR-54955.
[20] Bieniawski Z. T., 1976. Rock mass classification of jointed rock masses.Exploration for Rock Engineering. Johannesburg: Balkema, 97-106.
[21] Romana M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes, In International symposium on the role of rock mechanics, Zacatecas, 49-53.
[22] Gunzburger Y., & Merrien-Soukatchoff V., 2002. Caractérisation mécanique d'un grand versant rocheux instable au moyen d'un système RMR-Cas de la Clapière (Alpes Françaises). In Symposium International PARAM, 541-548.

©UBMA - 2017

[23] González-Cao J., Varas F., Bastante F. G., & Alejano L. R., 2013. Ground reaction curves for circular excavations in non-homogeneous, axisymmetric strain-softening rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 5(6), 431-442.
[24] Hammah R. E., Yacoub T. E., & Curran J. H., 2009. Probabilistic slope analysis with the finite element method, In 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium, American Rock Mechanics Association.
[25] Wildi W., 1983. La chaîne tello-rifaine (Maroc, Algérie, Tunisie), Structure, Stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. Rev. Géol. Dyn. Géog. Phys, vol. 21, 201-297.
[26] Hadjigeorgiou J., Lessard J. F., & Flament F., 1995. Characterizing in-situ block size distribution using a stereological model, Canadian tunnelling, 111-121.
[27] Barton N., Lien R., & Lunde J., 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock mechanics, vol. 6(4), 189-236.
[28] Martin G., 2000. Conception des excavations minières souterraines à l'aide de la modélisation de réseaux de discontinuités. Thèse présentée à l'Université Laval, Québec, Canada. 163p.
[29] Romana M., 1993. A geomechanical classification for slopes: slope mass rating. Comprehensive rock engineering, vol. 3(1), 575-599.
[30] Serafim J. L., & Pereira, J. P., 1983. Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski, In Proceedings international symposium engineering geology and underground construction, Vol. 1, 1133-1142.
[31] Bieniawski, Z. T., 1979. Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng., vol. 15, 335-344.
[32] Trunk U., Hönisch K., 1989. Cited at Rock mechanics Design in Mining and Tunneling, Bieniawski, p.183.
[33] ISRM., 1978. Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Society of Rock Mechanics, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, vol. 15, 319-368.
[34] Piteau D. R., & Martin D. C., 1982. Mechanics of rock slope failure. stability in surface mining, 3rd edn. Society of Mining Engineer of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineering. New York.

©UBMA - 2017