



Energy, Mines and  
Resources Canada

Énergie, Mines et  
Ressources Canada

## CANMET

Canada Centre  
for Mineral  
and Energy  
Technology

Centre canadien  
de la technologie  
des minéraux  
et de l'énergie

COUPS DE TOIT

D.G.F. HEDLEY  
TRADUIT PAR P. ROCHON

LABORATOIRE D'ELLIOT LAKE

DÉCEMBRE 1987

Présente à Val d'Or Seminar, février 24-25, 1988.

TOUS DROITS RÉSERVÉS À LA COURONNE

LABORATOIRES DE RECHERCHE MINIÈRE  
RAPPORT DIVISIONNEL MRL 87-160(OP)F

MRL 87-160 (OP) F.c.2

MRL 87-160 (OP) F.c.2



COUPS DE TOIT

par

D.G.F. Hedley

Traduit par

P. Rochon

PREFACE

Par définition un coup de toit est une rupture violente et soudaine du roc. Au cours du processus de fracturation l'énergie excédentaire est libérée sous forme d'énergie cinétique (i.e. séismique) laquelle génère des vibrations dans la masse rocheuse environnante. Ce sont ces vibrations qui sont ressenties tant sous terre qu'en surface. L'ampleur des coups de toit est proportionnelle à l'amplitude des vibrations et est mesurée de la même manière qu'un tremblement de terre utilisant une échelle Richter modifiée.

Les coups de toit sont des phénomènes du vingtième siècle. Ils sont le résultat direct d'une technologie minière améliorée spécialement au niveau du forage, sautage, pompage, extraction du minerai et ventilation

lesquels facteurs permettent aux mines d'aller en plus grande profondeur et du même coup dans un environnement à contraintes plus élevées.

Les coups de toit ont tout d'abord été rapportés au tournant du siècle dans les mines d'or du Witwatersrand en Afrique du Sud ainsi que dans les gisements aurifères de Kolar en Inde.

Au Canada, les premiers coups de toit ont été enregistrés en Ontario vers la fin des années 1920 dans les mines d'or de Kirkland Lake ainsi que dans certaines mines de nickel de Sudbury. Entre 1920 et 1940, les incidents reliés aux coups de toit avaient augmentés si dramatiquement dans ces deux régions minières que l'Association minière de l'Ontario chargea M. R.G.K. Morrison (ultérieurement de l'Université McGill) d'étudier et de faire rapport sur ce problème. Son rapport (1942), à plusieurs égards, fut le fondement de stratégies mises sur pied dans le but de mieux contrôler les coups de toit dans les mines ontariennes pour les quarante années qui suivirent. Ses concepts et stratégies sont discutés ultérieurement.

Au cours des années 1960, les mines d'or de Red Lake ont connu des problèmes de coups de toit de même que les mines d'uranium d'Elliot Lake au début des années 1980.

Cependant il est intéressant de noter que les mines de la région de Timmins, bien que du même âge et de profondeur comparable à celles de Kirkland Lake, ne sont pas sujettes à ce problème.

Au cours des années 1980 il y eut une importante recrudescence du nombre de coups de toit dans les mines de l'Ontario. Le tableau 1 fait état de ce nombre pour chaque région minière ainsi que pour chacune des mines concernées et ce, entre 1984 et 1987. Dans ce cas-ci, un coup de toit est défini comme étant un événement séismique de magnitude suffisamment importante pour être enregistrée par le réseau de télémétrie de l'est du Canada. Pour ces quatre régions minières le niveau de détection est de magnitude 2.0 ou plus.

Au cours de cette période, au delà de 361 coups de toit ont été dénombrés dans 15 mines ontariennes. La mine Quirke d'Elliot Lake domine les statistiques puisque l'on y dénombre près de 50% de tous les coups de toit enregistrés. La mine Campbell à Red Lake ainsi que celles de Strathcona, Creighton et Copper Cliff à Sudbury et Macassa à Kirkland Lake ont aussi connu une activité séismique importante.

Etant donné la diversité des zones minéralisées, différentes méthodes d'extraction sont utilisées dans ces diverses mines. A Red Lake et Kirkland Lake, les étroites zones minéralisées à fort pendage sont exploitées par chambres-magasins ainsi que par chambres remblayées. Les bancs minéralisés à faible pendage d'Elliot Lake sont exploités par

TABLEAU 1

Coups de toit en Ontario, 1984 - 1987  
Enregistrés par le réseau sismique de l'est du Canada

Régions minières	1984	1985	1986	1987*
Red Lake	26	5	10	0
Elliot Lake	59	88	22	9
Sudbury	16	31	56	22
Kirkland Lake	5	3	4	5
<b>Total</b>	<b>106</b>	<b>127</b>	<b>92</b>	<b>36</b>

\* jusqu'au 30 septembre 1987

Red Lake	Nombre	Magnitude la plus élevée
Campbell Mine	32	3.3
Dickenson Mine	9	2.1
<b>Elliot Lake</b>		
Quirke Mine	172	3.4
Denison Mine	6	2.6
<b>Sudbury</b>		
Falconbridge Mine	9	3.5
Lockerby Mine	3	2.6
Strathcona Mine	48	3.1
Fraser Mine	1	1.9
Creighton Mine	44	4.0
Copper Cliff North Mine	14	2.9
Stobie Mine	1	2.4
Garson Mine	3	1.9
Levack Mine	2	3.0
<b>Kirkland Lake</b>		
Macassa Mine	16	3.1
Kerr Addison Mine	1	3.3
<b>Total</b>	<b>361</b>	

chambres et piliers. Quant à Sudbury, les dépôts massifs de sulfure sont exploités par chambres remblayées ainsi que par trous de mine profonds.

Comme conséquence à ce problème grandissant, le projet Canada-Ontario-Industrie sur les coups de toit a été mis sur pied en 1985. La gérance et le financement du projet, étalé sur une durée de 5 ans, sont répartis également entre les trois parties. Le Gouvernement du Canada par l'intermédiaire du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET), est responsable du personnel technique nécessaire pour mener à bonne fin le projet. Le Gouvernement de l'Ontario, par l'intermédiaire du ministère du Travail et celui du Développement du Nord et des Mines, a pour mandat d'avancer les fonds nécessaires à l'achat d'équipements et de services. L'industrie minière ontarienne, par l'intermédiaire des compagnies Campbell Red Lake Mines Ltd., Denison Mines Ltd., Falconbridge Ltd., Inco Ltd., Lac Minerals Ltd. et Rio Algom Ltd., contribue par leurs systèmes microséismiques existants, fournit les sites requis, participe à l'installation de nouveaux équipements et fournit les données pertinentes relatives aux coups de toit survenant à leurs mines.

La raison d'être et objectifs de ce projet sont d'abord d'étudier les causes et mécanismes des coups de toit en utilisant les systèmes microséismiques existants et nouveaux, puis ensuite de développer les techniques afin d'atténuer ou contrôler les dommages causés par les coups de toit.

D'autres mines de d'autres régions du Canada sont et/ou ont aussi été aux prises avec le problème des coups de toit mais dans une mesure beaucoup moins grande que celle de l'Ontario. Ainsi des coups de toit dits "tremblements de terre induits à cause d'exploitations minières" sont survenus au-dessus des mines de potasse de la Saskatchewan au cours de ces 10 dernières années. Des coups de toit ont aussi été rapportés dans certaines mines d'or de la région de Val d'Or au Québec. Les mines de cuivre-zinc du Nouveau-Brunswick sont aussi sujettes aux coups de toit. En 1958, un coup de toit ("Bump") est survenu à la mine de charbon de Springhill en Nouvelle-Écosse causant la mort de 75 personnes. Finalement, à Terre-Neuve une mine de fluor a connu des problèmes de coups de toit à une profondeur de seulement 150 mètres. Récemment des coups de toit ont été enregistrés à la mine Buchars quelques années après sa fermeture.

En général ce sont les mines profondes et à roche dure qui ont des problèmes de coup de toit. Cependant la profondeur et la dureté du roc ne sont pas les seuls critères d'évidence découlant des exemples précédents.

#### EQUILIBRE ENERGETIQUE

Puisque les coups de toits sont le résultat d'un relâchement violent d'énergie, il est naturel de se baser sur l'analyse énergétique pour pouvoir les expliquer. Lorsqu'une excavation souterraine est agrandie, que ce soit à cause de l'exploitation et/ou de la fracturation du roc, la

masse rocheuse environnante converge vers l'excavation contribuant ainsi à changer l'énergie potentielle ( $W_t$ ). La quantité de roc excavé contient elle aussi, avant excavation, une énergie de déformation ( $U_m$ ). Ces deux composantes ( $W_t + U_m$ ) représentent l'énergie de l'exploitation minière suite à l'excavation. Cette énergie doit être dissipée d'une façon quelconque.

Les contraintes agissantes sur la quantité de roc excavé sont transférées à la masse rocheuse environnante contribuant ainsi à augmenter son énergie de déformation emmagasinée ( $U_c$ ). Si les excavations sont supportées intérieurement (e.g. remblai, boisages, poteaux) alors une partie de l'énergie est absorbée par la déformation du support ( $W_s$ ). Toute énergie excédentaire est normalement définie comme étant l'énergie libérée ( $W_r$ ). Ainsi, à partir de la loi de la conservation d'énergie, on a:

$$W_t + U_m = U_c + W_s + W_r \quad (1)$$

Il y a plusieurs façons par lesquelles l'énergie peut être libérée. L'énergie de déformation emmagasinée dans la roche excavée est manifestement libérée. Si la roche s'était fracturée plutôt qu'avoir été excavée, alors cette composante énergétique aurait été consommée dans le processus de fracturation.

Si la roche avait été excavée ou avait cédé instantanément il y aurait eu oscillations dans la masse rocheuse. L'équilibre aurait été atteint par amortissement et l'énergie séismique ( $W_k$ ) aurait été dissipée dans le

processus. Il n'y a aucune autre alternative, d'où,

$$W_r = U_m + W_k \quad (2)$$

C'est l'énergie sismique ( $W_k$ ) qui est enregistrée par les systèmes microsismiques installés aux différentes mines, et c'est cette composante énergétique qui est responsable des dommages causés par les coups de toit. A partir des équations (1) et (2) on déduit:

$$W_k = W_t - (U_c + W_s) \quad (3)$$

Cette équation nous indique que pour réduire l'énergie sismique, l'énergie potentielle ( $W_t$ ) doit être réduite ou l'énergie absorbée par le système de support ( $W_s$ ) doit augmenter (il n'y a aucun moyen de contrôler  $U_c$ ). Le premier peut être accompli en réduisant la convergence de la masse rocheuse et le second en augmentant la rigidité du support (e.g. remblai).

#### LES DIFFERENTS COUPS DE TOIT

Pour initier un coup de toit, une partie de la masse rocheuse doit être sur le point de devenir en équilibre instable soit à cause

- a) d'un changement dans les contraintes ce qui a pour effet d'amener un volume de roc à une rupture soudaine.
- b) d'un système de piliers approchant l'état d'effondrement imminent.

c) de plans géologiques de faiblesse qui sont sur le point de glisser.

Ces trois catégories peuvent être commodément appelées: coup de toit de déformation, coup de toit de pilier et coup de toit relié au glissement de faille lesquels termes sont familiers à la terminologie minière.

Une modification des contraintes est une autre condition requise pour déclencher un coup de toit. Cette modification peut aussi bien être une augmentation qu'une diminution des contraintes dépendant du genre de coup de toit. Pour initier des ondes de contraintes, un changement substantiel des contraintes doit accompagner le coup de toit. Enfin, il doit y avoir une quantité importante d'énergie disponible pour fournir la source de l'énergie séismique. Ce réservoir peut aussi bien être une énergie de déformation emmagasinée dans la masse rocheuse environnante qu'un changement soudain de l'énergie potentielle.

#### COUPS DE TOIT DE DEFORMATION

Les coups de toit de déformation sont causés par une concentration élevée des contraintes à la paroi des ouvertures souterraines laquelle excède la résistance du roc. Ces coups de toit peuvent impliquer de petits morceaux de roc projetés de la paroi jusqu'à l'effondrement complet de cette dernière alors qu'elle tente d'atteindre une forme plus stable. Ces types de coup de toit sont normalement associés au fonçage de galeries incluant les puits de mine.

L'énergie peut être libérée à partir de plusieurs sources. Si le roc passe de condition triaxiale de contraintes à biaxiale ou uniaxiale, une partie de l'énergie de déformation emmagasinée est libérée sous forme d'énergie sismique. Une rupture instantanée de ce roc agrandira l'ouverture et l'énergie sismique sera libérée due aux réactions élastiques de la masse rocheuse. Enfin, s'il y a présence de roches fragiles et molles, alors un glissement mineur peut survenir le long du contact.

#### COUPS DE TOIT DE PILIER

Des coups de toit importants, impliquant des milliers de tonnes de roc, ont été causés par la rupture complète du support des piliers. Dans certains cas, l'effondrement d'un pilier peut surcharger les piliers adjacents et ainsi entraîner une réaction en chaîne. Plus récemment, la plus importante réaction en chaîne est survenue dans une ancienne partie de la mine Quirke où l'abattage par chambres et piliers avait été utilisé. La figure 1 montre la localisation ainsi que la séquence de 22 coups de toit majeurs qui se sont produits en septembre 1984. Tous ces coups de toit sont survenus à la périphérie de la zone de piliers fracturés précédente et représente une expansion importante de cette zone. Le niveau 6 fut détruit au cours de cette activité. Par la suite, le niveau 5 fut perdu en février 1985 suivi du niveau 9 en août 1985. Le résultat final de cette activité sismique et de la fracturation des piliers fut que l'éponte supérieure n'a pu suffir à contenir la région

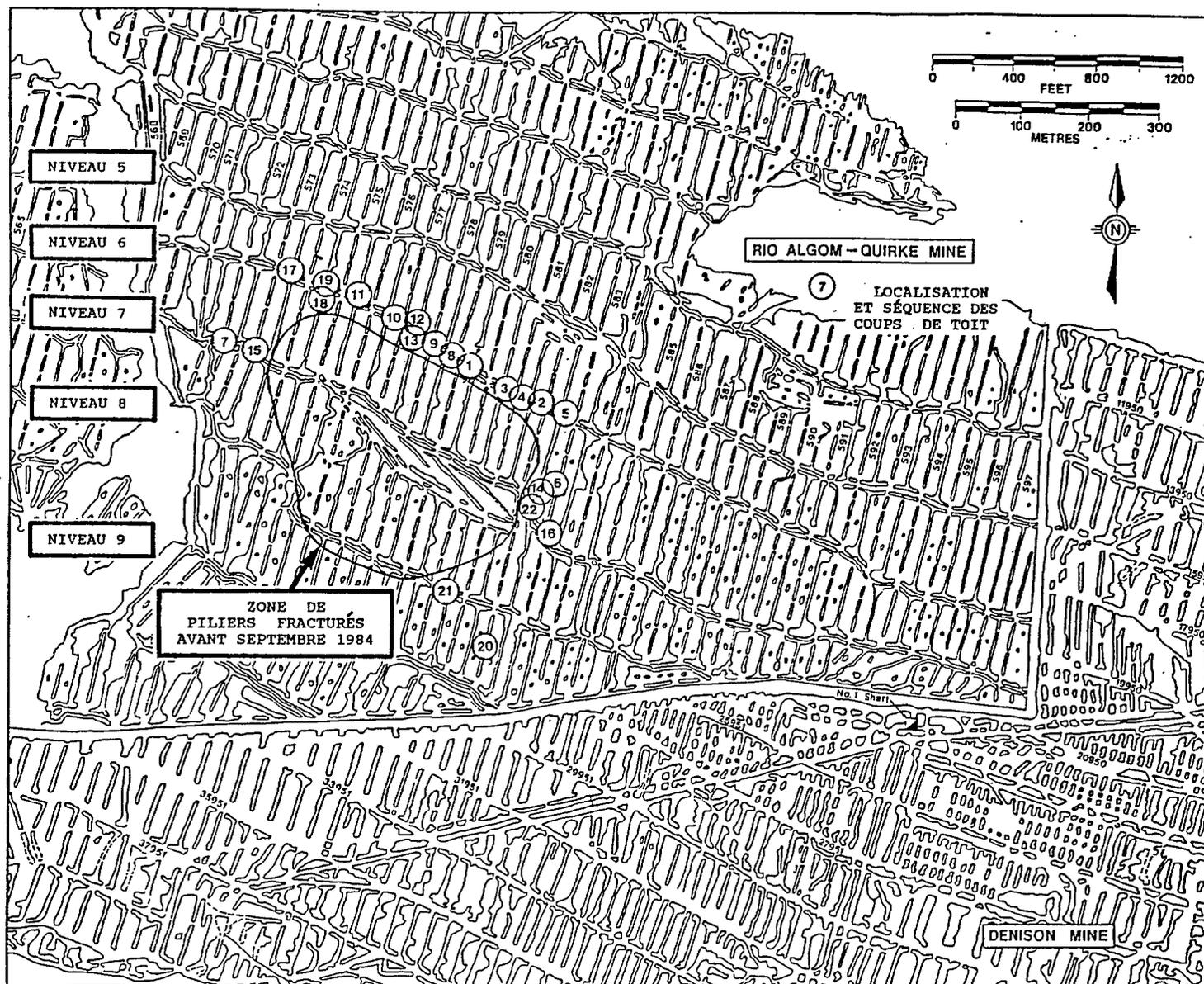


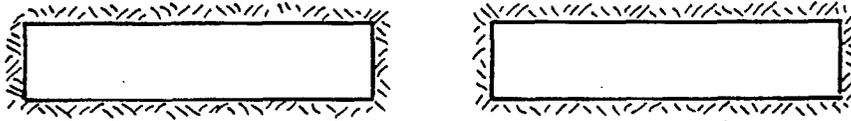
Figure 1 - Localisation et séquence des coups de toit à la mine Quirke en Septembre 1984.

affectée ce qui resulta en une fracturation du roc qui progressa vers la surface (plus de 500 mètres) en plus d'être accompagnée d'une augmentation importante du débit d'eau à l'intérieur de la mine.

D'importants coups de toit de pilier sont aussi survenus dans les zones minéralisées à fort pendage de Red Lake et Kirkland Lake. Ceux-ci surviennent normalement lorsque les piliers de sole et/ou de couronne des chantiers chambres-magasins ou des chantiers exploités par chambres remblayées atteignent une dimension critique.

Pour comprendre les mécanismes des coups de toit de pilier, il est nécessaire de comprendre le concept de rigidité des piliers ainsi que celle reliée au chargement. La figure 2a montre un simple exemple d'un pilier unique située entre deux chantiers. La figure 2c montre la courbe contrainte-déformation du pilier. Lorsque la contrainte augmente la pente de la courbe est positive jusqu'à la résistance ultime. Lorsque cette dernière est excédée, la déformation se poursuit mais la charge diminue et la pente devient négative. La forme de cette courbe de déchargement dépend du type de roc: les roches fragiles ont une courbe de déchargement beaucoup plus abrupte que les roches molles.

La rigidité du chargement peut être mieux expliquée en remplaçant le pilier de l'exemple précédent par un verin hydraulique exerçant la même charge que le pilier. La rigidité du chargement à cet endroit équivaldrait à la courbe de déchargement du verin lorsque la pression hydraulique est relâchée.



a) Pilier entre deux chantiers



b) Chargement équivalent

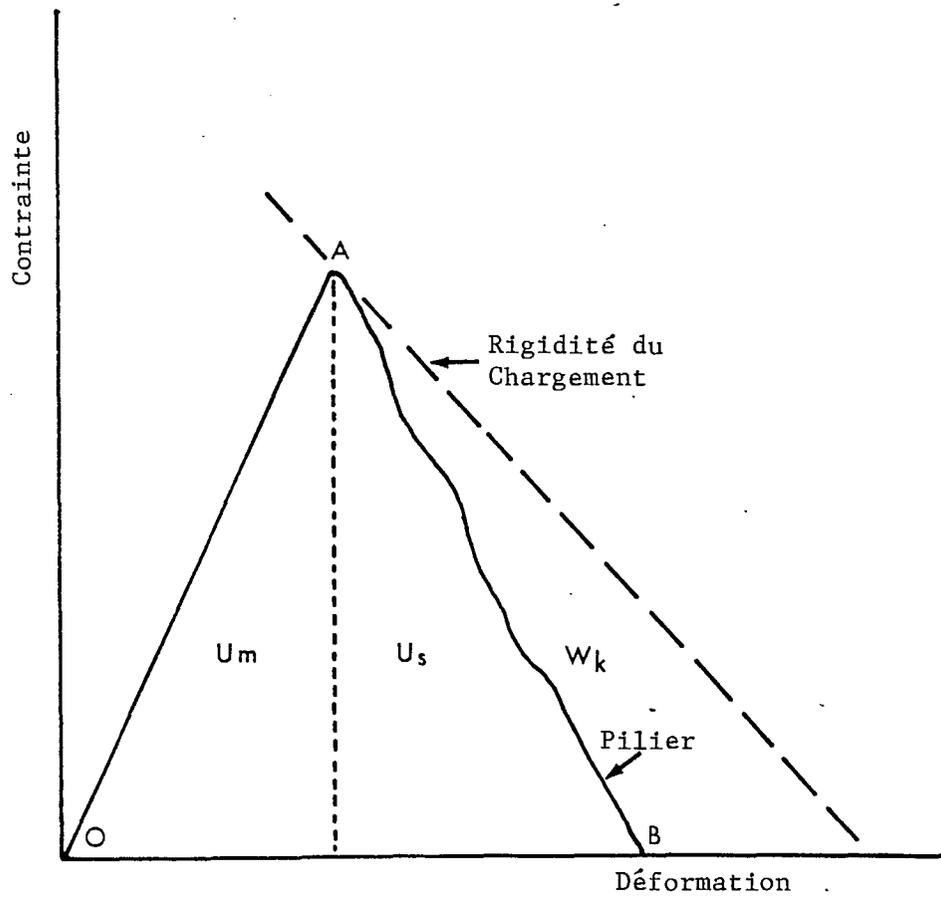


Figure 2c - Caractéristiques contrainte - déformation d'un pilier et d'un système de chargement.

La violence avec laquelle le pilier se fracture dépend de la différence entre ces caractéristiques de déchargement. Si la courbe de déchargement du pilier après rupture, est plus abrupte que la courbe de rigidité du chargement (i.e. chargement non rigide) comme indique la figure 2c, alors il y a un excédent d'énergie et la rupture sera soudaine et violente. Toutefois, si la courbe de rigidité du chargement est plus abrupte que celle du pilier après rupture, alors la rupture sera progressive et non violente.

Il est intéressant de noter que les surfaces sous ces différentes courbes représentent les composantes énergétiques. La surface sous la courbe (i.e. OAB) représente l'énergie utilisée dans le processus de fracturation. Elle est constituée de deux composantes: l'énergie de déformation emmagasinée de la résistance au pic ( $U_m$ ) ainsi qu'une partie de l'énergie emmagasinée dans la masse rocheuse environnante ( $U_s$ ) (i.e. le système de chargement). La surface entre les deux courbes de déchargement représente l'énergie sismique libérée ( $W_k$ ). Il est important de noter que la violence des coups de toit de pilier n'est pas due à l'énergie emmagasinée dans le pilier mais plutôt à celle du système de chargement.

#### COUPS DE TOIT RELIES AU GLISSEMENT DE FAILLE

Le glissement le long d'une faille a longtemps été reconnu comme étant le mécanisme d'un tremblement de terre. Ce n'est que récemment que le même mécanisme a été reconnu comme étant la cause de certains coups de toit dans les mines canadiennes à roche dure spécialement celles de Sudbury.

Les contraintes de cisaillement agissent parallèlement à la faille ou au dyke. Le glissement est empêché en autant que les forces de serrage sont supérieures à la contrainte de cisaillement. Les forces de serrage sont contrôlées par la contrainte agissant perpendiculairement à la faille ainsi que par le coefficient de friction de la faille elle-même. Le glissement peut être initié soit par augmentation de la contrainte de cisaillement ou soit par une diminution de la contrainte perpendiculaire ou du coefficient de friction. Un fois que le glissement se produit, le faible coefficient de friction dynamique intervient causant ainsi une diminution de la contrainte le long de la faille. En théorie les modèles indiquent que seulement un glissement mineur de même qu'une légère diminution des contraintes sont nécessaires pour causer des coups de toit importants. Par exemple, un coup de toit de magnitude 3.0 causerait une diminution des contraintes de 3.5 MPa accompagnée d'un glissement de 12 mm sur un rayon de 100 mètres.

Dans la plupart des cas, les dommages causés par les coups de toit reliés au glissement de faille sont minimes. A titre d'exemple, un coup de toit de magnitude 2.2 est survenu à la mine Falconbridge près de Sudbury et aucun dommage n'a pu être décelé bien qu'un glissement de 10 à 20 mm de la faille a pu être observé. Normalement les dommages observés se produisent loin de la faille ou l'énergie sismique radiée a dangereusement contribué à la surcharge de la structure. Dans un cas, un coup de toit de magnitude 3.4 fut responsable de l'effondrement d'une couche de remblai dans un chantier descendant exploité par une chambre remblayée située à environ 20 mètres plus loin.

## ATTENUATION ET CONTROLE DES COUPS DE TOIT

Il y a deux types d'approches utilisées pour atténuer les coups de toits lesquelles peuvent être appelées "stratégique" et "tactique". L'approche stratégique a pour but de diminuer la possibilité de rencontrer un roc enclin aux coups de toit ou de diminuer la sévérité de ces derniers. Les techniques utilisées sont celles de la séquence d'extraction qui a pour but de minimiser les relâchements importants d'énergie, de l'introduction de piliers permanents ou semi-permanents afin de réduire la convergence volumétrique et le changement de l'énergie potentielle, de l'utilisation de remblai afin de limiter la convergence et ainsi absorber l'énergie qui autrement serait libérée sous forme d'énergie sismique. Les avantages de ces techniques ne peuvent être réalisés qu'à long terme.

L'approche tactique quant à elle, consiste à accepter le fait que les coups de toit sont inévitables tout en essayant de limiter l'étendue des dommages. Les techniques utilisées comprennent la conception de systèmes de support lesquels chercheront à se déformer sous les vibrations plutôt qu'à se rompre, ainsi que les sautages de relaxation des contraintes afin de ramollir la roche et de contrôler le chronométrage du changement dans l'énergie potentielle. Les avantages de ces techniques sont réalisables à court terme.

## LES METHODES STRATEGIQUES

La cause des coups de toit est habituellement connue. Généralement elle est le résultat de décisions reliées à la planification de la mine faites plusieurs années auparavant, et dans un cas 40 ans avant le début des premiers coups de toit.

Un des problèmes généralement rencontré, est celui des piliers laissés comme protection des puits de mine et où ces derniers sont foncés soit à travers ou près de la zone minéralisée. A prime abord, la logique veut qu'en exploitant, ces piliers vont causer un déplacement du puits qui pourrait engendrer certains dommages possibles. Le plus important coup de toit jamais enregistré au Canada, d'une magnitude estimée d'environ 5.0, est survenu dans un pilier de puits à la mine Wright Hargreaves de Kirkland Lake en 1964. Ce coup de toit fut responsable de plusieurs morts ainsi que de la fermeture immédiate de la mine.

Un autre problème généralement rencontré est celui de l'exploitation par chambres-magasins. Une fois que le minerai abattu est retiré du chantier, ceci devient en quelque sorte une exploitation par chantiers ouverts et piliers. Si les piliers sont sous-dimensionnés, alors des coups de toit peuvent se produire. Similairement, dans une exploitation par chambres et piliers, des piliers sous-dimensionnés peuvent entraîner des coups de toit en chaîne (e.g. la mine Quirke). Dans les deux cas, les problèmes ne sont généralement pas rencontrés au début de l'exploitation

mais quelques années plus tard lorsque la superficie exploitée est plus considérable.

Le rapport de Morrison (1942) fait état de méthodes stratégiques mises de l'avant dans le but de contrôler les coups de toit. Les coups de toit étaient attribués aux formations en "dômes" lesquelles sont, en fait, des zones de roc fracturé au pourtour de chacun des chantiers (figure 3). Au fur et à mesure que les chantiers se rapprochent les uns des autres, les piliers intermédiaires deviennent de plus en plus sous pression. Si ces piliers se rupturent subitement, le volume du dôme augmente, lui aussi, de façon subite. La rupture d'un volume important de roc entre deux ou plusieurs dômes ainsi que la libération de son énergie accumulée, résultent en un coup de toit.

L'intensité du coup de toit dépend de la dimension finale du dôme ainsi que de l'énergie emmagasinée à l'intérieur. L'envergure du dôme était contrôlée par l'étendue du chantier, la profondeur ainsi que par les propriétés physiques des parois rocheuses.

Par la suite, la théorie du "dôme" fut discréditée lorsqu'il fut démontré de façon théorique que l'étendue des dômes diminue avec la profondeur. Toutefois plusieurs caractéristiques associées aux dômes sont toujours applicables aux stratégies reliées au contrôle des coups de toit. L'étendue des chantiers, la profondeur ainsi que les propriétés élastiques des parois rocheuses sont autant de moyens servant au contrôle de la convergence et du changement de l'énergie potentielle de

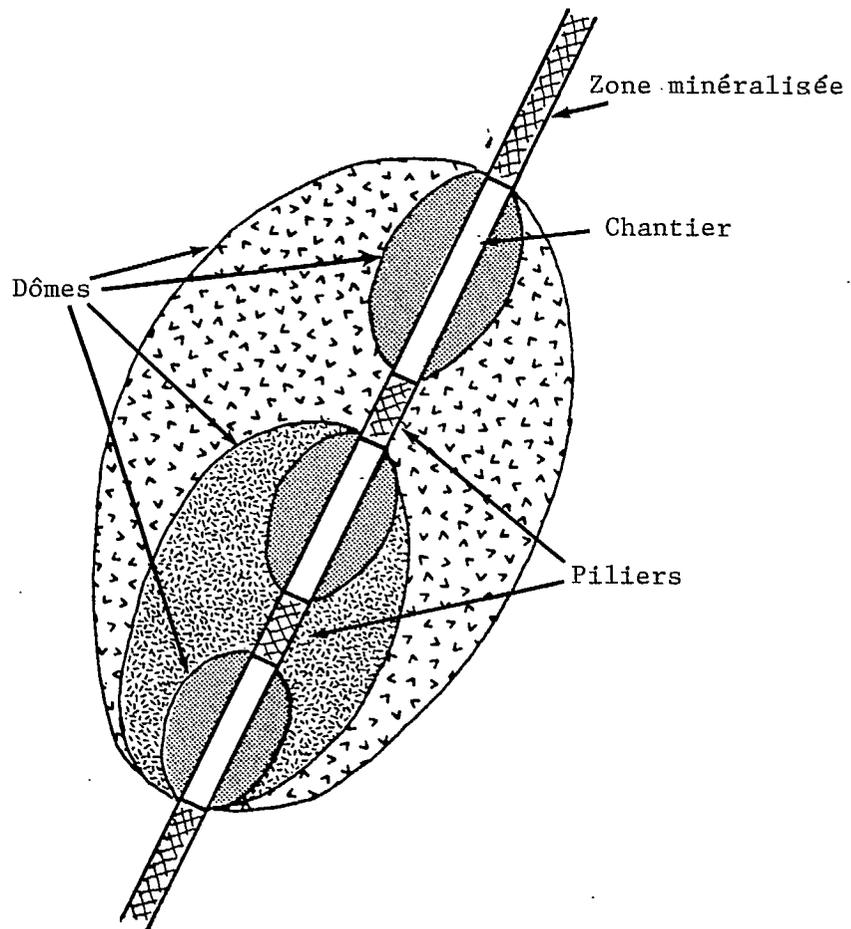


Figure 3 - Théorie du dôme des coups de toit  
(d'après Morrison, 1942).

la masse rocheuse environnante. Ceci est maintenant reconnu comme étant la force motrice de tous les coups de toit.

Selon Morrison, la principale stratégie de contrôle des coups de toit était basée sur une planification minière qui éliminait les derniers petits piliers et permettait aux dômes de s'élargir graduellement. En pratique, ceci équivalait, en quelque sorte, à une géométrie à longue taille.

L'effet des plans de faiblesse, tels les failles ou les dykes, était interprété en terme de leur effet sur la formation de dômes et sur les concentrations de contrainte. Le concept de glissement le long de ces structures n'était pas reconnu. Il fut recommandé d'exploiter loin des plans majeurs de faiblesse, ou de les intercepter perpendiculairement plutôt qu'à angle aigu. L'importance du support, tel que le remblai pour contrôler le nombre et la gravité des coups de toit, fut reconnue, bien qu'à nouveau en terme de son effet sur l'ampleur des dômes.

Il est maintenant reconnu que le changement dans l'énergie potentielle de la masse rocheuse est la force motrice de tous coups de toit. L'énergie potentielle est en définitive la contrainte avant exploitation multipliée par la convergence volumétrique du chantier. Nous n'avons aucun contrôle sur la contrainte mais toutefois un contrôle limité sur la convergence.

Des piliers stabilisateurs à intervalle régulier limiteraient l'étendue des chantiers et réduiraient la convergence. Cependant ceci equivaut, en pratique, à une perte d'environ 20% des réserves. On y a cependant recours lorsque le problème des coups de toit semble insoluble (e.g. les mines d'or d'Afrique du Sud).

Le remblai et spécialement le remblai rigide réduira la convergence d'un chantier et, comme il est indiqué à la l'équation 3, absorbera l'énergie qui, autrement, est libérée comme énergie séismique. La plupart des avantages reliés au remblai sont obtenus dans les dépôts tabulaires étroits.

Enfin, on peut essayer de contrôler le taux avec lequel l'énergie est libérée. Plusieurs mines peuvent extraire environ 80% de leurs réserves de minerai sans pour autant induire des problèmes sérieux de coup de toit. C'est le dernier 20% qui cause tous les problèmes. Les raisons de ceci sont illustrées à la figure 4. Ce dernier 20% est sous forme de piliers qui retiennent la convergence globale. Lorsque ces piliers sont exploités, des changements énormes se produisent dans l'énergie potentielle. Si l'extraction par longue taille est utilisée à partir du tout début de l'exploitation, alors le taux d'énergie relâchée est plus uniforme au cours de la vie de la mine.

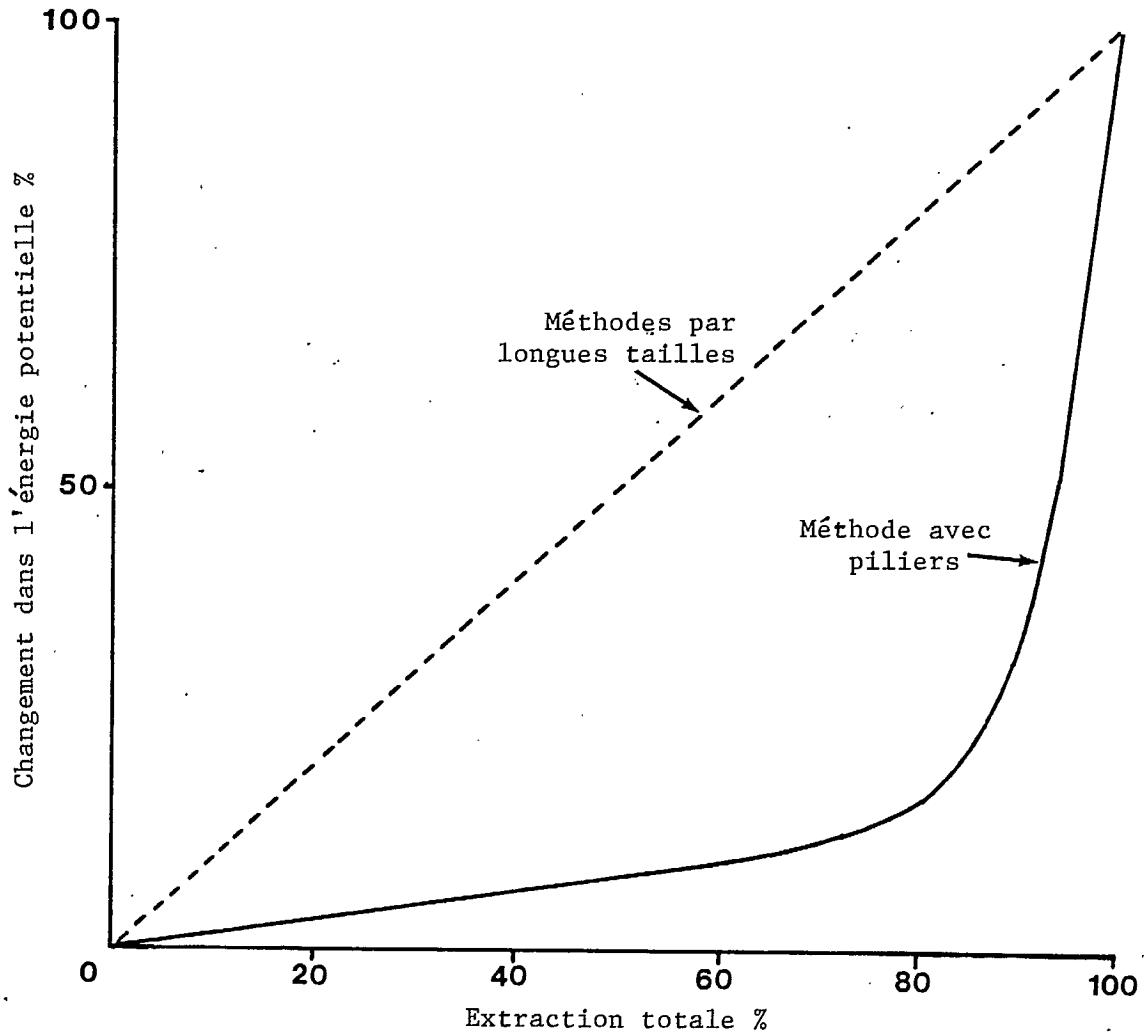


Figure 4 - Taux d'énergie libérée pour différentes méthodes d'extraction.

## LES METHODES TACTIQUES

Dans certaines mines, sous une profondeur d'environ 1000 mètres, le seul fait de créer une ouverture est suffisant pour produire des concentrations élevées de contrainte et de faibles coups de toit. Ces problèmes augmentent dans les chantiers d'extraction. Bien que les méthodes stratégiques soient toujours importantes pour réduire la sévérité des coups de toit, elle n'élimineront cependant pas le problème.

A ce moment, les méthodes "tactiques" peuvent être utilisées pour protéger les travailleurs. Lorsqu'un coup de toit survient, une onde de contrainte se propage à partir de la source. Lorsque cette impulsion de contrainte atteint le système de support rigide (e.g. les boulons à ancrage mécanique) elle peut provoquer la rupture violente de ces derniers et engendrer des affaissements de roc à l'intérieur des ouvertures créées. Les caractéristiques de ces boulons à ancrage mécanique ont été observées dans plusieurs mines ontariennes. Un autre système de support rigide est celui des barres de métal cimentées qui est plus résistant que le système de boulons à ancrage mécanique et qui est capable de supporter une onde de contrainte plus importante avant de se briser. L'expérience de certaines mines montre que le support à friction (e.g. "Split Sets" et "Swellex") combiné avec grillage métallique grunite, peut résister à des coups de toit pouvant atteindre une magnitude de 2.5. Le grillage retient le roc fracturé. Dans des conditions extrêmes, les mines d'or d'Afrique du Sud utilisent un soutènement par lacage. Ceci consiste en une barre

lisse, en acier doux, cimentée dans un trou foré et munie d'un crochet en forme de houlette au collet du trou. Le grillage métallique est placé contre le roc puis le câble d'acier est enfilé dans le crochet suivant un réseau en forme de losange. Ce genre de support a retenu un coup de toit de magnitude 4.0, mais toutefois il s'avère très dispendieux. La figure 5 montre le profil d'une galerie de roulage avant et après le coup de toit de magnitude 4.0.

Le sautage de relaxation des contraintes est utilisé dans plusieurs mines d'Amérique du Nord soit dans les galeries de développement ou soit dans les piliers de couronne des chantiers exploités par chambre remblayée. Le but est de changer l'énergie potentielle de la masse rocheuse environnante. Ceci est rendu possible en fracturant le roc de manière à le rendre plus mou, ce qui permet aux parois de converger. Toutefois, il est possible que certains problèmes surviennent avec cette méthode. Une des règles de base en mécanique des roches est que les contraintes ne peuvent disparaître mais seulement être transférées. En conséquence, les sautages de relaxation des contraintes transfèrent les contraintes aux structures adjacentes lesquelles peuvent à leur tour être victime d'un coup de toit.

Dans certaines mines, les coups de toit surviennent dans l'espace de quelques minutes à quelques heures après un sautage de production ou de relaxation des constantes. Ces mines font, invariablement, leurs sautages principaux à des périodes déterminées et lorsque personne n'est sous

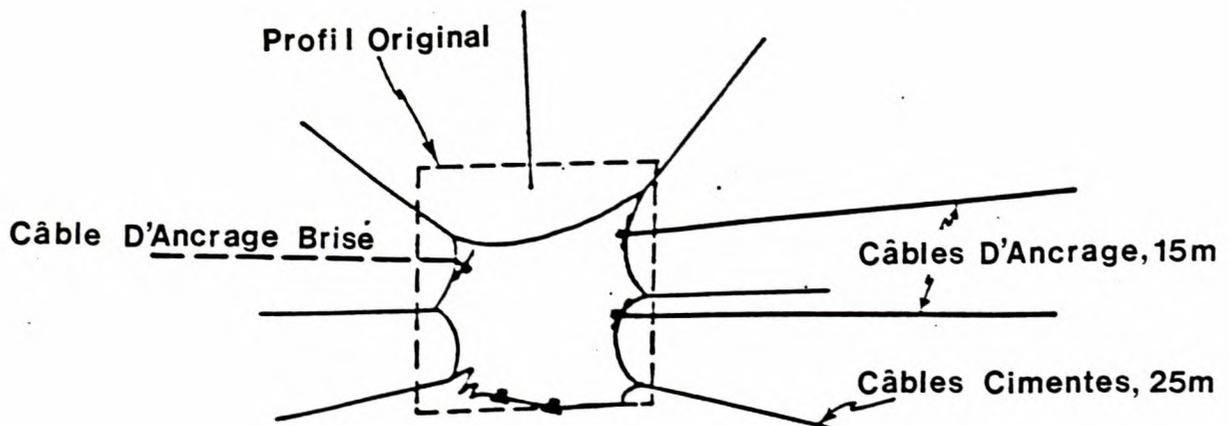
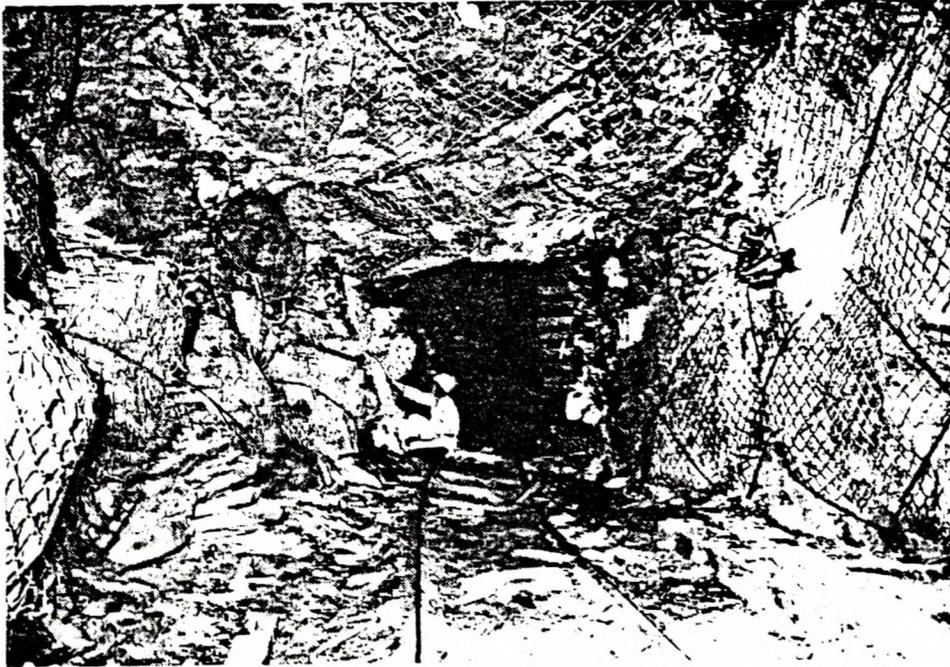


Figure 5 - Dommage causé à une galerie de roulage par un coup de toit de magnitude 4.0 (d'après Ortlepp, 1983).

terre. D'où il peut être possible de déterminer le temps d'un coup de toit. Les mines utilisant les méthodes d'abattage par trous de mine profonds, tentent de faire leurs importants sautages de production après la dernière période de travail du vendredi, laissant ainsi à la mine une période de deux jours pour se calmer.

#### PREDICTION DES COUPS DE TOIT

Il existe deux aspects reliés à la prédiction des coups de toit: la localisation et l'heure. Dans certains cas il est possible d'identifier à l'intérieur de la mine les endroits enclins aux coups de toit en se basant sur l'activité microséismique ou sur les modèles sur ordinateur lesquels donnent la distribution des contraintes. Quant à la prédiction de l'heure, ceci est beaucoup plus évasif. Les tremblements de terre se produisent depuis beaucoup plus longtemps que les coups de toit, et il n'y a toujours aucune méthode adéquate de les prédire.

Dans certains cas il y a un accroissement de l'activité microséismique précédant les coups de pilier. Toutefois, cela dépend beaucoup de l'échelle de temps examinée. La figure 6 montre l'activité microséismique enregistrée juste avant d'importants coups de toit à la mine Quirke en septembre 1984. Si on examine l'échelle des minutes ou des heures précédant les coups de toit, on ne constate aucune tendance indiquant l'imminence de coup de toit. Cependant, le registre de l'activité microséismique des huit mois précédents indique une augmentation graduelle de l'activité microséismique.

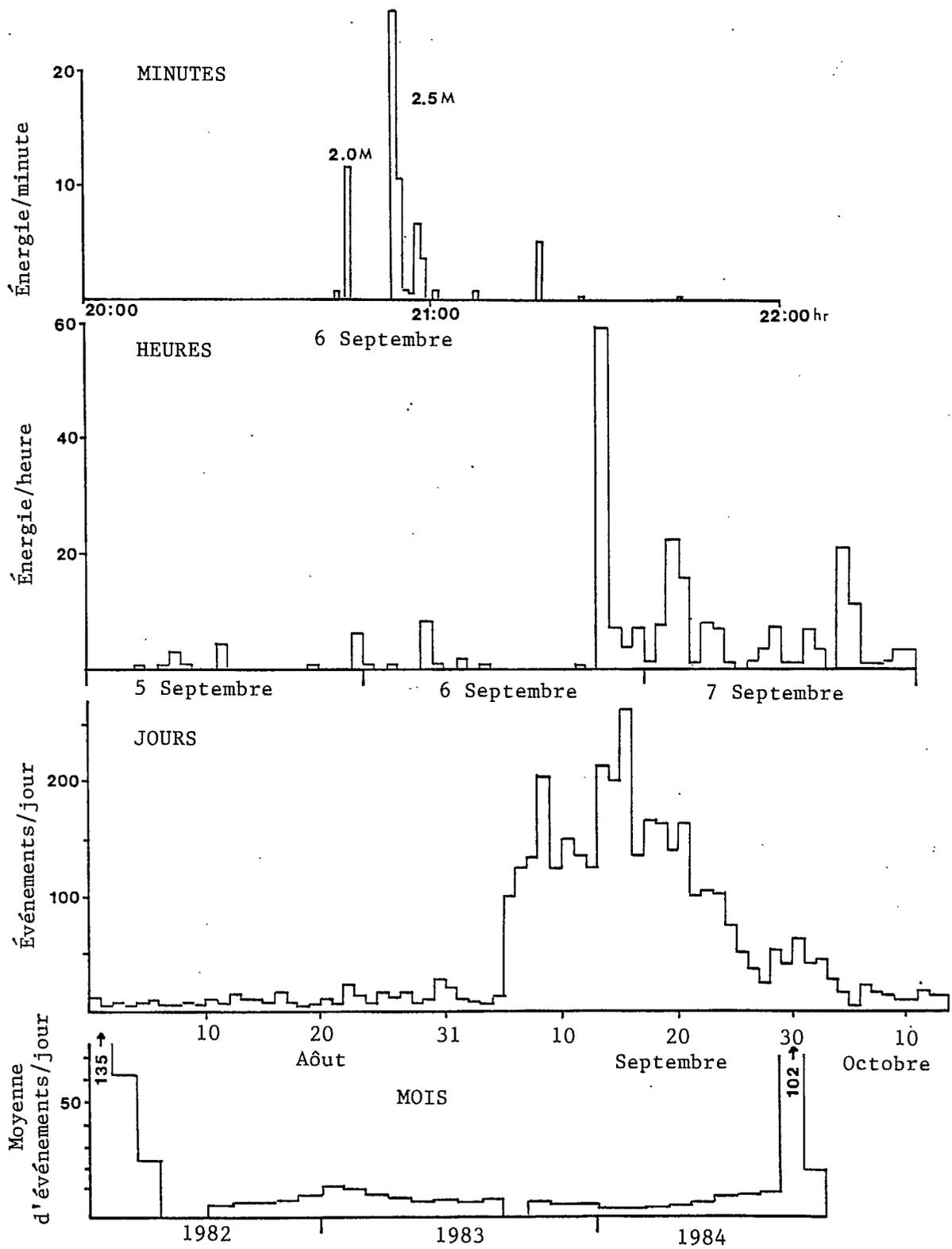


Figure 6 - Activité microséismique avant un coup de toit majeur; activité pour différentes périodes.

## LA SURVEILLANCE DES COUPS DE TOIT

Trois types de systèmes d'écoute sismique sont présentement utilisés dans le but de faire l'écoute d'une large gamme d'événements sismiques.

Le réseau sismique de l'est du Canada est opéré par la division de la géophysique de la commission géologique du Canada. Les séismomètres sont localisés en Ontario, au Québec ainsi que dans les provinces maritimes afin de faire l'écoute bien entendu, des tremblements de terre qui se produisent. Ces ondes enregistrent également les coups de toit d'importance et les magnitudes peuvent ainsi être calculées.

En Ontario, le réseau sismique existant a été étendu par l'addition de stations sismographiques à Sudbury, Elliot Lake, Red Lake et Kirkland Lake (figure 7). Le but principal de ces stations est de fournir les magnitudes des coups de toit pour des magnitudes aussi basses que 1.0. L'objectif secondaire est de pouvoir conserver en permanence les enregistrements des plus importants événements sismiques.

Le plus sophistiqué des nouveaux réseaux est celui du bassin de Sudbury (figure 8). Les trois stations sismographiques sont localisées au pourtour nord, sud et ouest du bassin. Cette disposition rend la triangulation possible afin de localiser les coups de toit qui jusqu'ici

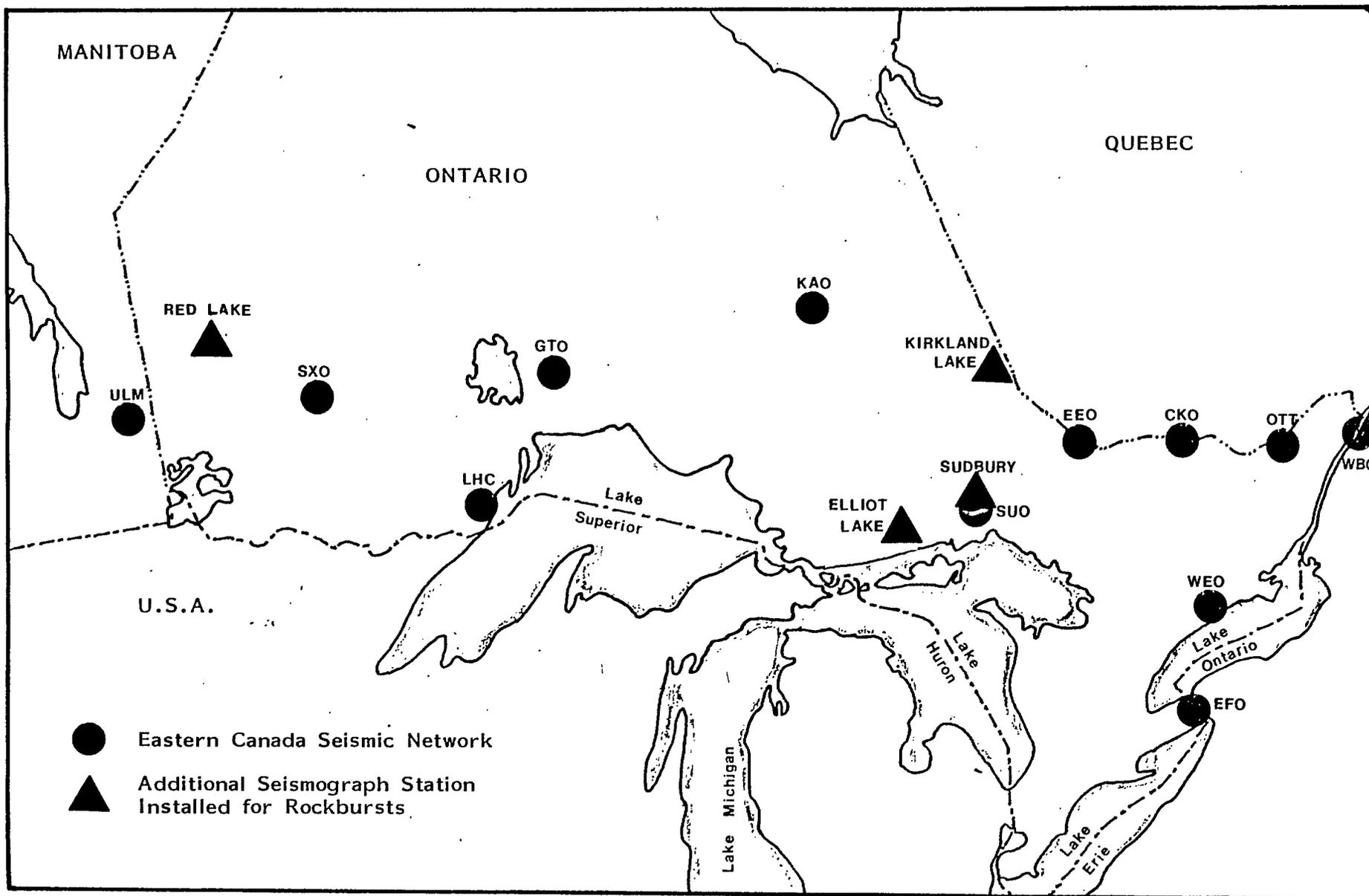


Figure 7 - Plan partiel des stations sismographiques du réseau sismiques de l'est du Canada ainsi que des stations additionnelles pour la détection des coups de toit.

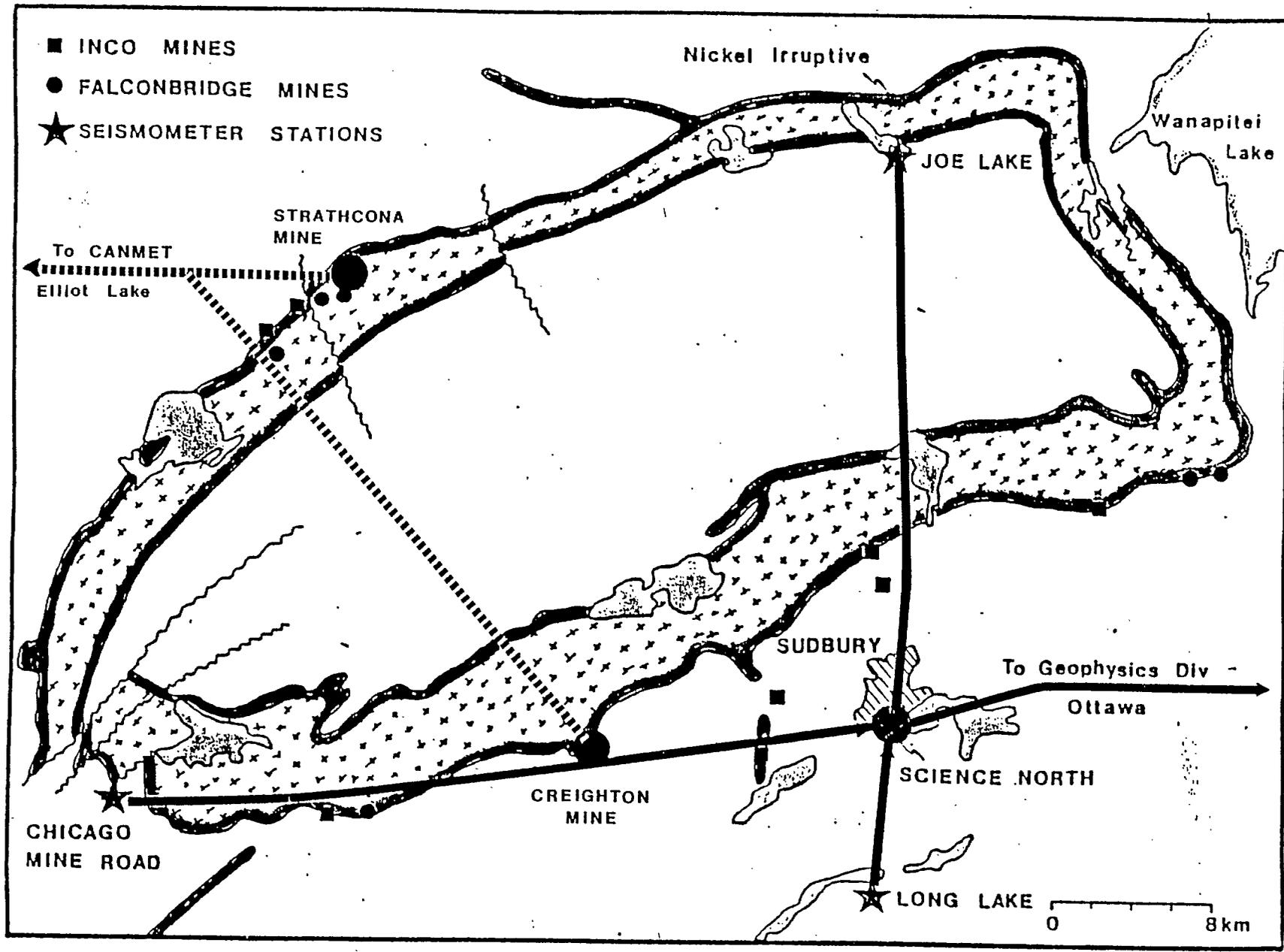


Figure 8 - Localisation des stations séismographiques et des exploitations minières du bassin de Sudbury.

étaient impossibles à localiser. Les signaux enregistrés par chacun des séismomètres sont digitalisés à la sonde puis continuellement transmis par lignes téléphoniques à Science Nord. Là les signaux sont enregistrés sur tambours lesquels sont exposés au public. De plus, ces mêmes signaux sont continuellement transmis par lignes téléphoniques spéciales à la division de géophysique à Ottawa qui en fait l'analyse et en détermine les magnitudes.

Les systèmes d'écoute macroséismiques sont conçus pour capter les ondes complètes des événements séismiques importants. Les géophones triaxiaux à mouvement de grande amplitude sont installés entre 500 et 1000 mètres de distance de l'activité minière de manière à ne pas saturer les sondes. Chaque système est composé de 5 géophones installés tant en surface que sous terre.

L'analyse des ondes devrait fournir l'information additionnelle quant aux mécanismes des coups de toit. L'orientation du premier mouvement devrait indiquer le type de coup de toit. A titre d'exemple, les coups de toit de pilier qui sont des implosions, ont un premier mouvement vers l'intérieur alors que les sautages qui sont des explosions, ont un premier mouvement vers l'extérieur. Quant aux coups de toit reliés au glissement de faille, les cotés opposés de la faille se déplacent dans des directions opposées.

La vitesse des particules au pic est un moyen de mesurer les dommages causés par un coup de toit par analogie avec les sautages. Ce paramètre est utilisé pour concevoir les systèmes de support afin qu'ils puissent

résister à certains niveaux de coup de toit.

L'intégration de l'onde représente l'énergie séismique libérée par un coup de toit laquelle est fondamentale dans la compréhension de l'équilibre énergétique.

L'analyse des fréquences du signal a été utilisée en séismologie afin de déterminer les principaux paramètres des coups de toit (i.e. rayon séismique, glissement, baisse des contraintes).

Cinq systèmes macroséismiques seront installés. Les deux premiers sont déjà en operation: un en surface au-dessus de la mine Quirke à Elliot Lake et l'autre à la mine Strathcona de la Falconbridge à Sudbury. Les autres systèmes seront installés à la mine Creighton d'INCO, à la mine Campbell Red Lake et finalement à la mine Macassa de la compagnie Lac Mineral.

Les systèmes d'écoute microséismiques sont possédés et opérés par les compagnies minières. Présentement, il y a 14 systèmes installés dans les mines ontariennes et tous ont été fabriqués par Electrolab. D'autres systèmes sont installés en Saskatchewan dans une mine de potasse et au Nouveau-Brunswick dans une mine de plomb-zinc. Ces systèmes utilisent jusqu'à 64 géophones installés sous terre et extrêmement sensibles. Leur fonction première est de localiser en quelques secondes le foyer de l'activité séismique. Une indication relative de la magnitude est aussi

obtenue.

Les compagnies minières ont mis beaucoup d'efforts dans le développement de logiciels pour ces systèmes. Des plans de mine digitalisés de même que des sections sont produits afin de montrer la localisation des événements. Dans plusieurs cas, ces plans sont mis à la disposition du personnel de production avant que les travailleurs descendent sous terre. Ces systèmes ont influencé de façon significative la planification minière.

