

Guide de conception pour des sautages confinés à grande échelle de relaxation des contraintes dans des piliers de mines

Patrick Andrieux¹ et John Hadjigeorgiou²

¹ Consultation Itasca Canada, 166 rue Douglas, Sudbury, Ontario, P3E 1G1.

² Université Laval, Département des mines, de la métallurgie et des matériaux, Québec, Qc., G1K 7P4.

Sommaire

Cet article décrit une nouvelle méthodologie qui quantifie les chances de succès d'un sautage confiné à grande échelle de relaxation des contraintes dans un pilier de mine souterraine, pour un massif rocheux et un régime de contraintes donnés. La méthode est basée sur un nouveau paramètre baptisé "Indice de relâchement", qui considère huit paramètres géomécaniques et de forage-sautage qui contrôlent ultimement le procédé. La rétro-analyse d'études de cas bien documentées a démontré que l'approche peut indiquer de manière fiable si une situation donnée de hautes contraintes de terrain est susceptible d'être améliorée par un tir de relâchement confiné à grande échelle, et si le design proposé est adéquat pour atteindre ce but.

Mots-clés: hautes contraintes, Indice de relâchement, piliers de mine, tirs de relaxation des contraintes

Auteur correspondant: Patrick Andrieux, pandrieux@itasca.ca

1. Introduction

Certains des plus grands défis associés au minage à grande profondeur ou sous de hauts ratios d'extraction sont associés aux forts niveaux de contraintes de terrain qui résultent de ces situations, ces contraintes pouvant éventuellement conduire à la rupture et à l'effondrement du massif rocheux autour des excavations. Ces effondrements, lorsque soudains et violents, peuvent avoir de graves conséquences et représentent probablement le plus haut degré de risque en termes d'exposition du personnel sous terre, d'un niveau de production erratique et imprévisible, de besoins en reconditionnement, de pertes possibles de réserves et de coûts globaux de minage. Il existe un certain nombre de mesures proactives et réactives qui peuvent être envisagées pour atténuer et mitiger les problèmes de terrain associés aux conditions de hautes contraintes en général, et de ruptures violentes en particulier. Cet article se concentre sur la conception des sautages à grande échelle de relaxation des contraintes dans des piliers de mines, qui constituent l'une de ces mesures. En particulier, cet article décrit l'application d'une méthodologie empirique récemment développée qui quantifie les chances de succès d'un tir à grande échelle de relâchement des contraintes dans un pilier de mine souterraine, pour un massif rocheux et des conditions de contraintes donnés. Cette méthodologie est basée sur l'"Indice de relâchement", qui prend en ligne de compte huit (8) paramètres dont les interactions ont été identifiées comme contrôlant ultimement le procédé.

2. Les différents types de tirs de relaxation des contraintes

Un tir de relaxation des contraintes peut être défini comme toute tentative impliquant la détonation de charges explosives confinées (c'est-à-dire sans aucune face libre) dans le but de réduire les niveaux de contraintes de terrain dans la région ciblée, et dans laquelle le matériel fracturé est laissé en place. Dans le contexte de "pré-conditionnement", l'objectif est d'endommager le massif rocheux afin d'assouplir son comportement (c'est-à-dire de le rendre moins rigide), de réduire sa résistance et, ainsi, de diminuer le potentiel qu'il se rompt de manière violente (Figure 1b). Il est intéressant de noter que le terme "pré-conditionnement" a une connotation de retour et de minage éventuel au travers de la zone relaxée – en conséquence, un certain degré de retenue est requis, et ce type de sautage n'implique typiquement pas de très fortes quantités d'énergie explosive.

Dans le contexte des sautages à grande échelle de relaxation des contraintes dans des piliers de mines discuté dans cet article, de très hauts niveaux d'énergie explosive sont typiquement utilisés, qui infligent des dommages majeurs à la région ciblée, ainsi que le déplacement d'un fort volume de roche. Cette éjection de matériel cause une convergence des murs autour de la zone visée, qui, à son tour, produit un effet de relâchement local des contraintes (Figure 1c). Il faut noter que ce type de tir cause un fort endommagement local, et qu'il n'y a généralement pas de tentative subséquente de rétablissement d'accès à proximité ou au travers de la zone affectée.

Dommages relativement faibles en avant de la face de minage, mais suffisants pour réduire la rigidité et la capacité portante du massif rocheux, et pousser le front de hautes contraintes plus loin en arrière de la face. Un certain niveau de contraintes continue à affecter la région relaxée, mais à une intensité moindre.

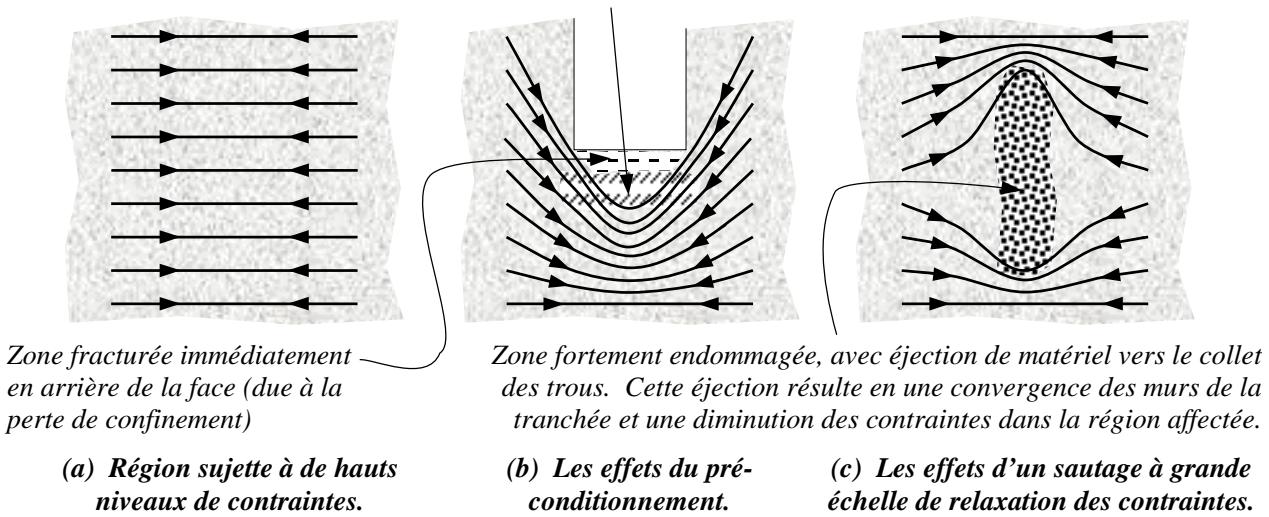


Figure 1. Vues conceptuelles en plan montrant les résultats d'un tir de pré-conditionnement vs. ceux d'un tir de relaxation des contraintes. (Ces figures sont à des échelles différentes.)

L'importance de la convergence des murs de la tranchée de relâchement est illustrée à la Figure 2. Hedley (1992) a suggéré qu'à l'instant où un tir confiné de relâchement des contraintes est détoné, la région ciblée subit une augmentation de charge quasi instantanée qui tend à éloigner les épontes de la tranchée selon la rigidité locale du massif rocheux (pente AB à la Figure 2, et Figure 3b). Une fois l'onde de choc passée et que les gaz de détonation commencent à dépressuriser, la charge chute abruptement à C, trop rapidement pour que l'inertie du système ne permette aux murs de converger à nouveau (Figure 3c). Très vite, une diminution additionnelle (au point D) de la charge appliquée aux murs se produit, causée cette fois-ci par leur convergence au-delà du point de départ A, à cause justement de l'éjection de matériel (Figure 3d). Un point d'équilibre est éventuellement atteint en E une fois que les murs ont convergé suffisamment pour rencontrer la droite qui caractérise la rigidité locale du massif rocheux (Figure 3e).

Ce processus peut se comparer à ce qui se produit lorsqu'une éprouvette de roche est testée en compression dans une presse de laboratoire – dans cette analogie, l'éprouvette représente le pilier ciblé et la presse représente le système de chargement (le massif rocheux) qui lui transmet les hautes contraintes problématiques. Comme l'illustre la Figure 3f, une relaxation des contraintes se produit lorsque l'éprouvette est rupturée et que les plateaux de la presse convergent.

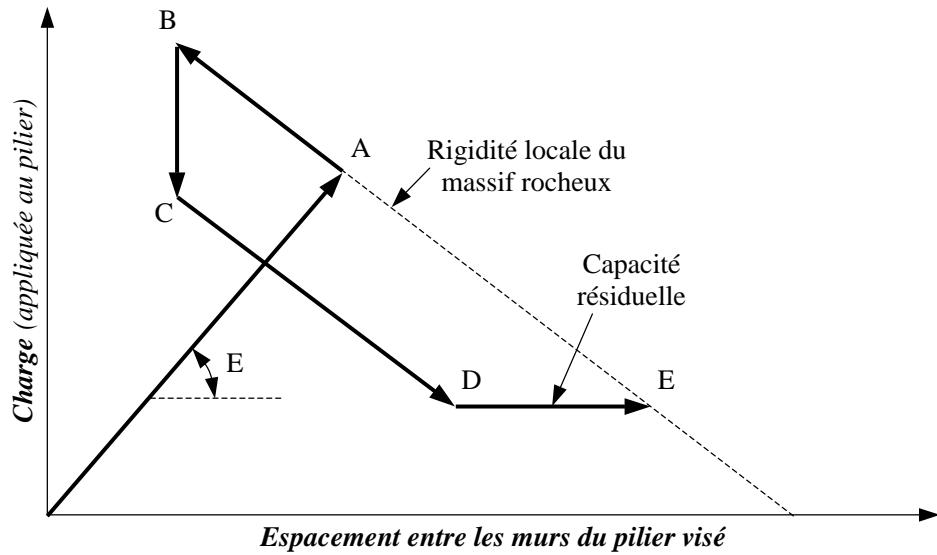


Figure 2. Comportement d'un pilier de mine lors d'un sautage confiné à grande échelle de relaxation des contraintes. (Adapté d'après Hedley, 1992.)

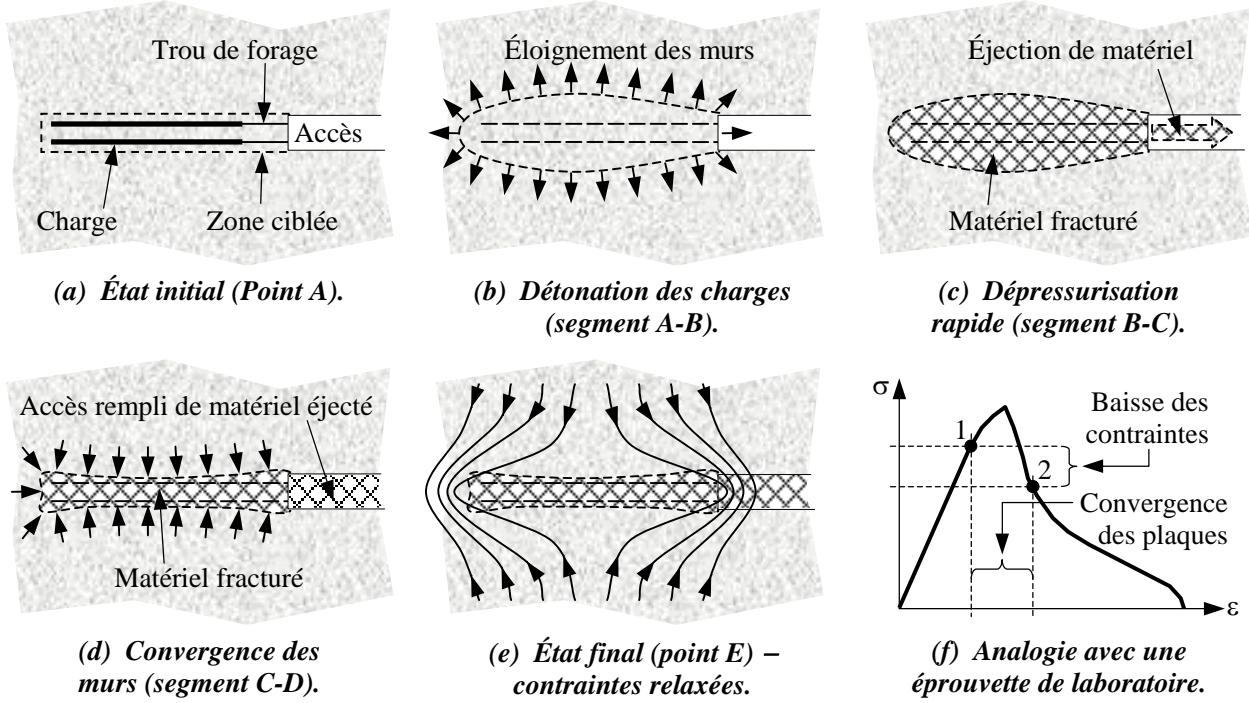


Figure 3. Comportements physiques du pilier associés aux diverses étapes illustrées à la Figure 2 (figures [a] à [e]), et analogie avec une éprouvette de laboratoire (figure [f]).

Un grand nombre d'études de cas de tirs de relâchement des contraintes ont été décrites au cours des derniers quarante ans. La plupart concernent des faces de développement, soit horizontales soit verticales, et très peu impliquent des piliers dans lesquels des tirs à grande échelle étaient tentés. Plusieurs revues générales des

pratiques de tirs de relaxation des contraintes ont été publiées, notamment par Roux *et al.* (1957), Hill & Plewman (1957), Blake (1982), Hedley (1992), Blake *et al.* (1998) et Mitri (2000). Des études de cas plus pertinentes à cet article décrivent des sautages confinés à grande échelle de relâchement des contraintes dans des piliers de mines au Canada (Labrie *et al.* [1996], O'Donnell [1999], Brummer *et al.* [2000], Sampson-Forsythe *et al.* [2002]) et au district minier de Coeur d'Alene aux États-Unis (Blake [1972], Board & Fairhurst [1983]). Ces gros tirs de relaxation des contraintes constituaient généralement une tentative de faire face à de forts niveaux de séismicité. L'approche de pré-conditionnement discutée plus tôt a quant à elle retenu beaucoup d'attention en Afrique du Sud (Cook *et al.* [1966], Toper *et al.* [1997], Toper [2002]), principalement à cause de la méthode de minage par longs-murs généralement utilisée là-bas.

Au-delà de trente (30) études de cas décrivant un vaste éventail de tirs confinés à grande échelle de relâchement des contraintes dans des piliers de mine ont été examinées (Andrieux [2005]) de manière à identifier les paramètres dominants du processus. Un aspect qui est rapidement apparu lors de cet examen est le fort degré de variabilité associé à la conception de ces tirs, et concernant notamment le degré de "violence" requis. Ce manque de consistance a également été observé par d'autres chercheurs, dont Blake *et al.* (1998), Mitri (2000) et Brummer & Andrieux (2002). Cette revue a clairement indiqué qu'il n'existe pas de procédures formelles d'ingénierie qui soient bien établies pour la conception de ce type de sautage – le design des tirs de relâchement des contraintes, quelle que soit l'échelle à laquelle ils sont tentés, est encore principalement effectué par essai et erreur, et basé sur l'expérience propre (et souvent spécifique) au site. Une absence étonnante d'explication a été notée relativement aux procédures utilisées pour: 1) choisir la localisation, la géométrie et les dimensions des divers tirs examinés, 2) concevoir leurs paramètres de forage et de chargement, et 3) décider du moment où ils devraient être détonés. En conséquence, le besoin a été identifié de 1) déterminer parmi tous les nombreux paramètres mentionnés dans les diverses études de cas lesquels jouent un rôle dominant au niveau des tirs confinés à grande échelle de relaxation des contraintes dans des piliers de mines, et 2) quantifier leur importance relative, afin de développer une méthodologie de conception qui se concentrerait sur ces paramètres dominants.

3. La méthodologie de l'Indice de relâchement pour les sautages confinés à grande échelle de relaxation des contraintes dans des piliers de mines souterraines

Le résultat de ces travaux est la méthode de l'Indice de relâchement, une approche basée sur les conditions géomécaniques associées à des ruptures du roc soudaines et violentes, et sur des considérations de forage-sautage. En premier lieu, la méthodologie reconnaît que des ruptures violentes se produisent dans le roc lorsque: 1) un haut niveau de contrainte est présent, 2) le cheminement des contraintes vers la rupture est caractérisé par une composante principale majeure qui atteint une forte intensité dans des conditions de confinement qui demeurent essentiellement constantes, 3) le système de chargement est peu rigide et 4) le massif rocheux est rigide, solide (de haute résistance) et fragile (se fracture complètement dès que sa résistance ultime est atteinte, similairement au comportement du verre, par exemple). Deuxièmement, l'approche considère que pour qu'un tir de relâchement des contraintes soit réussi, il faut qu'il rompe le massif rocheux ou qu'il altère son comportement. Huit paramètres ont été éventuellement identifiés et retenus comme contrôlant ultimement le résultat d'un tir confiné à grande échelle de relaxation des contraintes dans un pilier de mine. Ces paramètres sont regroupés et décrits dans la première colonne de la Table 1. Un problème associé à la manipulation d'un grand nombre de variables consiste à rationnellement établir leur importance relative dans le but de pondérer leur effet sur le système considéré. Ce problème a été adressé à l'aide de la méthodologie des Systèmes d'ingénierie du roc ("Rock Engineering Systems", ou RES) développée par Hudson (1992), une technique matricielle hautement organisée. C'est cette approche qui a été utilisée afin de déterminer l'importance de chacun des huit paramètres retenus, ainsi que leur degré d'interaction, dans le but ultime d'estimer les chances de succès d'un tir confiné à grande échelle de relâchement des contraintes dans un massif rocheux et pour un régime de contraintes donnés.

La Table 1 résume l'approche de l'Index de relâchement. En premier lieu, elle requiert l'assignation d'une entité mesurable (montrée dans la colonne "propriété") destinée à quantifier chacun des huit paramètres

retenus. Chaque entité est ensuite comparée à des plages de valeurs pré-établies, et une simple cote de 0, 1 ou 2 est attribuée à chaque paramètre, dépendamment de la plage dans laquelle l'entité tombe. Pour chaque paramètre, cette cote est ensuite multipliée par la “cause” de ce paramètre (telle que définie par Hudson [1992] et établie par Andrieux [2005] – ces causes sont montrées à la Table 1) de manière à produire une marque qui exprime la mesure dans laquelle le paramètre est propice à la réussite du tir de relâchement des contraintes. Les huit marques sont ensuite additionnées, puis leur somme est divisée par la marque maximum possible (252) afin de produire une marque totale normalisée entre zéro et un. L'Indice de relâchement peut ensuite être obtenu, qui estime le potentiel de succès du tir envisagé, et est représenté par l'une des quatre catégories montrées à la Table 2. Une description plus détaillée de la méthodologie est présentée par Andrieux & Hadjigeorgiou (2008).

Table 1. Plages de valeurs pour les propriétés de base utilisées pour le calcul de la marque de chacun des huit paramètres retenus. (D'après Andrieux & Hadjigeorgiou, 2008.)

Paramètre	Propriété	Plage de valeurs pour la propriété retenue		Cote	Cause	Marque	Marque maximum
P_1 (rigidité du massif rocheux)	Module d'Young	Moins de	25 GPa	0	13	0	26
		Entre	25 et 50 GPa	1		13	
		Plus de	50 GPa	2		26	
P_2 (fragilité du massif rocheux)	Rapport B_1	Moins de	10.0	0	13	0	26
		Entre	10.0 et 18.0	1		13	
		Plus de	18.0	2		26	
P_3 (degré de fracturation du massif)	RMR	Entre	0 et 60	0	14	0	28
		Entre	60 et 80	1		14	
		Entre	80 et 100	2		28	
P_4 (proximité du roc à la rupture)	Proximité à l'enveloppe H-B	Entre	0 et 33%	0	14	0	28
		Entre	33 et 70%	1		14	
		Entre	70 et 100%	2		28	
P_5 (orientation du tir)	Angle de l'axe du tir à σ_1	Entre	0 et 30°	0	13	0	26
		Entre	30 et 60°	1		13	
		Entre	60 et 90°	2		26	
P_6 (largeur de la zone ciblée)	Nombre de rangées de trous	Moins de	2	0	18	0	36
		Entre	2 et 4	1		18	
		Plus de	4	2		36	
P_7 (énergie explosive unitaire)	Energie par unité de masse	Entre	0 et 200 cal/kg	0	24	0	48
		Entre	200 et 350	1		24	
		Entre	350 et 500	2		48	
P_8 (confinement des charges)	Rapport de diamètre	Moins de	25	0	17	0	34
		Entre	25 et 45	1		17	
		Plus de	45	2		34	

Notes:

Un *paramètre* est une entité qui contrôle le processus de relaxation des contraintes, tandis qu'une *propriété* est une quantité qui peut être obtenue de manière non équivoque et qui sert à quantifier un paramètre.

La “cause” d'un paramètre représente essentiellement son degré de pondération dans le système.

La proximité à l'enveloppe de rupture d'Hoek-Brown est représentée par $\sigma_l / \sigma_3 + [m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2]^{0.5}$, et exprimée en pourcentage, avec les paramètres m et s considérés à l'échelle du massif rocheux.

Les valeurs d'énergie explosive par unité de masse sont exprimées en calories par kilogramme de roche ciblée.

Table 2. Détermination de l'Indice de relâchement en fonction de la marque totale normalisée. (D'après Andrieux & Hadjigeorgiou, 2008.)

Marque totale normalisée	Indice de relâchement (potentiel de succès)
De 0.00 à 0.40	Faible
De 0.40 à 0.70	Moyen
De 0.70 à 0.85	Bon
De 0.85 à 1.00	Excellent

La Table 3 résume les propriétés de base requises pour établir la marque de chaque paramètre dans le but de déterminer l'Indice de relâchement.

Table 3. Liste des propriétés et valeurs de base requises pour le calcul de l'Indice de relâchement. (D'après Andrieux & Hadjigeorgiou, 2008.)

Propriété	Symbole
Densité du roc (kg/m ³)	ρ_r
Module d'Young du matériel rocheux intact (GPa)	$E_{\text{Laboratoire}}$
Résistance en compression uniaxiale du matériel rocheux intact (MPa)	$\sigma_c_{\text{Laboratoire}}$
“Rock Mass Rating” du massif rocheux	RMR
Paramètre m de Hoek-Brown pour le matériel rocheux intact	$m_{\text{Laboratoire}}$
Paramètre s de Hoek-Brown pour le matériel rocheux intact (s = 1)	$s_{\text{Laboratoire}}$
Magnitude de la composante σ_1 au moment du tir (MPa)	$\sigma_1_{\text{Effectif}}$
Magnitude de la composante σ_3 au moment du tir (MPa)	$\sigma_3_{\text{Effectif}}$
Angle d'incidence de l'axe du sautage par rapport à la composante σ_1 (degrés)	θ
Longueur du pilier visé (m)	L
Hauteur du pilier visé (m)	H
Nombre de rangées de trous dans le sautage	N
Diamètre des trous de tir (mm)	D
Distance entre les rangées de trous (m)	B
Distance entre les trous sur une même rangée (m)	S
Utilisation de matériel de bourrage inerte ² (Oui ou Non)	—
Densité du produit explosif (g/cm ³)	ρ_e
Énergie massique absolue (AWS) du produit explosif (cal/g)	AWS
Longueur non chargée au collet des trous (m)	C
Longueur non chargée au pied des trous ¹ (m)	T

¹ Utiliser zéro pour des trous borgnes.

² Ajouter 50% au confinement si du matériel granulaire inerte est utilisé pour le bourrage des trous.

Cette méthodologie n'est pas une technique directe de conception des tirs, mais plutôt une estimation des chances de succès d'une conception donnée dans une situation précise. Bien qu'il ne soit pas possible de changer les caractéristiques intrinsèques du roc, il est toutefois possible de contrôler dans une certaine mesure l'état des contraintes qui prévaudront au moment du sautage (en choisissant l'étape de minage à laquelle le tir sera détoné, ou en altérant la séquence d'extraction, par exemple), et il est possible de modifier le design du sautage. Une fois les paramètres de base modifiés, l'Indice de relâchement peut être ré-évalué – cela permet d'optimiser éventuellement le sautage, d'une manière itérative.

4. Conclusions

Dans toutes les rétro-analyses effectuées, l'approche de l'Indice de relâchement aurait fonctionné de manière satisfaisante – si elle avait été utilisée *a priori*, elle aurait fourni une bonne prédition des résultats qui furent éventuellement obtenus (Andrieux & Hadjigeorgiou [2008]). Il est donc postulé que l'approche proposée a une forte valeur pratique de par sa capacité à aider à la conception d'un sautage confiné à grande échelle de relaxation des contraintes dans un pilier de mine, en prenant simplement des mesures qui résultent en une augmentation de l'Indice de relâchement.

5. Références

- Andrieux, P., 2005. *Application of Rock Engineering Systems to Large-Scale Confined Destress Blasts in Underground Mine Pillars.* Thèse de doctorat, Université Laval, Département de Génie des mines, de la métallurgie et des matériaux, 414 pp. Québec, Québec, Canada.
- Andrieux, P., et J. Hadjigeorgiou, 2008. *The Destressability Index Methodology for the Assessment of the Likelihood of Success of a Large-Scale Confined Destress Blast in an Underground Mine Pillar.* 21 pp. Accepté pour publication par le Journal international de mécanique des roches et de sciences minières.
- Blake, W., 1972. *Destressing Test at the Galena Mine, Wallace, Idaho.* Dans le Journal de la Société des ingénieurs miniers de l'Institut américain des mines et de l'exploration, Vol. 252, No. 3, pp. 294-299. Keystone, Colorado, États-Unis.
- Blake, W., 1982. *Rock Preconditioning as a Seismic Control Measure in Mines.* Dans le compte-rendu du premier Congrès international sur les coups de terrain et la séismicité dans les mines, organisé par l'Institut sud-africain des mines et de la métallurgie (N. Gay & E. Wainwright, eds.), pp. 225-229. Johannesburg, République d'Afrique du Sud.
- Blake, W., M. Board, et R. Brummer, 1998. *Destress Blasting Practices – A Review of the Literature and Current Industrial Practice.* Rapport conjoint du Groupe de consultation Itasca et de Richard Brummer Associés à CAMIRO – Division minière, 96 pp. Sudbury, Ontario, Canada.
- Board, M., et C. Fairhurst, 1983. *Rockburst Control Through Destressing – A Case Example.* Dans le compte-rendu de la conférence “Rockbursts: Prediction and Control”, organisée par l'Institut britannique des mines et de la métallurgie, pp. 147-161. Londres, Angleterre.
- Brummer, R., A. Mortazavi, P. Andrieux, et B. Simser, 2000. *Report to Canadian Mining Industry Research Organisation, Mining Division – Destress Blasting: A Monitored Field Trial at Brunswick Mine.* Rapport de Consultation Itasca Canada à CAMIRO – Division minière, 120 pp. Sudbury, Ontario, Canada.
- Brummer, R., et P. Andrieux, 2002. *Destress Blasting – A Design Methodology Based on Case Studies.* Dans le compte-rendu du 5^{ème} Symposium nord-américain de mécanique des roches (“NARMS-TAC 2002: Mining and Tunnelling Innovation and Opportunity” – R. Hammah, W. Bawden, J. Curran et M. Telesnicki, eds.), Vol. 1, pp. 165-172. Publié par les Presses de l'Université de Toronto. Toronto, Ontario, Canada.
- Cook, N., E. Hoek, J. Pretorius, D. Ortlepp, et M. Salamon, 1966. *Rock Mechanics Applied to the Study of Rockbursts.* Dans le Journal de l'Institut sud-africain des mines et de la métallurgie, Vol. 66, pp. 435-528. Johannesburg, République d'Afrique du Sud.
- Hedley, D., 1992. *Rockburst Handbook for Ontario Hardrock Mines.* Rapport spécial SP92-1E du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), Laboratoires de recherche minière, 305 pp. Ottawa, Ontario, Canada.
- Hill, F., et R. Plewman, 1957. *Destressing: A Means of Ameliorating Rockburst Conditions – Part II. Implementing Destressing With a Discussion of the Results so Far Obtained.* Dans le Journal de l'Institut sud-africain des mines et de la métallurgie, pp. 120-127. Johannesburg, République d'Afrique du Sud.

-
- Hudson, J. A., 1992. *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. Séries d'Ellis Horwood en Génie civil – Géotechnique, 185 pp. New York, New York, États-Unis.
- Labrie, D., M. Plouffe, A. Harvey, et C. Major, 1996. *Essai de dynamitage de préfracturation à la mine Sigma: Contexte de l'expérience et résultats obtenus*. Dans le compte-rendu de la 19^{ème} Session d'étude sur les techniques de sautage, SEEQ, 24 pp. Québec, Québec, Canada.
- Mitri, H., 2000. *Practitioner's Guide to Destress Blasting in Hard Rock Mines*. Étude technique financée par l'IRSST et publiée par l'Université McGill, Faculté de génie, Département des mines et de la métallurgie, 201 pp. Montréal, Québec, Canada.
- O'Donnell, D. (Sr.), 1999. *The Development and Application of Destressing Techniques in the Mines of INCO Limited, Sudbury, Ontario*. Mémoire de maîtrise, Université Laurentienne, Département de Génie minier et métallurgique, 141 pp. Sudbury, Ontario, Canada.
- Roux, A., E. Leeman, et H. Denkhaus, 1957. *Destressing: A Means of Ameliorating Rockburst Conditions – Part I*. Dans le Journal de l'Institut sud-africain des mines et de la métallurgie, pp. 101-119. Johannesburg, République d'Afrique du Sud.
- Sampson-Forsythe, A., P. Andrieux, et R. Brummer, 2002. *Report on the Destress Blast of 24 December 2001 in 42-1-1620 Stope, 080 Access, Fraser Copper Mine*. Rapport conjoint de Falconbridge, Ltée. et de Consultation Itasca Canada à la mine Fraser, 42 pp. Sudbury, Ontario, Canada.
- Toper, A., M. Grodner, R. Stewart, et N. Lightfoot, 1997. *Preconditioning: A Rockburst Control Technique*. Dans "Rockbursts and Seismicity in Mines" (S. Gibowicz & S. Lasocki, eds.), pp. 267-272. Publié par A. A. Balkema, Rotterdam, Pays-Bas.
- Toper, A., 2002. *Destressing/Preconditioning to Control Rockbursts in South African Deep-Level Gold Mines*. Dans le compte-rendu du premier Séminaire international sur le minage en profondeur et sous hautes contraintes, organisé par le Centre australien de géomécanique (ACG), 27 pp. Perth, Australie.