

UNE NOUVELLE METHODE D'ESTIMATION DU CHARGEMENT DES PILIERS DE MINES ET LES PERSPECTIVES ENVISAGEABLES

A NEW METHOD FOR DETERMINING MINE PILLAR LOADING AND THE CONCEIVABLE PROSPECTS

Thomas HAUQUIN, Olivier DECK, Yann GUNZBURGER
Laboratoire GeoRessources, Université de Lorraine, CNRS, CREGU. École des Mines de Nancy, Campus ARTEM, CS14234, 54042 Nancy, France

RÉSUMÉ – Cet article présente une récente méthode d'estimation de la contrainte verticale moyenne de piliers de mines aux dimensions irrégulières. Par comparaison aux résultats issus de la méthode traditionnelle de l'aire tributaire, nous montrons les avantages de cette nouvelle méthode aussi bien du point de vue de l'évaluation de la stabilité des mines existantes que de celui du dimensionnement de futures exploitations.

ABSTRACT – This study presents a new method for determining the loading of irregular mine pillars. We show, through a comparison with the results obtained by using the traditional tributary area method, the advantages of using this method regarding the stability assessment of existing mines and the design of future underground exploitations.

1. Introduction

La stabilité des mines souterraines exploitées par la méthode des chambres et piliers représente un enjeu majeur pour les exploitants de minerai mais également pour les communes situées à l'aplomb d'exploitations abandonnées. En effet, la détérioration progressive de la roche située à proximité des zones exploitées peut mener à un affaissement, parfois rapide, de la surface topographique.

La stabilité des mines repose majoritairement sur la capacité des piliers laissés en place à soutenir la sollicitation verticale à laquelle ils sont soumis sous l'effet du poids du recouvrement. Traditionnellement, les piliers sont considérés comme stables lorsque le rapport résistance/contrainte verticale moyenne (Facteur de Sécurité : FS) est significativement supérieur à 1. De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude de la résistance des piliers mais beaucoup moins l'ont été à l'étude de leur chargement rendant la détermination du dénominateur du FS relativement incertaine. Encore récemment, la principale méthode de détermination du chargement vertical des piliers (théorie de l'aire tributaire) n'était valable que dans le cas de piliers de dimensions uniformes. Afin de maîtriser les performances des piliers, les exploitations modernes se font donc généralement par panneaux constitués de piliers de production de géométrie régulière. Cependant, les panneaux sont souvent séparés les uns des autres par des piliers barrières de plus grandes dimensions dont l'effet sur le chargement des piliers de production est difficilement déterminable à partir des méthodes traditionnelles.

Tout d'abord, nous évoquerons succinctement deux méthodes générales permettant d'estimer le chargement des piliers, puis nous présenterons une méthode plus récente qui est avantageuse pour des piliers aux dimensions irrégulières. Nous rappellerons ensuite brièvement comment peut être estimée la capacité portante d'un pilier. Enfin, nous verrons dans quelles mesures la nouvelle méthode du calcul du chargement des piliers peut être utile pour estimer l'état de stabilité d'une mine abandonnée ou pour dimensionner de nouvelles exploitations à partir du facteur de sécurité FS .

2. État de contrainte et capacité portante des piliers

2.1. Facteur de sécurité et probabilité de rupture

L'état de contrainte à l'intérieur d'un pilier provient de la modification locale de l'état de contrainte *in situ* induite par le creusement de la mine. En dessous de certains seuils de l'état de contrainte, on considère généralement que les piliers se comportent de manière élastique linéaire. Si on fait l'hypothèse d'un tel comportement, le champ de contrainte est fortement hétérogène et difficile à quantifier analytiquement à l'intérieur des piliers. En pratique, la détermination de leur état de contrainte se résume souvent à une contrainte axiale moyenne qu'il est possible d'estimer à partir de considérations simplifiées.

Les piliers sont le plus souvent verticaux. La comparaison de la contrainte verticale moyenne qu'ils subissent à leur capacité portante, estimées à partir d'équations empiriques, permet d'évaluer leur état de stabilité à partir du Facteur de Sécurité (FS) :

$$FS = R_p / \sigma_{vm} \quad (1)$$

En théorie, une valeur de $FS > 1$ doit garantir la stabilité des piliers. Cependant, il existe en pratique des piliers auxquels une valeur élevée du facteur de sécurité est attribuée et qui s'effondrent tout de même. Il est donc plus pertinent d'évaluer la stabilité des piliers selon une approche basée sur le risque (Salamon *et al.*, 2005).

À partir des FS attribués à aux piliers d'une base de données, la probabilité de rupture associée à chaque valeur de FS peut être estimée à partir de la distribution cumulée des FS attribués aux piliers instables d'une base de données (Salamon *et al.*, 1998). Appliquée à la base de données de piliers de charbon utilisée par Salamon et Munro (1967), cette méthode attribue une probabilité de rupture inférieure à 1 % à un $FS = 1,6$, c'est pourquoi il avait été suggéré qu'une valeur de 1,6 devait être recherchée dans le cadre d'un bon dimensionnement. Les valeurs recommandées dans la littérature sont variables en fonction des bases de données et du degré de sécurité recherché mais restent assez cohérentes dans différents contextes. Elles varient souvent entre 1,5 et 2.

2.2. Méthodes de détermination de la contrainte verticale moyenne

La méthode quasiment universellement utilisée pour estimer la contrainte verticale moyenne (chargement) des piliers de mine est la théorie de l'aire tributaire. Elle a été utilisée dans un contexte minier pour la première fois par Salamon et Munro (1967) dans le cadre de la rétro-analyse de l'effondrement de la mine de Coalbrook (1960, Afrique du Sud). Elle consiste à calculer le poids d'une colonne de terrain située au-dessus de la section d'un pilier et de la moitié de la section le séparant des piliers adjacents (Section totale = Aire tributaire), puis à diviser ce poids par la section horizontale du pilier pour obtenir sa contrainte verticale moyenne.

C'est une méthode extrêmement simple d'utilisation pouvant s'appliquer aussi bien en deux qu'en trois dimensions, ce qui explique, notamment, qu'elle ait été privilégiée par rapport à d'autres méthodes plus complexes issues de la théorie des poutres et de l'élasticité linéaire uniquement valables en deux dimensions. Cependant, elle est purement statique et ne prend donc pas en compte la déformabilité de la roche. Son application est théoriquement limitée à des mines infiniment grandes et de géométrie parfaitement régulières présentant un motif invariable par translation. Appliquée à des géométries irrégulières, la méthode de l'aire tributaire surestime significativement la contrainte des piliers les plus chargés.

Poulsen (2010) a proposé une modification de la théorie de l'aire tributaire afin de prendre en compte les variations géométriques d'une mine pour estimer le chargement des piliers qui la constituent. Sa méthode doit tenir compte du fait que la contrainte verticale moyenne d'un pilier dépend non seulement de la géométrie locale de la mine, mais également de l'interaction du pilier considéré avec les autres piliers situés dans son environnement proche. Elle présente l'avantage d'être simple d'utilisation, mais s'avère n'être valide que dans certaines configurations spécifiques, notamment en présence d'un recouvrement beaucoup plus rigide que les piliers sur lesquels il repose (Hauquin *et al.*, 2016). Dans le cas général et en conditions élastique linéaires, la méthode de Poulsen sous-estime significativement le chargement des piliers.

Les deux méthodes évoquées ci-dessus utilisent une forme d'expression commune pour calculer la contrainte verticale moyenne d'un pilier dépendant de la masse volumique moyenne du recouvrement ρ , de l'accélération de la pesanteur g et de la profondeur H :

$$\sigma_{vm} = \rho g H / (1 - r) \quad (2)$$

Le taux de défrètement r correspond au rapport d'une section excavée par une section totale (excavée + piliers) calculé sur une certaine surface horizontale. Dans le cas de la théorie de l'aire tributaire initiale, cette surface correspond à l'aire tributaire (définie précédemment) du pilier considéré. Dans le cas de la méthode de Poulsen (2010) r se calcule à l'intérieur d'une surface d'influence circulaire centrée sur le pilier considéré et dont le rayon est une fonction quadratique de la profondeur à laquelle il se trouve (voir Abel, 1988). Plus le pilier considéré est profond, plus sa surface d'influence est grande et plus le nombre de piliers enveloppés dans le calcul du taux de défrètement est important. On parle d'un taux de défrètement en « champ proche ».

À l'échelle d'une mine, r indique le pourcentage d'extraction de minerai dans le gisement. Cet indice est donc à la fois un indicateur du chargement des piliers et de la productivité d'une mine. C'est la raison pour laquelle il est presque universellement utilisé.

Une nouvelle méthode analytique de calcul du chargement de piliers irréguliers vient d'être proposée par Hauquin *et al.* (2016). Elle prend en compte à la fois le taux de défrètement local r_L autour d'un pilier et le taux de défrètement total r_t de la mine. Pour ce faire, le concept de taux de défrètement relatif r_{rel} a été introduit :

$$r_{rel} = r_L / r_t \quad (3)$$

Des résultats de modélisation numérique en milieu élastique et continu ont permis de montrer qu'une fonction quadratique de r_{rel} de la forme :

$$\sigma_{vm} = \rho g H (1 + B \cdot r_{rel} + C \cdot r_{rel}^2) \quad (4)$$

permettait de décrire adéquatement la contrainte verticale moyenne des piliers dans des configurations géométriques aléatoires et pour des profondeurs et des largeurs d'exploitation variées. Il a été suggéré que les coefficients B et C devaient être décomposés de la manière suivante :

$$B = b \cdot \frac{r_t}{(1 - r_t)} ; C = c \cdot \frac{r_t}{(1 - r_t)} \quad (5)$$

Une étude numérique de sensibilité a permis de montrer que, dans des configurations minières courantes avec des taux de défrètement totaux compris entre 30% et 75%, des

profondeurs d'exploitation comprises entre 50 et 500 mètres et des largeurs d'exploitation variables, b et c pouvaient être approchés par les fonctions suivantes de r_t :

$$b = -5,83.r_t^2 + 2,57.r_t + 0,63 \quad c = 5,29.r_t^2 - 2,06.r_t + 0,21 \quad (6)$$

Avec une erreur commise par rapport aux résultats numériques d'environ 1,5% en moyenne avec un écart type de l'ordre de 3,5% la fonction quadratique du taux de défrètement relatif s'avère être plus précise que les deux méthodes préexistantes dans le cas d'un milieu aux propriétés mécaniques homogènes mais également lorsque le rapport de module d'Young entre les piliers et la roche encaissante est compris entre 0,16 et 6.

2.3. Capacité portante des piliers

Après l'effondrement de la mine de charbon de Coalbrook (1960, Afrique du Sud) de nombreux auteurs, sous l'impulsion de Salamon et Munro (1967), ont tenté d'estimer la capacité portante (résistance) des piliers de charbon sur la base de rétro-analyses statistiques de bases de données contenant des informations sur des piliers stables et instables dans des zones ayant subi des effondrements. La plupart d'entre eux a considéré que le chargement des piliers pouvait être estimé à partir de la méthode de l'aire tributaire puis a cherché à ajuster une équation de résistance des piliers permettant de faire en sorte que la répartition des FS (Eq. 1) attribués aux piliers des bases de données maximise la vraisemblance avec une distribution théorique où 50 % des piliers ayant un $FS = 1$ devaient être stables ou instables. Un peu plus tard et dans d'autres contextes, certains chercheurs, parmi lesquels on peut citer Hedley et Grant (1972) ont travaillé sur les piliers de roche « dure » (quartzites, conglomérats, calcaires etc.) à partir des mêmes méthodes. Il ressort communément à toutes les études qui ont été menées à ce sujet que la capacité portante des piliers peut s'approcher par des fonctions du rapport largeur/hauteur (l/h) et de la résistance en compression de la roche UCS de la forme :

$$R_p = K.UCS.\frac{l^\alpha}{h^\beta} \quad (7)$$

Pour des piliers « côtes » infiniment longs, Hedley et Grant (1972) utilisent les coefficients : $K = 1$, $\alpha = 0,5$ et $\beta = 0,75$. Pour des piliers carrés de calcaire de bonne qualité, Roberts et al. (2007) utilisent les valeurs: $K = 0,65$, $\alpha = 0,30$ et $\beta = 0,59$.

3. Conséquences de l'utilisation de la fonction quadratique

3.1. Conséquences sur l'évaluation de la stabilité d'une mine irrégulière

Considérons une géométrie fictive de mine à 400 m de profondeur, contenant 19 piliers et 20 chambres de largeur aléatoire (entre 6 et 15 m) et de hauteur constante (5 m), en deux dimensions suivant l'hypothèse des déformations planes (piliers et chambres infiniment longs hors du plan), et analysons cette géométrie du point de vue de la contrainte verticale moyenne agissant le long de la section centrale de chaque pilier.

La géométrie est tout d'abord construite à l'aide d'un code de modélisation par différences finies (FLAC, Itasca) à l'intérieur d'un modèle rectangulaire soumis à un chargement gravitaire et à des conditions aux limites oedométriques. La répartition des contraintes obtenues numériquement en faisant l'hypothèse d'un milieu continu, homogène et au comportement élastique linéaire ($E = 10$ GPa, $\nu = 0,25$) permet d'avoir une première détermination des contraintes verticales moyennes au centre de chaque

pilier. Ces contraintes moyennes sont comparées à celles obtenues par les méthodes de l'aire tributaire ainsi que par la fonction quadratique du taux de défrèvement relatif récemment développée. Les résultats sont présentés en Figure 2a.

Les résultats issus des deux méthodes de calcul suivent une même tendance. En effet, les piliers les plus chargés le sont quelle que soit la méthode utilisée (idem pour les piliers les moins chargés). Cependant, la méthode de l'aire tributaire surestime les fortes valeurs de contrainte par rapport aux résultats numériques. Si on admet que ces derniers sont les plus représentatifs, la fonction quadratique offre une meilleure estimation du chargement des piliers et ne présente pas de tendance à surestimer ou à sous-estimer les contraintes.

Connaissant la largeur et la hauteur des piliers, et en admettant que la résistance en compression de la roche $UCS = 100 \text{ MPa}$, on peut estimer la capacité portante des piliers modélisés à partir d'une équation empirique de résistance. Utilisons à titre d'exemple l'Eq. 7, avec les coefficients appropriés, dont le modèle réalisé respecte les conditions d'application ($l/h < 3$). À partir des capacités portantes, deux FS sont estimés pour chaque pilier en utilisant respectivement la méthode de l'aire tributaire et la fonction quadratique pour estimer leur chargement (résultats en Figure 2b). En admettant qu'un facteur de sécurité de 1,8 doit être recherché, interprétons les résultats suivant deux indicateurs : le nombre de piliers ayant un $FS \leq 1,8$ et le FS moyen de tous les piliers.

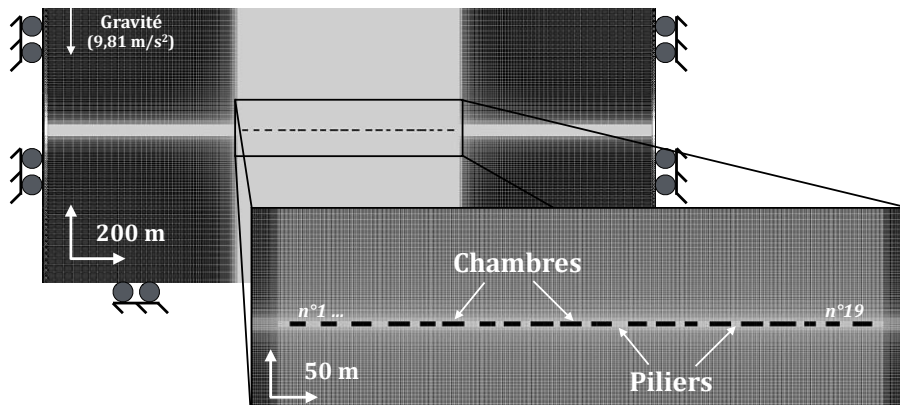


Figure 1. Géométrie du modèle numérique réalisé.

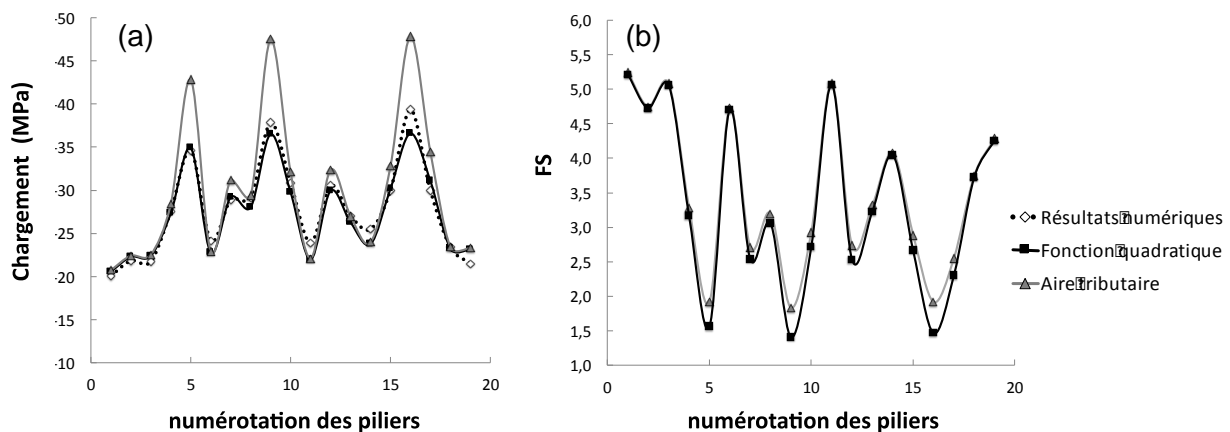


Figure 2. Chargement (a) et facteur de sécurité FS (b) des piliers modélisés.

Bien que les deux méthodes produisent des résultats significativement différents en termes de contraintes pour les piliers les plus chargés, les différences sont assez peu marquées en termes de facteur de sécurité (dans les conditions du modèle réalisé). Les

deux méthodes prévoient un panneau globalement stable avec un *FS moyen* de 3,3 en utilisant l'aire tributaire et 3,5 avec la fonction quadratique. Cependant, l'aire tributaire est significativement plus pessimiste puisqu'elle prévoit que 3 piliers soient potentiellement instables alors qu'aucun n'est censé l'être du point de vue de la fonction quadratique.

La méthode de l'aire tributaire est donc plus sécuritaire que la fonction quadratique. Cependant, l'aspect sécuritaire est déjà intégré dans la recherche d'un *FS* > 1,8. L'utilisation de l'aire tributaire ne permet donc pas une gestion optimale du risque puisqu'elle peut entraîner des coûts de remédiation (confortement de piliers par exemple) inutiles à court terme. La fonction quadratique, quant à elle, bénéficie d'une précision identique pour tous les piliers du panneau. Elle permet donc une meilleure identification des piliers sensibles et une optimisation des éventuelles mesures de remédiation.

3.2. Conséquences sur le dimensionnement d'une nouvelle exploitation

Le choix de la méthode utilisée pour estimer le chargement des piliers peut également avoir une influence significative sur le dimensionnement d'une future exploitation. Afin de mettre ce point en évidence, considérons un projet de mine fictif, en trois dimensions, contraint par certaines limites de nature géométrique, comme cela pourrait être le cas d'un véritable projet :

On souhaite exploiter une mine, à une profondeur H , constituée de m panneaux identiques et séparés par des piliers barrières de largeur B afin d'isoler mécaniquement et de protéger les différents panneaux. Chaque panneau comprend de petits piliers de production de largeur p , de hauteur h fixée et de section carrée. On fixe la longueur totale d'un panneau et du pilier barrière adjacent L , la largeur d'un panneau L_1 ainsi que la largeur des chambres c à l'intérieur desquelles doivent circuler les engins (Figure 4).

En raison de la géométrie imposée, on peut montrer que le nombre de chambres dans la longueur de la mine n s'obtient par la résolution de :

$$n \cdot c \cdot L_1 + n_1 \cdot c^2(n-1) + (m-1) \cdot 2 \cdot B \cdot c = \frac{r_t}{m} \cdot (m-1) \cdot L \cdot L_1 + (L-B) \cdot L_1 \quad (8)$$

où r_t est le taux de défrètement total de la mine et n_1 est le nombre de chambres dans la largeur du panneau. Comme les piliers sont carrés, n_1 peut s'écrire en fonction de n et on peut déduire la largeur p que doivent avoir les piliers de production :

$$n_1 = n \cdot \frac{(L_1 - c)}{(L - B - c)} \quad (9)$$

$$p = \frac{(L - B - n \cdot c)}{(n - 1)} \quad (10)$$

Connaissant l'ensemble des caractéristiques géométriques de la mine, la masse volumique moyenne du recouvrement ρ et la résistance en compression *UCS* de la roche constituant les piliers, on peut estimer le chargement des piliers avec la méthode de l'aire tributaire et la fonction quadratique, ainsi que la résistance des piliers avec l'Eq. 7 et les coefficients appropriés (cf. section 2.3.). Il est possible d'en déduire le *FS* des piliers de production (dépendant de la méthode d'estimation du chargement).

Considérons que les variables du problème sont la largeur des piliers barrières B et le taux de défrètement r_t , les autres paramètres étant fixés ou déduits des équations précédentes (voir Tableau 1). Il s'agit de déterminer quel est la valeur maximale de r_t que l'on peut atteindre dans cette mine, en fonction de B , sachant que l'on souhaite que

$FS > 1,8$ pour les piliers de production. Une étude de sensibilité sur B et r_t , dont les résultats sont présentés en Figure 3, a été effectuée afin de répondre à cette question.

Tableau 1. Paramètres et variables de l'étude de sensibilité.

B	r_t	L	L_1	c	m	ρ	H	UCS	n	n_1	p
variable	variable	400 m	100 m	10 m	3	2500 kg/m ³	400 m	90 MPa	déduit	déduit	déduit

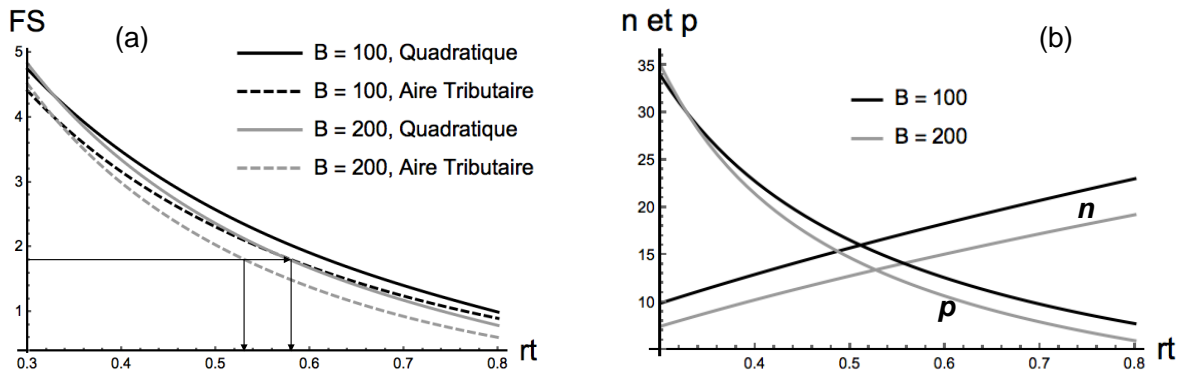


Figure 3. Résultats de l'étude de sensibilité.

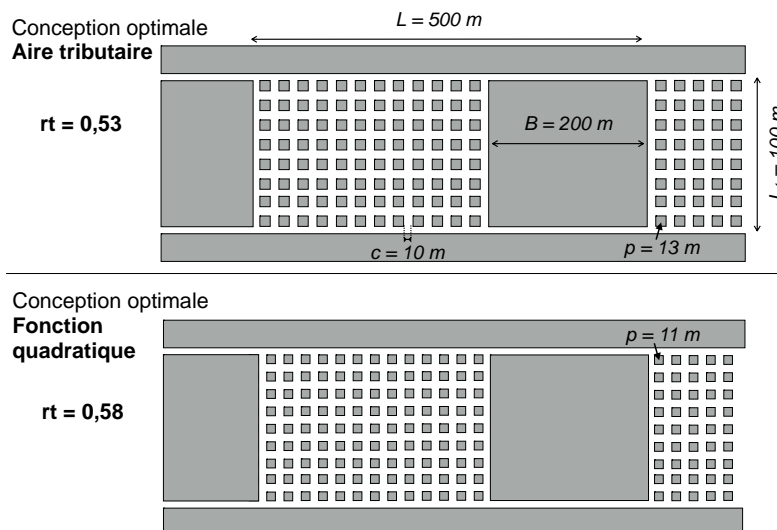


Figure 4. Vue de haut sur les panneaux, à l'échelle, permettant d'obtenir un facteur de sécurité de 1,8 pour les piliers de production, en fonction de la méthode utilisée.

Les résultats de l'étude de sensibilité sont influencés par une interaction complexe entre tous les effets que peut avoir la variation de géométrie de la mine sur la résistance et le chargement des piliers. Il est donc difficile de les interpréter exhaustivement. Cependant quelques tendances importantes peuvent être mises en évidence.

La Figure 3a montre que, toutes choses étant égales par ailleurs, plus la largeur des piliers barrières est importante plus le facteur de sécurité est faible pour un taux de défrètement donné car la largeur des piliers diminue. On voit également que plus le taux de défrètement est élevé, plus le nombre de piliers augmente mais plus ils sont petits (Figure 3b). Ceci entraîne globalement une diminution du facteur de sécurité à mesure que r_t augmente indépendamment de la méthode d'estimation du chargement utilisée. Cependant, pour une largeur donnée B des piliers barrières, la méthode de l'aire tributaire, qui a tendance à surestimer les contraintes (cf. Section 3.1.), est plus pessimiste que la fonction quadratique en termes de facteur de sécurité. Elle prévoit, par

exemple, que $FS = 1,8$ soit atteint pour un taux de défrètement $r_t = 0,53$ contre $r_t = 0,58$ pour la fonction quadratique. Les plans de mines fictifs correspondant à ces deux situations sont représentés en Figure 4. On déduit de ces résultats que l'aire tributaire entraînerait potentiellement un abandon inutile de 5% du minerai, ce qui représente un volume considérable à l'échelle d'une exploitation.

4. Conclusion

Deux grandeurs sont particulièrement importantes vis-à-vis du dimensionnement d'une mine en chambres et piliers : le taux de défrètement, qui a une grande influence sur la rentabilité économique de la mine, et le facteur de sécurité des piliers par l'intermédiaire duquel on assure la stabilité du chantier et la sécurité des mineurs. Le dimensionnement d'une exploitation consiste à trouver le compromis idéal entre un taux de défrètement total élevé et un facteur de sécurité garantissant un niveau de sécurité acceptable.

La fonction quadratique du taux de défrètement relatif, récemment développée par Hauquin *et al.* (2016), offre, si la roche peut être considérée comme globalement élastique, et tant qu'il n'y a pas un contraste trop important de module d'Young entre les piliers et la roche encaissante, une meilleure estimation de la contrainte verticale moyenne des piliers que la méthode traditionnelle de l'aire tributaire, lorsque les piliers sont de taille hétérogène. Alors, l'utilisation de la nouvelle fonction présente des avantages en termes d'évaluation de la stabilité des mines existantes, puisqu'elle permet de mieux cibler les piliers sensibles. Elle permet aussi d'optimiser le dimensionnement de nouvelles exploitations en prenant en compte des interactions mécaniques entre les piliers barrières et les piliers de production ignorées par la méthode de l'aire tributaire.

Globalement, on peut voir une double utilité à l'utilisation de la fonction quadratique du taux de défrètement relatif plutôt qu'à celle de la méthode de l'aire tributaire : augmenter le facteur de sécurité à taux de défrètement fixé, ou bien augmenter le taux de défrètement à facteur de sécurité fixé. Cependant, il est évident que d'autres études comparatives ainsi que d'éventuelles mesures de contraintes dans des piliers réels seraient utiles à la validation définitive de la méthode proposée.

5. Références bibliographiques

- Abel JF. (1988). Soft rock pillars. *Int J of Min Geol Eng*, vol. 6, n°3, pp. 215-248.
- Hauquin T, Deck O, Gunzburger Y. (2016). Average vertical stress on irregular elastic pillars estimated by a function of the relative extraction ratio. *Int J Rock Mech Min Sci*, vol. 83, pp.122-134.
- Hedley DGF, Grant F. (1972). Stope-and-pillar design for Elliot Lake Uranium Mines. *Canadian Mining and Metallurgy Bulletin*, vol. 65, pp. 37-44.
- Poulsen BA. (2010). Coal pillar load calculation by pressure arch theory and near field extraction ratio. *Int J Rock Mech Min Sci*, vol. 47, n°7, pp.1158-1165.
- Roberts D, Tolfree D, McIntire H, others. (2007) Using confinement as a means to estimate pillar strength in a room and pillar mine. *In: 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.*
- Salamon MDG, Canbulat I, Ryder JA. (2005) Development of Seam-Specific Strength Formulae for South African Collieries. *Final Report to Coaltech 2020.*
- Salamon MDG, Munro AH. (1967). A Study of Strength of Coal Pillars. *J S Afr Inst Min Metall*, vol. 68, n°2, pp.56-57.
- Salamon MDG, Ozbay MU, Madden BJ. (1998). Life and design of bord-and-pillar workings affected by pillar scaling. *J S Afr Inst Min Metall*, vol. 98, n°3, pp.135-145.