

UE – Carrière Durable

*Etude de stabilité sur les fronts de taille de la
carrière Imerys Refractory Minerals Glomel*

Table des matières

Introduction.....	4
Contexte	5
Présentation du bloc étudié.....	6
Logiciels de modélisation	7
Modélisation 2D.....	7
Définition des paramètres des matériaux	7
Définition de la géométrie et affectation des matériaux.....	9
Modélisation du déplacement	11
Modélisation des contraintes	12
Facteur de sécurité	13
Discussion	14
Corrélation des résultats avec trois autres études entre la fosse 2 et la fosse 3	17
Conclusion.....	18
Références bibliographiques	19

Table des illustrations

<i>Figure 1 : Cartographie des fronts investigués lors de l'étude de stabilité de 2010 au sein de la fosse 2 (M. DUCHENE)</i>	5
<i>Figure 2 : bloc étudié, vu depuis la banquette (M.DUCHENE, 2010)</i>	6
<i>Figure 3a : Bloc étudié, vu de front (M. DUCHENE, 2010)</i>	6
<i>Figure 4 : Schéma de principe de la géométrie du bloc étudié et de son plan de glissement (M. DUCHENE, 2010)</i>	7
<i>Figure 5 : Définition des paramètres des matériaux étudiés dans le logiciel Disroc. À gauche, la fracture, à droite, les schistes.</i>	8
<i>Figure 6 : Géométrie plane du système, et maillage de taille 1</i>	9
<i>Figure 7 : Affectation des matériaux aux lignes et surfaces du modèle (en vert les schistes, en rose la fracture)</i>	10
<i>Figure 8 : Modélisation des différents degrés de déplacement affectant le substratum et le bloc sous le poids propre de ce dernier</i>	11
<i>Figure 9 : Influence de la décroissance des paramètres de raideurs sur la répartition des déplacements.</i>	12
<i>Figure 10 : Effet et répartition des contraintes exercées au sein du système de par le poids propre du bloc. À gauche la contrainte tangentielle, à droite la contrainte normale.</i>	13
<i>Figure 11 : Calcul du facteur de sécurité par Disroc.</i>	13
<i>Figure 12 : Possible surface d'un glissement antérieur, en concordance avec le plan de fracturation P1.</i>	14
<i>Figure 13 : Calcul du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,05 MPa.</i>	15
<i>Figure 14 : Calcul du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,05 MPa, par la méthode du SFR Curve.</i>	15
<i>Figure 15 : Calcul du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,007 MPa. La valeur obtenue est très proche de 1,0, condition limite au-delà de laquelle la stabilité du système est compromise</i>	16
<i>Figure 16 : Calcul du facteur de sécurité avec la méthode du SFR Curve pour une cohésion de 0,007 MPa</i>	16

Introduction

Le présent rapport fait suite à la demande d'IMERYS REFRACTORY MINERALS, société exploitante d'une carrière d'andalousite sur la commune de GLOMEL (Morbihan), d'effectuer un audit sur la stabilité des massifs rocheux dans le cadre de l'extraction des matériaux en fosse.

Ainsi, après avoir défini un contexte géologique et déterminé la nature des matériaux exploités, une modélisation en 2D d'un cas typique de glissement au sein de la fosse 2 sera effectuée, grâce à la combinaison des logiciels Disroc et GiD. Ceci afin de déterminer le facteur de sécurité inhérent à ce type de formation (propension à la chute ou au glissement), et ainsi définir un degré de sûreté pour sécuriser les installations et les travailleurs en fosse d'extraction.

Une discussion sera alors mise en place, afin de déterminer l'influence de la variation de certains paramètres des matériaux (raideur, cohésion...) dans la stabilité du système, et voir quelle en est l'implication directe dans le cas d'étude.

Contexte

Comme mentionné précédemment, le cas d'étude est situé dans une carrière d'andalousite. Cette dernière exploite les schistes correspondant à un métamorphisme des sédiments de l'Ordovicien au contact de plutons granitiques.

De nombreux filons doléritiques traversent également les massifs rocheux présents au droit de la carrière.

Une précédente étude de stabilité, menée en février 2010 par Magalie DUCHENE et faisant suite à divers incidents de glissements en 2009 dans la fosse 2 mettant en jeu la sécurité des travailleurs et la pérennité des infrastructures et de l'exploitation, a déterminé que les problèmes d'instabilité étaient imputables à la présence de nombreuses fractures existantes au sein du massif rocheux, inhérentes à l'histoire géologique régionale mouvementée.

Ces dernières sont de trois types distinctifs : des diaclases, plutôt anarchiques et sans traces de déplacement ou de remplissage, des fractures présentant des remplissages plus ou moins argileux et des failles majeures recoupant l'intégralité du front de taille, globalement de direction N40.

La figure ci-dessous présente les différents fronts étudiés à la lumière de ces investigations, à la cote 190 NGF.

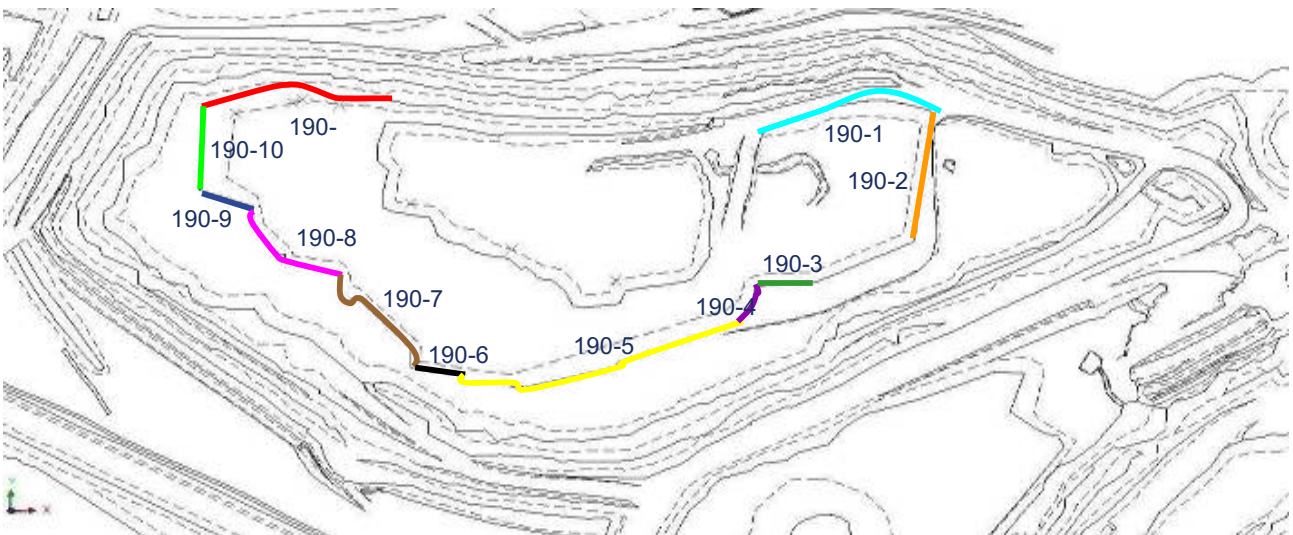


Figure 1 : Cartographie des fronts investigués lors de l'étude de stabilité de 2010 au sein de la fosse 2 (M. DUCHENE)

La présente étude se focalisera sur le front 190- 8, où une zone potentiellement à risque de glissement plan a été repérée.

Présentation du bloc étudié

Sur le front étudié, d'un pendage d'environ 80°, l'étude se concentre sur la stabilité d'un bloc de schiste tétraédrique (cf. Figures 2a et 2b ci-dessous) d'environ 50m³ (dimensions approximatives selon photographies : 6m x 5m x 5m).



Figure 3a : Bloc étudié, vu de front (M. DUCHENE, 2010)



Figure 2 : bloc étudié, vu depuis la banquette (M.DUCHENE, 2010)

Le bloc étudié repose directement sur le substratum rocheux, dont il est séparé par une fracture majeure correspondant au plan P1 ci-dessus (cf. Figures 2a et 2b), dont le pendage est N110 – E50.

Le schéma ci-dessous (Figure 3) présente de manière simplifiée la géométrie du bloc et son plan de glissement.

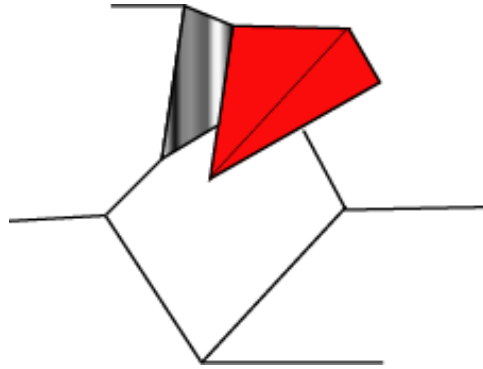


Figure 4 : Schéma de principe de la géométrie du bloc étudié et de son plan de glissement (M. DUCHENE, 2010)

D'après le rapport de Magalie DUCHENE, la fracture matérialisant le plan P1 ne présente aucun remplissage, aucune présence d'eau et une rugosité faible.

Logiciels de modélisation

Comme annoncé précédemment, la présente étude s'attache à effectuer la modélisation en deux dimensions du système formé par le bloc 190- 8, le substratum et la fracture les séparant.

Pour ce faire, deux logiciels seront utilisés :

- GiD, un logiciel faisant office d'interface graphique et servant à définir les géométries et afficher les résultats des différents calculs ;
- Disroc, logiciel permettant de définir les paramètres mécaniques des matériaux et initiant les différentes phases de calcul.

Modélisation 2D

Définition des paramètres des matériaux

La première étape est de définir les différents paramètres relatifs aux matériaux étudiés. Les paramètres en question sont définis selon le modèle choisi pour faire l'étude.

Pour la fracture, un modèle linéaire élasto-plastique des plus classiques, basé sur la loi de Mohr-Coulomb, sera utilisé. Il nécessite l'utilisation des paramètres de raideur (K_t , K_n , K_{tn}), de la cohésion c et de l'angle de frottement interne φ .

En l'absence de données issues de tests en laboratoire, des données bibliographiques ont été choisies afin de renseigner ces paramètres. Ainsi, on définira comme suit :

- $K_t = 0,25 \times K_n = 25\ 000\ \text{MPa/m}$ (d'après la thèse de M. CHALHOUB) ;

- $K_n = 100\,000$ MPa/m (M. CHALHOUB) ;
- $K_{tn} = 0$ MPa/m ;
- $c = 0,1$ MPa (valeur arbitraire, sera sujette à modifications ultérieures) ;
- $\varphi = 35,5^\circ$ (thèse de 2003 de l'université de Pretoria).

Pour la roche (ici, des schistes), un modèle linéaire élastique et un matériau isotrope ont été choisis. Les paramètres nécessaires à l'application de ce modèle sont le module de Young E et le coefficient de Poisson ν .

De la même manière, les données sont issues d'une recherche bibliographique. Ainsi :

$E = 20\,000$ MPa (KEMTHONG R., 2006) ;

$\nu = 0,15$ (CHALHOUB M.).

On définit également la densité du matériau, estimée ici à 2,0 (densité moyenne d'après les recherches bibliographiques).

Dans le logiciel Disroc, on peut alors définir les matériaux étudiés d'après les paramètres précités (Figure 5).

Rappelons que la présente modélisation s'appuie sur des modèles simplifiés, qui ne peuvent nécessairement pas prendre en compte l'ensemble des facteurs influant réellement sur la stabilité des systèmes étudiés. Ainsi, une marge d'erreur sera impérativement à prendre en compte par rapport aux conclusions de cette étude.

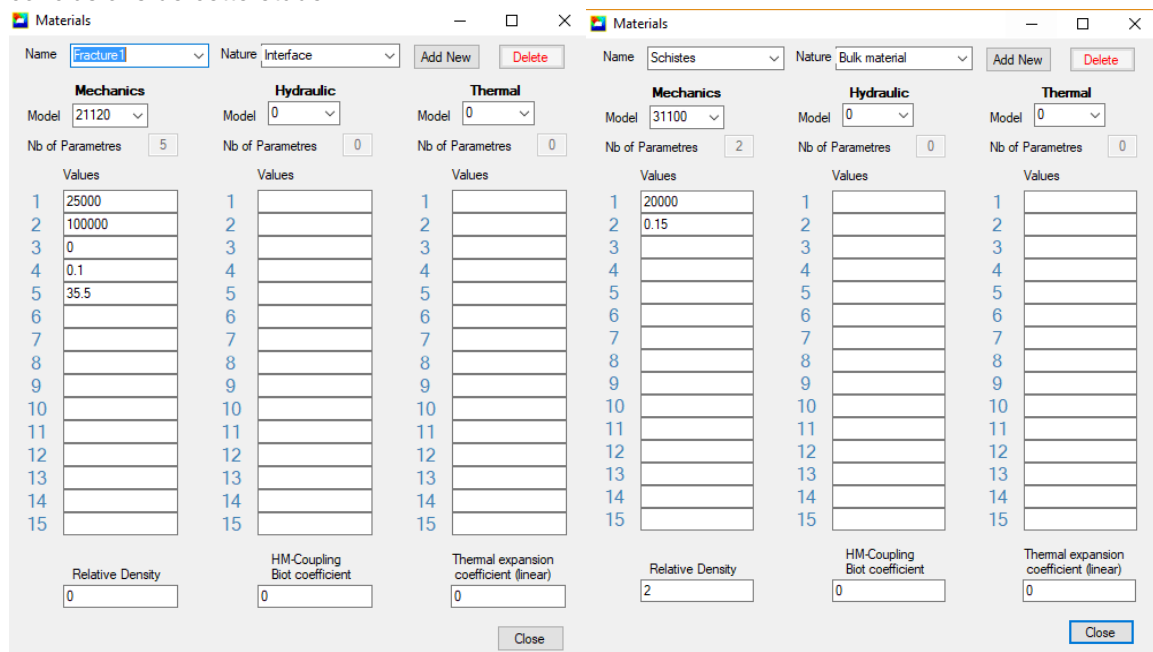


Figure 5 : Définition des paramètres des matériaux étudiés dans le logiciel Disroc. À gauche, la fracture, à droite, les schistes.

Définition de la géométrie et affectation des matériaux

L'étape suivante consiste à définir la géométrie du système étudié. Pour rappel, voici les principales caractéristiques géométriques utilisées pour bâtir le modèle :

- Hauteur totale du front de taille : 10 m ;
- Pente du front de taille : 80° ;
- Dimensions du bloc : hauteur de 6 m et épaisseur de 5 m ;
- Pente du plan de fracturation : 50° .

Grâce au logiciel GiD, on obtient en combinant ces informations un modèle plan du système étudié (Figure 6).

Pour pouvoir appliquer les différentes contraintes par la suite et modéliser les déplacements, on applique alors un maillage, ici de taille 1.

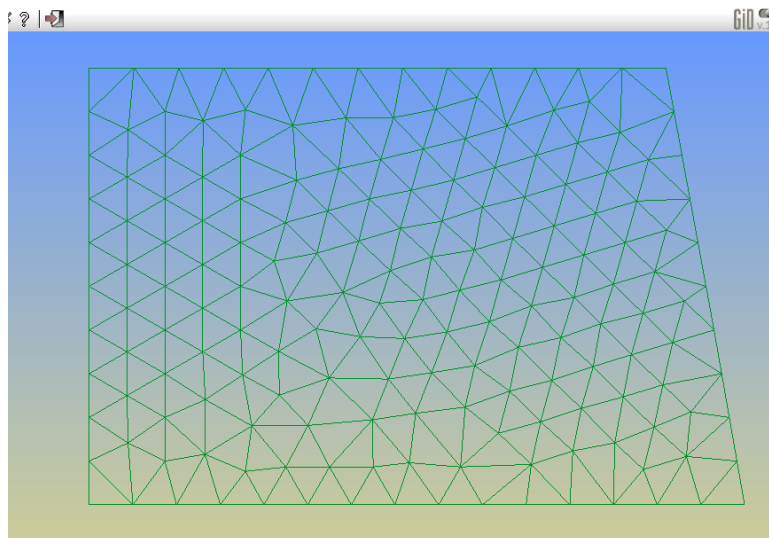


Figure 6 : Géométrie plane du système, et maillage de taille 1

Une fois les caractéristiques géométriques et le maillage entrés dans le logiciel, on affecte les matériaux aux différentes surfaces et lignes du modèle (Figure 7).

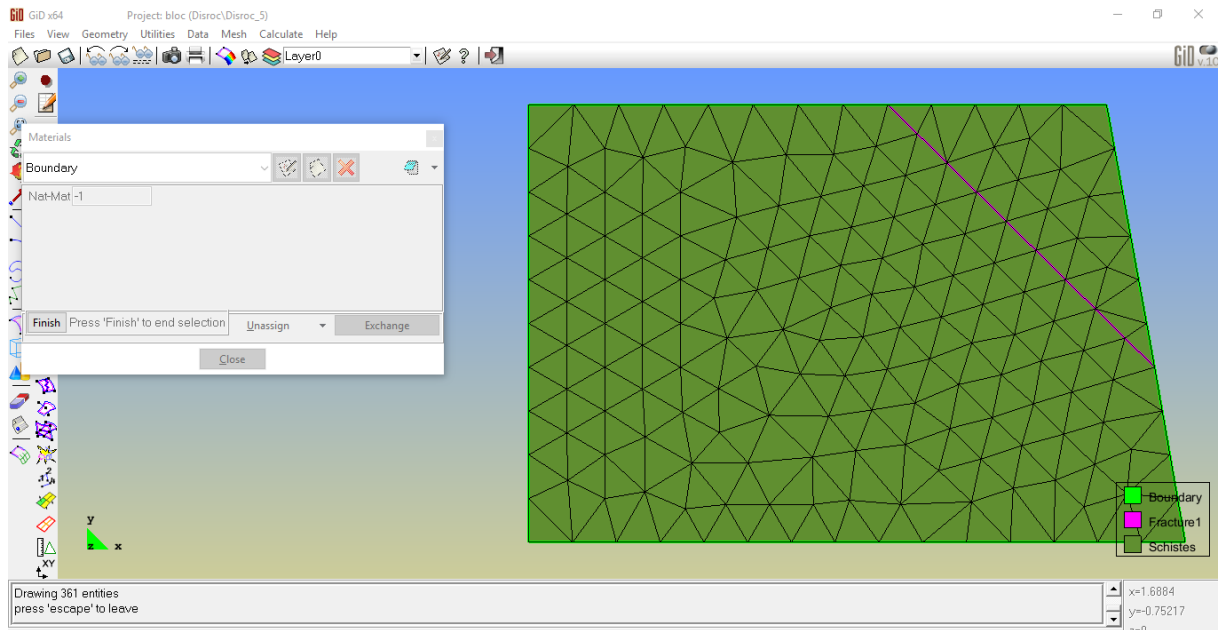


Figure 7 : Affectation des matériaux aux lignes et surfaces du modèle (en vert les schistes, en rose la fracture)

Enfin, on empêche les déplacements sur les parties du modèle qui ne sont pas concernées par l'étude, à savoir la ligne la plus à gauche et celle du bas.

Modélisation du déplacement

Afin de matérialiser le déplacement du bloc, on définit d'abord que ce dernier ne sera affecté que par son poids propre.

On peut alors modéliser les différents degrés de déplacements subis non seulement par le bloc mais aussi les effets sur le substratum (Figure 8).

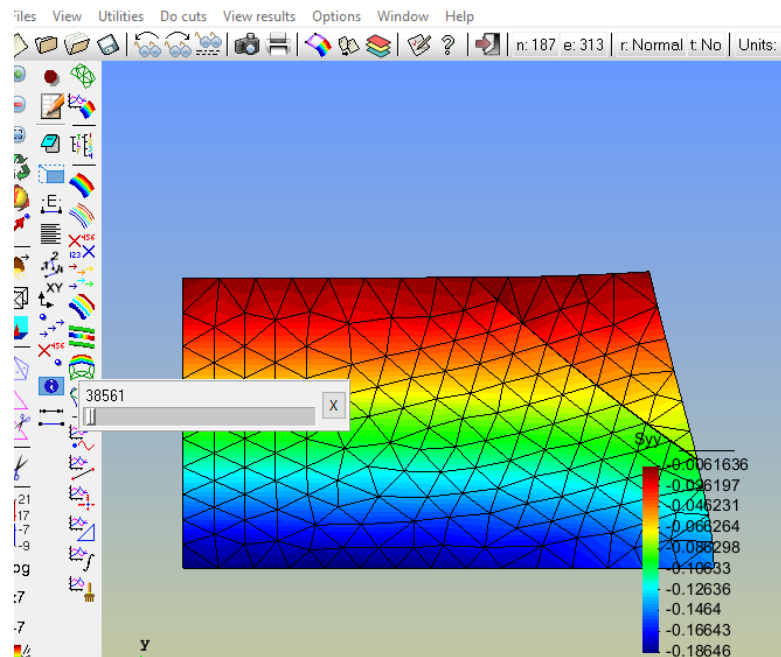


Figure 8 : Modélisation des différents degrés de déplacement affectant le substratum et le bloc sous le poids propre de ce dernier

On constate que les déplacements subis ne sont pas significatifs.

À ce stade de la modélisation, il est possible d'influer sur les facteurs de raideur (K_t , K_n , K_{tn}), afin d'accentuer « virtuellement » les déplacements (Figure 8). En clair, on « isole » de plus en plus le bloc du substratum en même temps que les valeurs paramètres de raideur décroissent.

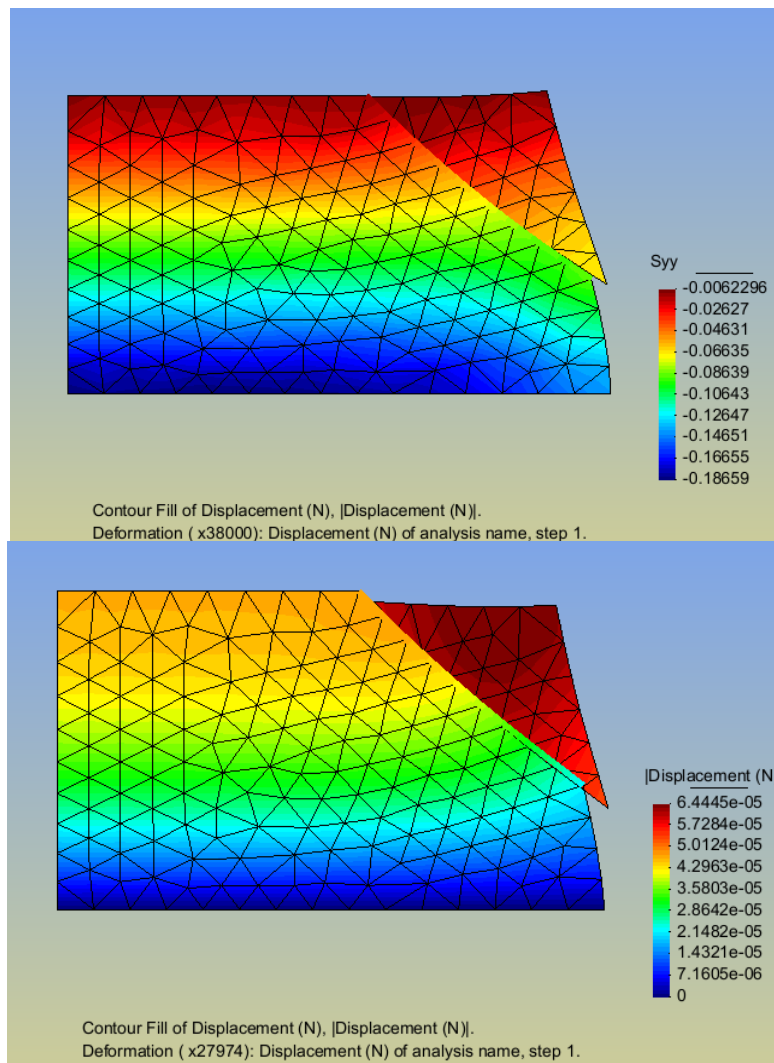


Figure 9 : Influence de la décroissance des paramètres de raideurs sur la répartition des déplacements.

En haut pour $K_t = 10\ 000$ MPA/m, en bas pour $K_t = 1000$ MPa/m.

Malgré cette « concentration » artificielle des déplacements au seul bloc, on constate que ces derniers restent de faible ampleur. L'influence des paramètres de raideur a donc dans le cas présent relativement peu d'impact.

Modélisation des contraintes

Après avoir observé l'aspect relatif aux déplacements au sein du système étudié, l'étape suivante consiste à mettre en valeur l'action des différentes contraintes (normale et tangentielle).

La Figure 10 ci-après illustre les effets de ces dernières et leur répartition.

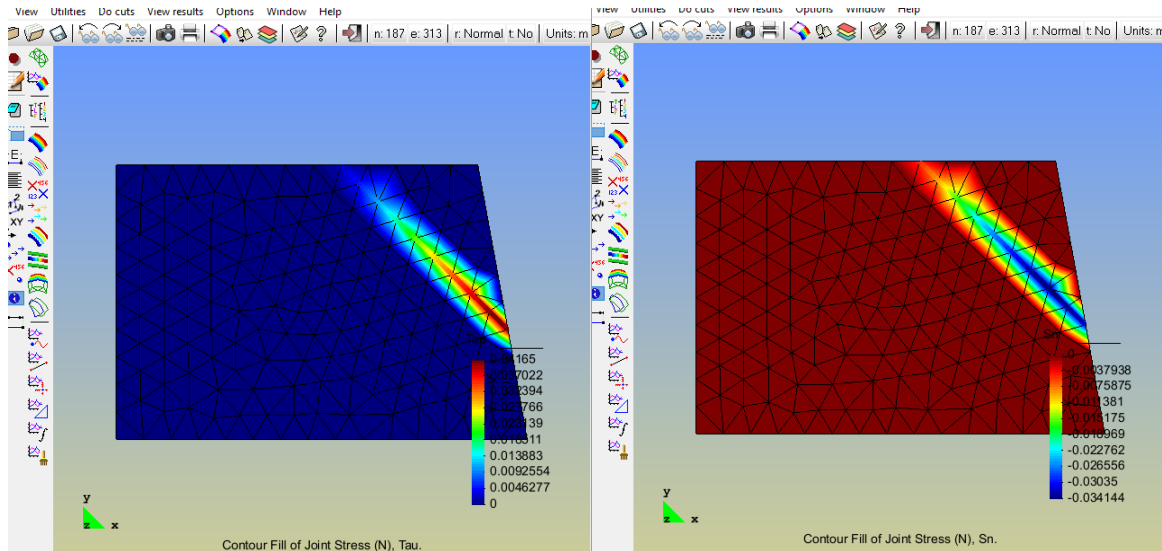


Figure 10 : Effet et répartition des contraintes exercées au sein du système de par le poids propre du bloc. À gauche la contrainte tangentielle, à droite la contrainte normale.

On constate ainsi que l'essentiel des contraintes, qu'elles soient normales ou tangentielles, s'exercent sur le plan de faiblesse matérialisé par la fracture.

De plus, comme on peut s'y attendre d'un système où seul le poids est pris en compte, l'essentiel des effets des contraintes s'exerce sur le bas de la fracturation.

Facteur de sécurité

Le logiciel Disroc, à partir de toutes les données implémentées pour bâtir le modèle, est également capable de définir le facteur de sécurité du système.

Pour rappel, un facteur de 1 représente l'équilibre entre stabilité et instabilité, et est considéré comme insuffisant pour assurer la sécurité (on recherchera plutôt au minimum un facteur 1,5 à 2,0).

Dans le cas présent, le système étudié présente un facteur de sécurité de l'ordre de 4,9 (Figure 11), ce qui tend à montrer une stabilité importante.

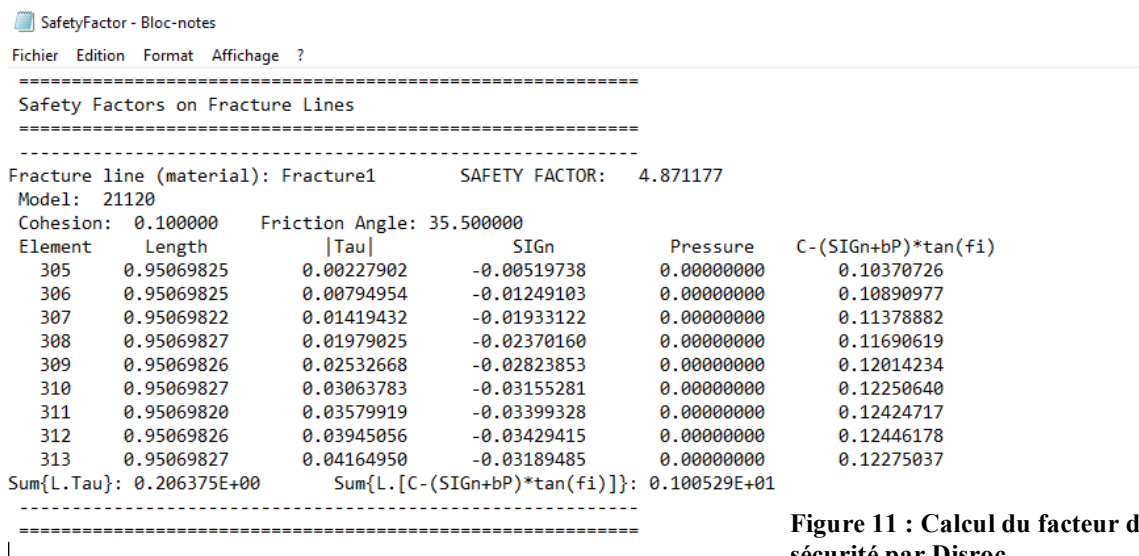


Figure 11 : Calcul du facteur de sécurité par Disroc.

Discussion

Ainsi, le système 190-8, malgré une propension apparente à l'écaillage et au glissement, ne semble pas d'après la modélisation ci-dessus présenter de risque important d'instabilité, à la lumière du facteur de sécurité déterminé plus haut, largement supérieur à 2,0.

Cependant, en observant la photographie du front étudié (Figure 12), on observe à gauche du bloc une surface lisse, parfaitement en concordance avec le plan P1 de fracturation, et évoquant un glissement précédent.



Figure 12 : Possible surface d'un glissement antérieur, en concordance avec le plan de fracturation P1.

Puisque les conditions, les matériaux et le plan de fracturation étaient les mêmes, comment expliquer qu'un glissement ait pu se produire, alors que le bloc précédemment étudié montre une stabilité importante ?

La seule condition expliquant un glissement dans les mêmes conditions serait une taille de bloc beaucoup plus importante. En effet, en présence des mêmes caractéristiques de matériaux et de géométrie de la fracture, seule l'augmentation des contraintes peut expliquer l'accident. Une augmentation qui passe par l'augmentation du poids, donc de la masse, donc du volume du bloc.

Afin d'approcher ce principe et d'étudier l'effet de l'augmentation de la taille du bloc, il est possible d'utiliser un moyen détourné en agissant sur la cohésion.

En effet, pour rappel, la formule du facteur de sécurité F_s est la suivante :

$$F_s = \frac{c + \sigma n \tan \varphi}{\tau}$$

Or, l'augmentation du poids du bloc implique de manière proportionnelle l'augmentation de la contrainte normale σn .

Ainsi, on voit clairement que cette augmentation impacterait la cohésion c en la divisant proportionnellement. Par exemple, un bloc deux fois plus volumineux reviendrait par extension à considérer une cohésion deux fois plus faible.

En partant de cette réflexion, il est possible d'agir sur la valeur de la cohésion en la diminuant pour simuler un bloc plus important, et observer ce que cela implique sur le facteur de sécurité.

La figure suivante montre l'évolution de la valeur du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,05 MPa, d'abord par une méthode directe, puis par la méthode du SFR Curve qui applique une régression par intervalles afin de donner un encadrement de F_s mettant en jeu à la fois la cohésion et l'angle de frottement du matériau.

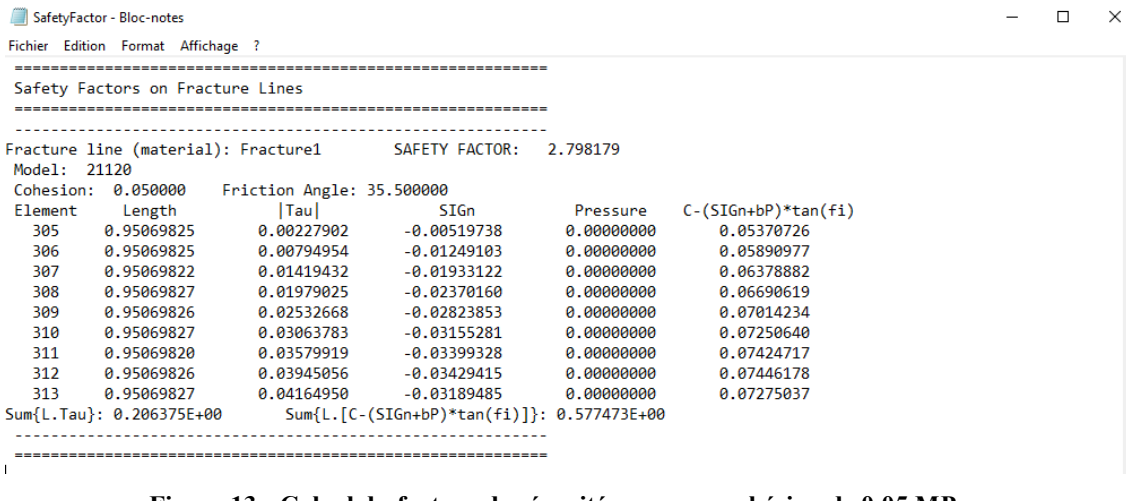


Figure 13 : Calcul du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,05 MPa.

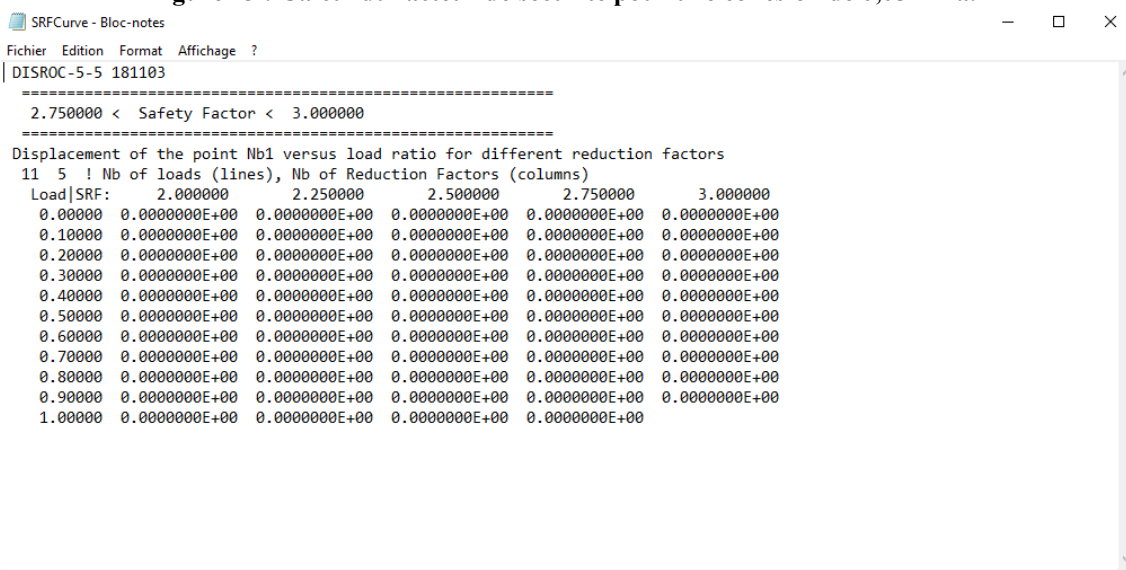


Figure 14 : Calcul du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,05 MPa, par la méthode du SFR Curve.

On remarque d'une part que les deux méthodes donnent sensiblement les mêmes résultats. D'autre part, on observe que le facteur est passé de 4,9 MPa pour une cohésion de 0,1 MPa, à 2,8 pour une cohésion de 0,05 MPa.

Ainsi, l'hypothèse est vérifiée : virtuellement, l'augmentation de la taille du bloc influe de manière négative sur sa stabilité .

Partant de là, on a pu vérifier qu'il y a bien une cohésion limite au-delà de laquelle le facteur de sécurité ne garantit plus la stabilité, et donc une taille limite de bloc.

Cette valeur de cohésion a été déterminée à $c = 0,007$ MPa, pour un facteur de sécurité très proche de 1,0 (Figures 15 et 16).

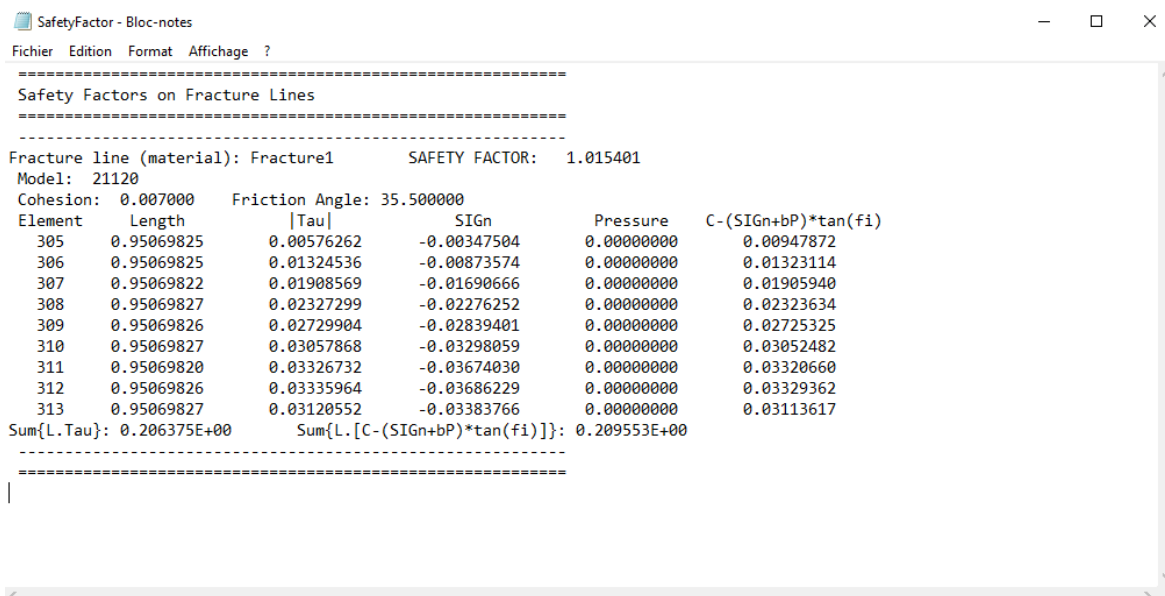


Figure 15 : Calcul du facteur de sécurité pour une cohésion de 0,007 MPa. La valeur obtenue est très proche de 1,0, condition limite au-delà de laquelle la stabilité du système est compromise

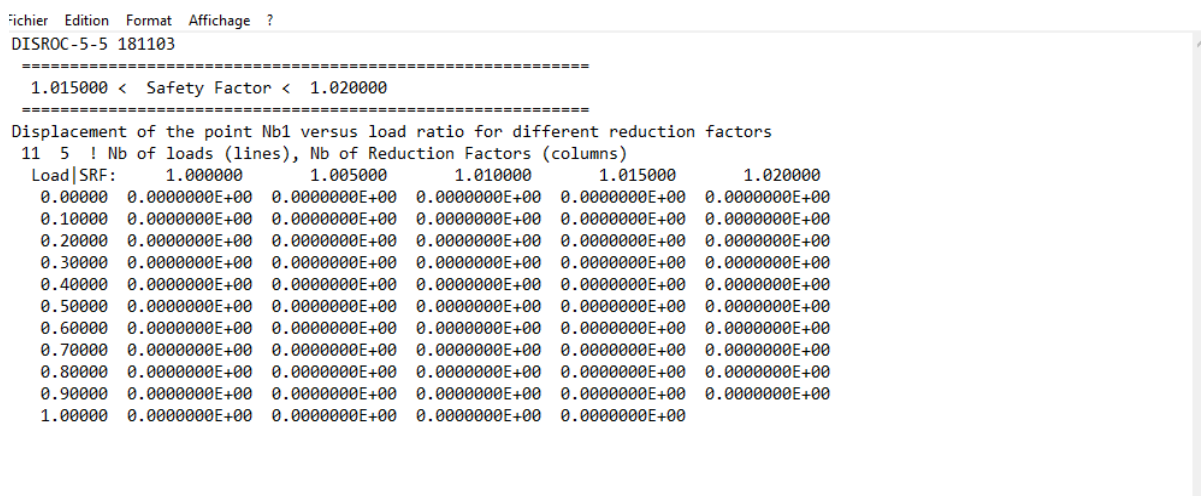


Figure 16 : Calcul du facteur de sécurité avec la méthode du SFR Curve pour une cohésion de 0,007 MPa

Corrélation des résultats avec trois autres études entre la fosse 2 et la fosse 3

Trois autres bureaux d'études (JALOM, 2B2RS et 3D2H) ont également été missionnés pour faire l'étude de la stabilité des massifs rocheux au sein de la carrière d'Imerys à Glomel.

L'un s'est concentré, comme GeoZ, sur un front de la fosse 2 (190-6), les deux autres sur des zones sensibles de la fosse 3.

En termes de caractéristiques des matériaux, on retrouve pour les fracturations des facteurs de raideur relativement disparates selon les remplissages des fractures. Cependant, comme évoqué plus haut, ces derniers n'ont qu'un impact négligeable sur le facteur de sécurité.

De plus, les angles de frottements choisis pour les différentes études s'étalent de 27,5° (conditions humides) à 41° (conditions sèches), en passant par des angles de 34,9° à 35,5° (respectivement post-pic et pic). La variabilité des valeurs s'explique aussi par la diversité des sources bibliographiques. En faisant varier ces angles, les différents bureaux d'études ont noté une variabilité du facteur de sécurité F_s de l'ordre de 0,5 au maximum. Ainsi, l'angle de frottement semble impacter davantage la stabilité que les facteurs de raideur, mais néanmoins d'une manière relativement peu importante du moment que l'on se trouve à distance des conditions limites.

Enfin, la cohésion semble dans tous les cas le paramètre le plus critique. En effet, comme vu précédemment, sa variabilité influe grandement sur le facteur de sécurité. Ainsi, si initialement tous les bureaux d'études obtenaient un facteur de stabilité autour de 4,5 pour des cohésions de 0,08 à 0,1 MPa, le bureau 2B2RS a obtenu un facteur $F_s = 1,0$ pour $c = 0,00001$, et le bureau GeoZ un $F_s = 1,0$ pour $c = 0,007$. Il y a certes un facteur 700 entre les deux valeurs de cohésions, précisons cependant que la géométrie et la taille initiales des blocs différaient de manière importante.

Concernant les paramètres de la roche (schistes) proprement dite, dans tous les cas les variations du module de Young E (de 20 000 à 35 000 MPa) et du coefficient de Poisson ν (de 0,15 à 0,17) n'ont eu que des effets négligeables sur le facteur de stabilité.

Enfin, les plans des fracturations étudiées dans tous les cas s'inséraient dans une gamme relativement large de pendages, puisque les différentes pentes s'étendaient de 34° à 70°. Puisque les résultats de l'étude de stabilité sont cohérents entre les différents fronts étudiés, on peut supposer que les différentes familles de fractures n'ont pas de réelles incidences sur la stabilité globale.

Conclusion

Pour conclure, la modélisation en 2D du front 190-8 montre une stabilité relativement importante, marquée par un facteur de sécurité élevé.

Cependant, il a été démontré que seule la petite taille du bloc permet de garder cette marge de sécurité. Ainsi, il reste très probable que pour des conditions et matériaux semblables des blocs de plus grande importance puissent tomber et provoquer des éboulements ou glissement, puisque les fractures observées dans la carrière sont très nombreuses.

Il faut ajouter à cela une forte corrélation entre les résultats obtenus de par l'étude du front 190-6 dans la fosse 2 et par celle de deux autres zones sensibles dans la fosse 3.

Il demeure donc primordial d'exercer une surveillance constante de ces fronts potentiellement instables, et de mettre en place les mesures de sécurité adéquates (interdiction de circulation à proximité par exemple, tirs de mines préventifs, diminution de la hauteur des fronts de taille...).

Références bibliographiques

MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE. *Arrêté du 03/11/18 portant autorisation d'une installation classée pour la protection de l'environnement mentionnées aux articles R. 512-31 du code de l'environnement* ; [en ligne]. Disponible sur : <http://www.installationsclassees.developpement-durable.gouv.fr>

Duchene, M., 2010. Etude de stabilité du front de taille, Mine de Glomel. Rapport interne Imerys Refractory Minerals Glomel

IGC Environnement. (2018). Site de Guerphalès. Analyse du contexte géologique structural entre la fosse 3 et le site du Minez Du. Proposition d'implantation de piézomètres(s) de contrôle. Annexe 6, 52 p.

Kemthong, R. (2006). DETERMINATION OF ROCK JOINT SHEAR STRENGTH. Thèse de master : ingénierie en géotechnique. Suranaree : Université de Technologie, 144 p.

GiD - The personal pre and post processor. Date de consultation : 14/11/2018. Disponible sur : <https://www.gidhome.com/>

Pouya, A. Un code aux Eléments Finis dédié aux roches fracturées, 12 p