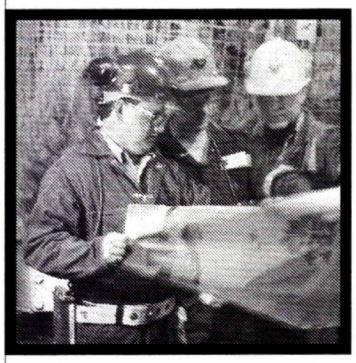
CANMET

Programme canadien de recherche sur les coups de toit

Phase II



SEPTEMBRE 1998

RAPPORT FINAL

SOUS LA DIRECTION DE :

Parviz Mottahed

et

James B. Vance

SP98-017F

Ressources naturelles Canada

Natural Resources Canada

Canada

© Ministre des Travaux publics et des Services gouvernementaux Canada – 1998

N° de catalogue : M38-15/98-017F
ISBN 0-660-96017-6

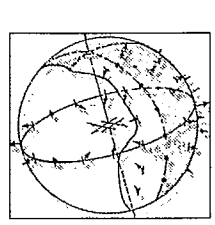
Cette publication est disponible auprès de :

CANMET
Secteur des minéraux et des métaux
Ressources naturelles Canada
Ottawa (Ontario)
K1A 0E4

Téléphone : (613) 992-1285
Télécopieur : (613) 947-6606

This publication is also available in English under the title
Canadian Rockburst Research Program, Phase II: 1990-1995, Final Report

Catalogue No. M38-15/98-017E
ISBN 0-660-17551-7



Préface

Les coups de toit, explosions soudaines du massif rocheux accompagnées d'un relâchement d'énergie sismique, constituent un sujet de préoccupation dans les mines de roche dure du Canada depuis que l'extraction se fait à des niveaux moyens et profonds. Le phénomène des coups de toit n'est pas propre à une seule région minière du pays : il s'en produit dans des régions très éloignées les unes des autres. Le danger qu'ils représentent pour la vie des mineurs et leur incidence sur les activités minières obligent à en limiter considérablement la fréquence et l'ampleur.

Encore aujourd'hui, il est impossible de prédire où et quand se manifesteront les coups de toit. Une chose est certaine toutefois : de nombreuses caractéristiques de l'environnement minier (rigidité du massif rocheux, distribution du champ des contraintes naturelles, effets des principales structures géologiques, géométrie et configuration des ouvertures souterraines, vitesse d'avancée et volume de masse extraite) influent sur l'emplacement et la magnitude des coups de toit. Des études doivent être effectuées dans de nombreux domaines afin d'évaluer et de comprendre cet obstacle majeur à l'exploitation souterraine, et trouver des solutions : comportement sous contraintes induites, contrôle du terrain, comportement du massif rocheux et des matériaux rocheux, et contrôle de l'intégrité.

La deuxième phase du Programme canadien de recherche sur les coups de toit, à l'issue de laquelle ce rapport a été préparé, a été réalisée en collaboration avec l'industrie, les universités, le gouvernement de l'Ontario et CANMET. Son objectif consistait à mettre au point des techniques et des méthodes pratiques à l'intention des exploitants miniers dans le but de réduire et d'atténuer les effets des coups de toit dans les mines canadiennes.

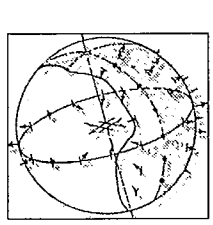
La contribution de CANMET à ce Programme, qui s'inscrit dans les mesures visant à améliorer la santé et la sécurité des mineurs, a été axée sur l'enregistrement des événements sismiques induits par l'exploitation minière. Plusieurs technologies ont été perfectionnées, entre autres un algorithme de pointe servant à localiser la source des événements, des systèmes de surveillance sismique et des logiciels d'analyse ultra-modernes permettant une meilleure analyse des ondes sismiques, et le système sismique régional du Réseau sismographique numérique de CANMET (RSNC). De plus, CANMET continue d'offrir aux entreprises minières ses services de surveillance et d'analyse de l'activité sismique.

Le présent rapport expose les progrès technologiques rattachés à la contribution de CANMET. Il constitue un ouvrage important sur la surveillance sismique et devrait s'avérer un outil précieux pour l'industrie et d'autres intervenants qui utilisent maintenant cette technologie de façon régulière dans des terrains soumis à de fortes contraintes.

CANMET est fier du rôle qu'il a joué dans ce projet et de la contribution de ses employés qui, sous la direction technique de Parviz Mottahed, ont participé au développement de technologies nécessaires à la compréhension et à l'atténuation du phénomène des coups de toit.

Marc Bétournay

Marc C. Bétournay, Ph.D.
Gestionnaire
Laboratoires miniers
CANMET



Avant-propos

La Phase I du Programme de recherche sur les coups de toit a été une réussite. À l'issue des travaux, une importante publication, le *Manuel des coups de toit dans les mines de roche dure de l'Ontario* a présenté un compte rendu détaillé de la recherche.

En 1990, la décision a été prise de poursuivre la recherche dans le cadre de la Phase II, pour une autre période de cinq ans. Y ont participé CANMET, le ministère du Développement du Nord et des Mines ainsi que 12 sociétés minières canadiennes sous l'égide du Mining Research Directorate (MRD), dont le nom actuel est la Canadian Mining Research Organization (CAMIRO). Le nombre total de sociétés minières a été porté à 13 lorsque la société chilienne CODELCO s'est jointe au programme.

Un montant de 12 millions de dollars a été alloué au projet, qui a comporté quatre grands axes de recherche :

- nouveaux systèmes d'acquisition des données;
- application des données sismiques à la conception des mines;
- mécanismes sismiques induits par les activités minières;
- caractérisation des remblais cimentés.

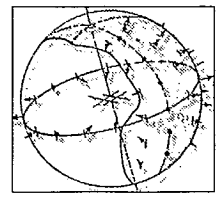
En outre, le programme a financé des travaux de recherche appliquée portant sur des problèmes de coups de toit particuliers à certaines mines, et les résultats ont fait l'objet d'articles et de rapports techniques.

En 1993, un autre programme de recherche sur les coups de toit a été entrepris conjointement par la province de Québec, les sociétés minières québécoises et le gouvernement du Canada. Le programme a été financé dans le cadre de l'Entente auxiliaire sur le développement minéral (EADM). Ce programme portait surtout sur l'exploitation minière en gisement filonien, une pratique courante au Québec, mais les travaux de ce programme recoupaient en partie la recherche effectuée en Ontario.

Les travaux des Phases I et II du Programme de recherche sur les coups de toit étant achevés, il est maintenant possible d'appliquer les techniques de surveillance microsismiques à la conception des mines avec plus de savoir-faire que jamais auparavant. Les ingénieurs chargés du contrôle du terrain utilisent couramment le matériel de surveillance sismique dans leur travail et, grâce à une meilleure compréhension des sources sismiques, la sécurité et la productivité des mines ont augmenté.

CAMIRO a publié récemment les résultats de la recherche faite par les autres partenaires. Cette recherche a été coordonnée par l'intermédiaire du comité de gestion de projet du Programme canadien de recherche sur les coups de toit.

Jim Vance
Gestionnaire
Programme de contrôle de terrain
CANMET



Remerciements

Cette publication est le fruit de cinq années de recherche effectuée par une excellente équipe de scientifiques, d'ingénieurs et de techniciens des Laboratoires des mines et des sciences minérales de CANMET (appelés auparavant Laboratoires de recherche minière). Les différents chapitres ont été préparés par des membres du groupe, que nous remercions sincèrement de leur collaboration.

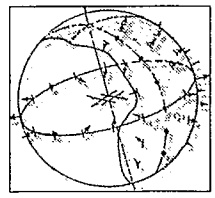
- Chapitre 1 : John E. Udd
- Chapitres 2, 3 et 6 : Shahriar Talebi
- Chapitre 4 et annexes I et II : Paul Rochon et Denis Lebel
- Chapitre 5 et annexes III, IV et V : Maochen Ge

Outre ce rapport final, de nombreux rapports, publications et articles de conférence présentant un intérêt pour l'industrie minière ont été produits dans le cadre du programme. Ces publications sont énumérées à l'annexe VI.

Les personnes ou les organisations dont les noms suivent ont également contribué au succès du programme. Nous leur sommes très reconnaissants de leur contribution.

- L'industrie minière canadienne, pour son appui au projet.
- Le conseil d'administration de la Mining Research Directorate.
- Le comité de gestion du Programme canadien de recherche sur les coups de toit.
- Tout le personnel des Laboratoires de recherche minière qui travaille dans le domaine du contrôle du terrain et de la mécanique des roches, particulièrement Behrouz Arjang, Martin Côté, Catherine Galley, Louise Laverdure, Michel Plouffe et Chris Pritchard. Michel Plouffe a de plus agi à titre de conseiller scientifique pour la traduction française du présent rapport.

Nous remercions également Robert Lauriault, gérant des communications aux Laboratoires des mines et des sciences minérales de CANMET, ainsi que l'équipe de production du présent rapport : Adèle Lessard, coordination de la production et révision française, Jean MacGillivray, révision anglaise, et Debra Seguin, conception graphique et mise en page.



Programme canadien de recherche sur les coups de toit

Partenaires financiers du programme

Brunswick Mining & Smelting Ltd.
CANMET
CODELCO (El Teniente), Chili
Corona Corporation
Falconbridge Ltée
Inco Ltée
Les Minéraux Noranda Inc.
Minerais Lac Ltée
Ministère du Développement du Nord et des Mines de l'Ontario
Minnova Inc.
Placer Dome Inc.
Ressources Westmin Ltée
Rio Algom Ltée

Membres du Comité de gestion du projet

Charles Graham
Tony McKuch
Doug Morrison
Parviz Mottahed
Michel O'Flaherty
Yves Potvin
Bill Quesnel
Graham Swan

Direction de la recherche minière

Peter Calder
John Gordon
Charles Graham
John Kelly
Michael Klugman
Sandy MacIntosh
Patrick Reed
John Udd

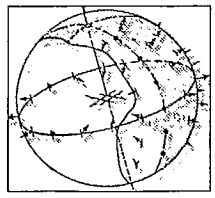


Table des Matières

Préface iii

Avant-propos v

Remerciements vii

Programme canadien de recherche sur les coups de toit ix

Chapitre 1. Historique de la recherche sur les coups de toit au Canada

1.1 Introduction 1

1.2 Coups de toit dans les mines canadiennes 2

1.3 Projet de recherche conjoint Canada-Ontario-Industrie sur les coups de toit, 1985-1990 3

1.4 Programme canadien de recherche sur les coups de toit, 1990-1995 3

1.5 Références 5

Chapitre 2. Définitions et notions de sismologie minière

2.1 Introduction 7

2.2 Définitions 7

2.2.1 Sismologie et méthodes sismiques 7

2.2.2 Sismicité induite 8

2.2.3 Sismicité induite par l'exploitation minière 9

2.2.4 Surveillance de la sismicité induite par l'exploitation minière 9

2.2.5 Coups de toit 10

2.3 Ondes de volume (ondes P et S) 10

2.3.1 Vitesses 11

2.3.2 Atténuation 11

2.3.3 Polarisation 12

2.4 Localisation de la source 13

2.4.1 Source 13

2.4.2 Techniques de localisation de la source 13

2.4.3 Méthode du USBM 14

2.4.4 Méthode de Geiger 14

2.4.5 Méthode Simplex 14

2.5 Mécanisme de la source 14
2.5.1 Tenseur du moment sismique 15
2.5.2 Coefficient de rayonnement 15
2.5.3 Mécanisme au foyer 16
2.5.4 Modélisation de la source 17
2.5.5 Modèles homogènes et hétérogènes 17

2.6 Paramètres de la source 18
2.6.1 Magnitude 19
2.6.2 Moment sismique 19
2.6.3 Dimensions de la source 20
2.6.4 Relâchement des contraintes 21
2.6.5 Relations de proportionnalité 21
2.6.6 Effets de parcours 22

2.7 Géotomographie 23
2.7.1 Imagerie tomographique 23
2.7.2 Techniques d'inversion 23
2.7.3 Dispositif expérimental et résolution 25

2.8 Risque sismique 26
2.8.1 Cycle sismique des tremblements de terre 26
2.8.2 Prédiction des tremblements de terre 26
2.8.3 Phénomènes précurseurs 27
2.8.4 Modélisation des phénomènes précurseurs 27
2.8.5 Estimation du risque sismique 28

2.9 Références 28

Chapitre 3. Réseau sismographique numérique de CANMET

3.1 Introduction 31

3.2 Historique 31

3.3 Amélioration du réseau 33

3.4 Aperçu du système 34
3.4.1 Matériel 34
3.4.2 Logiciels 35
3.4.3 Procédure quotidienne 37

3.5 Résumé des opérations 38

3.6 Données et demandes d'information 39

3.7 Conclusion 40

3.8 Références 44

Chapitre 4. Système macrosismique de CANMET et logiciel d'analyse des ondes

4.1 Introduction 45

4.2 Système macrosismique de CANMET 45
4.2.1 Revue historique des systèmes macrosismiques en Ontario 45
4.2.2 Revue historique des systèmes macrosismiques : le concept original 47

4.2.3 Amélioration des systèmes macrosismiques de l'Ontario 48
4.2.4 Cueillette de données macrosismiques 48
4.2.5 Amélioration du système sismique de CANMET 49
4.2.6 Détails techniques du système sismique de CANMET ... 49
4.2.6.1 Exigences relatives au matériel 49
4.2.6.2 Mécanisme de déclenchement 49
4.2.6.3 Logiciel d'acquisition 50
4.2.6.4 Commandes d'opération 51
4.2.6.5 Capteurs 52

4.3 Détermination automatique de la localisation de la source et de la magnitude 53

4.4 Logiciel d'analyse des ondes 53

4.5 Références 57

Chapitre 5. Localisation des événements microsismiques

5.1 Introduction 59

5.2 Historique 59
5.2.1 Principes de localisation de la source 59
5.2.2 Notions importantes 60
5.2.2.1 Dispositif expérimental et méthode de localisation de la source 60
5.2.2.2 Méthodes d'optimisation 60
5.2.2.3 Solution itérative et solution directe 61
5.2.2.4 Modèle de vitesse 62
5.2.3 Méthodes de localisation de la source 63
5.2.3.1 Méthode de Geiger 63
5.2.3.2 Méthode de Thurber 63
5.2.3.3 Méthode Simplex 63
5.2.3.4 Méthode du USBM 64
5.2.4 Facteurs influant sur la précision de la localisation 65
5.2.4.1 Qualité des données d'entrée 65
5.2.4.2 Géométrie du réseau de capteurs 65

5.3 Développements théoriques à CANMET 66
5.3.1 Évaluation des problèmes liés à la localisation dans l'industrie minière canadienne 66
5.3.2 Identification de l'origine des temps d'arrivée 67
5.3.2.1 Analyse de la différence entre les temps d'arrivée 67
5.3.2.2 Analyse des résiduelles 69
5.3.2.3 Modèle de vitesse basé sur l'événement 70
5.3.3 Évaluation de l'erreur 70
5.3.4 Analyse de fiabilité 71
5.3.5 Méthode hybride de localisation de la source 72

5.4 Le progiciel ADASLS 72
5.4.1 Généralités 72
5.4.2 Application 73

5.5 Optimisation de la géométrie du réseau de capteurs 74

5.6 Références 78

Chapitre 6. Étude d'événements pour un grand intervalle de magnitudes

6.1 Introduction 81

6.2 Description du projet 81
6.2.1 Objectifs 81
6.2.2 Site minier 81
6.2.3 Systèmes d'enregistrement 82
6.2.3.1 Système macrosismique 82
6.2.3.2 Système microsismique 83
6.2.4 Relations de proportionnalité 83

6.3 Traitement des données 84
6.3.1 Données disponibles 85
6.3.2 Analyse spectrale 85
6.3.2.1 Correction des données pour tenir compte de l'atténuation 85
6.3.2.2 Détermination des paramètres de la source 89
6.3.3 Relations de proportionnalité 92

6.4 Conclusion 94

6.5 Références 95

Annexes

Annexe I — Logiciel d'analyse macrosismique de CANMET – Présentation et description 97

Annexe II — Liste des coups de toit enregistrés dans les mines de l'Ontario par les systèmes macrosismiques de CANMET 105

Annexe III — Détection des signaux ayant pour origine des ondes S – Études de cas 117

Annexe IV — Valeurs aberrantes – Études de cas 125

Annexe V — Partie A – Études de cas relatives à la méthode hybride de localisation de la source et Partie B – Statistiques relatives à la précision de la localisation de la source 129

Annexe VI — Liste des publications sur la sismologie minière produites par le personnel des Laboratoires de recherche minière de CANMET dans le cadre de la phase II du Programme canadien de recherche sur les coups de toit, 1990-1995 137

Liste des figures 140

Liste des tableaux 142

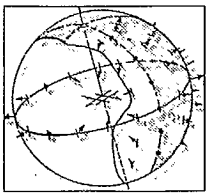
Figures des annexes 142

Tableaux des annexes 142

Glossaire de termes sismologiques 145

Symboles 150

Chapitre 1



Historique de la recherche sur les coups de toit au Canada

1.1 Introduction

Au cours des dernières décennies, notre compréhension des contraintes naturelles présentes dans la croûte terrestre et des incidences de ces contraintes sur les structures artificielles s'est accrue considérablement. Il n'y a pas si longtemps, la théorie de la dérive des continents de Wegener était accueillie avec scepticisme et, dans le domaine minier, on croyait en général que les charges appliquées aux structures souterraines s'additionnaient verticalement. Au début des années 60, les chercheurs de CANMET se sont également heurtés à un certain scepticisme lorsqu'ils ont effectué les premières mesures de contraintes in situ au Canada et ont révélé que les contraintes principales dans les massifs rocheux étaient horizontales.

Aujourd'hui, à la fin des années 90, il est bien établi que la croûte terrestre est en mouvement et que le champ des contraintes naturelles est dynamique. Les scientifiques et les ingénieurs reconnaissent que les contraintes observées localement dépendent du milieu géologique et qu'elles sont souvent associées aux structures locales principales et à l'activité tectonique antérieure. Par conséquent, lors de la conception des mines, on admet généralement que la mesure des contraintes in situ est un élément essentiel à la conception des structures souterraines.

En outre, notre connaissance de la mécanique des roches s'est améliorée au point où nous savons que les activités d'abattage réalisées près des fronts de taille dans le massif rocheux souterrain auront une incidence sur les contraintes naturelles préexistantes. Une ouverture souterraine, à l'instar de toute autre ouverture dans un milieu assujetti à des contraintes, perturbe le champ de contraintes préexistant et celles-ci se concentrent alors autour de l'ouverture. La concentration des contraintes et leurs directions font partie du vocabulaire de l'ingénieur minier d'aujourd'hui.

Sachant que nos activités ont une incidence sur la stabilité du massif rocheux autour des ouvertures, nous reconnaissons également qu'une redistribution soudaine des contraintes puisse faire augmenter si rapidement la résistance du massif qu'elle entraîne une rupture de type explosif. Les «coups de toit», comme on les appelle, ne sont pas des cataclysmes naturels, ils résultent de l'activité humaine. Des conditions particulières, qui surviennent souvent de façon imprévue, peuvent être à l'origine d'une rupture localisée du massif rocheux. Il peut s'agir de l'éclatement de la roche assujettie à de fortes contraintes en un point à la surface ou près d'une ouverture, de l'écrasement d'un pilier ou de son déplacement après que celui-ci se soit détaché. Ce dernier cas est de loin le plus potentiellement dangereux en raison de la quantité considérable d'énergie pouvant être dégagée lorsqu'une grande masse rocheuse est soudainement libérée des contraintes auxquelles elle était soumise.

Ainsi, lorsque l'ingénieur minier d'aujourd'hui conçoit un système d'excavations souterraines, il doit non seulement tenir compte de l'incidence de ces structures artificielles sur les contraintes déjà présentes dans la roche, mais aussi de la possibilité que survienne ou non une rupture. Les analyses bidimensionnelles et tridimensionnelles de la répartition des contraintes réalisées à l'aide de différentes techniques numériques caractérisent les techniques modernes de conception des chantiers et la surveillance de la stabilité du massif après l'excavation. C'est justement là l'objectif du contrôle du terrain.

1.2 Coups de toit dans les mines canadiennes

Dans son rapport intitulé «The Rockburst Situation in Ontario Mines», le regretté professeur R.G.K. Morrison signale que des coups de toit surviennent par intervalles depuis 1929, ou peut-être 1928 (Morrison, 1942). Cependant, ce n'est qu'en 1934 que les coups de toit ont commencé à préoccuper la direction de la mine Lake Shore de Kirkland Lake. Selon W.T. Robson (Robson, 1946), les principales zones critiques étaient : les piliers de plancher; les piliers se trouvant principalement dans un filon ramifié; les zones de fracturation complexe; et les zones où se trouvaient des filons parallèles et ramifiés sur une hauteur de plus de 1 100 pieds.

Jusqu'en 1940 environ, le problème s'est aggravé dans les mines de plusieurs camps miniers de l'Ontario, notamment dans les camps miniers Kirkland Lake, Larder Lake, Porcupine, Sudbury, Little Long Lac, Pickle Lake, Uchi Lake, McKenzie Island et Red Lake (Morrison, 1942). Plusieurs articles spécialisés ont été publiés par l'Institut canadien des mines et de la métallurgie (comme on l'appelait à l'époque) au cours de cette période (Hodgson, 1943; Christian, 1939; Robertson, 1939; Langford, 1941; Robson, 1940). Bon nombre d'hypothèses ont été formulées pour tenter d'expliquer le phénomène, mais aucune d'elles ne soulevait la possibilité qu'il soit causé par la présence de concentrations de contraintes excessives attribuables aux pratiques d'extraction minière de l'époque et surtout au mode d'extraction non séquentiel du minerai. Il faut se rappeler que les mines des camps miniers cités étaient caractérisées par une extraction minière très sélective dans des filons étroits de roche dure, cassante et élastique, et qu'on ne procédait pas à l'extraction séquentielle des chantiers ou des piliers.

C'est le professeur Morrison qui, grâce à ses expériences réalisées dans les mines du gisement aurifère de Kolar, dans l'État de Mysore (sud de l'Inde), introduit la notion de voûte, ou zone ayant subi un relâchement de contrainte autour d'une ouverture dans un massif rocheux assujetti à des contraintes. Il propose une stratégie qui consiste à surveiller de façon continue la croissance de la voûte et à conjuguer les activités séquentielles et le soutènement dans le but de réduire ses effets. Cette notion intuitive de l'analyse des contraintes était tout à fait géniale et il s'agissait à l'époque d'un premier pas vers la promotion de la notion de surveillance des contraintes dans le domaine de l'extraction minière. On considère aujourd'hui Morrison comme le père de la mécanique des roches au Canada.

Depuis le milieu des années 40, on fait davantage appel à la science qu'à l'art dans la conception des mines souterraines. La notion de l'extraction séquentielle a été généralement admise par l'ensemble de l'industrie et le problème des coups de toit a été graduellement supprimé. Le premier système de surveillance sismique à être installé dans une mine canadienne a été conçu en 1942 d'après un schéma du United States Bureau of Mines et a été celui de la mine Lake Shore (Hodgson, 1943).

Depuis lors, la mise en oeuvre d'une conception améliorée des mines a permis de réduire considérablement la fréquence des coups de toit. À l'exception de quelques périodes pendant lesquelles le nombre de victimes a été plus élevé, soit au début des années 50, au début des années 60 et au milieu des années 80, la fréquence a continué de décliner (Hedley, 1992).

Au cours des trois dernières décennies, l'industrie minière partout dans le monde a amélioré considérablement la mécanisation et l'automatisation de pointe. Plusieurs facteurs l'y ont incitée, dont la nécessité pour les exploitants de demeurer concurrentiels sur les marchés internationaux où un nombre beaucoup plus grand de nouveaux producteurs se sont taillé une place, le rapport coût-efficacité, la course inlassable vers une plus grande productivité et les progrès réalisés dans la technologie de l'équipement. On en est donc venu à remplacer les méthodes sélectives très coûteuses d'extraction minière par des méthodes d'extraction minière en vrac à plus faible coût, et donc à créer des chantiers plus volumineux. Cette situation mettait à l'épreuve les principes établis de conception des mines et les pratiques courantes.

En 1984, le problème des coups de toit dans les mines de l'Ontario a de nouveau atteint des proportions de crise par suite de coups de toit survenus dans les camps de Sudbury et d'Elliot Lake. À Sudbury, des coups de toit importants sont survenus à la mine Falconbridge de la Falconbridge Ltée et à la mine Creighton d'Inco Ltée. Dans le premier cas, quatre mineurs ont été tués et la mine a été fermée, ce qui a entraîné la mise à pied de 400 travailleurs. Dans le deuxième cas, une partie de la mine a été gravement endommagée. À Elliot Lake, une série de coups de toit sont survenus dans la zone du pilier frontière entre les mines Quirke, de la Rio Algom, et Denison. On s'est beaucoup inquiété de l'expansion possible de la zone d'effondrement des piliers dans les chantiers par chambres et piliers.

1.3 Projet de recherche conjoint Canada-Ontario-Industrie sur les coups de toit, 1985-1990

Par suite de ces incidents, CANMET a proposé un projet de recherche tripartite dans le but d'étudier le problème de la résurgence des coups de toit (Udd, 1984). Dans le cadre de ce projet quinquennal de 4,2 millions de dollars, le plus grand projet de recherche en collaboration jamais entrepris au Canada, le gouvernement fédéral, par l'intermédiaire de CANMET, a accepté de financer le tiers du projet en fournissant le personnel technique de recherche. Des contributions équivalentes ont été fournies par le gouvernement de l'Ontario (par l'intermédiaire du ministère du Travail) pour l'achat d'équipement, par l'industrie minière ontarienne et par le Mining Research Directorate qui a apporté le soutien nécessaire à la mise en place des installations locales. Les objectifs du projet étaient les suivants : améliorer l'interprétation des signaux microsismiques et la précision de la localisation de la source; améliorer l'évaluation des effets des méthodes d'extraction minière sur la stabilité locale et régionale; mettre au point des techniques de pointe au Canada et favoriser la diffusion de la technologie dans l'industrie.

En 1990, au terme du projet, tous les objectifs avaient été atteints. Plus particulièrement : des systèmes de surveillance microsismique ont été installés à toutes les mines où leur présence était requise; leur couverture locale dans quelque 16 mines était pratiquement complète dans la province; des stations sismographiques additionnelles ont été installées dans quatre camps miniers pour compléter le réseau ou s'insérer dans les stations existantes du Réseau sismographique de l'Est du Canada de la Commission géologique du Canada. La précision et la rapidité de la localisation des événements se sont grandement améliorées; des systèmes macrosismiques ont été mis au point à titre de systèmes intermédiaires pour les systèmes précités et ont été installés dans les mines les plus importantes. Ces systèmes, qui enregistrent les trains d'ondes complets, fournissent des données permettant de déterminer les mécanismes de la source; des essais de tirs de préfracturation ont été effectués dans le but de provoquer un relâchement des contraintes et des systèmes de soutènement permettant de limiter les dégâts ont été mis au point.

Il est important de mentionner également que l'expertise canadienne dans ce domaine a été portée à un niveau supérieur grâce à la création d'équipes de spécialistes exceptionnels à CANMET, à la Queen's University de Kingston, à l'Université Laurentienne de Sudbury et dans plusieurs organisations minières. En 1990, le Canada occupait le deuxième rang derrière l'Afrique du Sud pour ce qui est de l'expertise nationale en matière de coups de toit. Il s'agit là d'un bond prodigieux réalisé en cinq ans seulement, ce qui illustre clairement les avantages de la recherche effectuée en collaboration.

1.4 Programme canadien de recherche sur les coups de toit, 1990-1995

En 1990, en raison principalement de l'expertise acquise au Canada et du rôle plus actif que jouait l'industrie minière canadienne dans la formulation de ses besoins en matière de recherche, la gestion du programme a été confiée à la Mining Research Directorate de Sudbury, à la demande de l'industrie.

Cette organisation, financée par l'Ontario Mining Association, a été créée dans le but de déterminer les besoins des sociétés participantes et de confier la recherche à d'autres organismes. Elle s'inspirait des directives établies par l'Australian Mineral Industries Research Association Limited (AMIRA).

Au début de la seconde phase des travaux, le comité de gestion du projet a défini les objectifs stratégiques et les objectifs tactiques pour la période de cinq ans. Les premiers consistaient notamment à améliorer la compréhension du phénomène des coups de toit et à utiliser l'information sismique et microsismique dans la conception des mines (Comité de gestion du projet, 1994). Les seconds consistaient à améliorer la sécurité et la durée des excavations sujettes à des coups de toit, à établir des critères de conception concernant le soutènement et à étudier l'apport du remblai dans la stabilité des mines (Comité de gestion du projet, 1994). En outre, le Comité de gestion a déterminé que la participation accrue de l'industrie au programme et l'élargissement de la participation dans le but d'obtenir des moyens de recherche de provenance multiple feraient également partie des objectifs non techniques.

En 1990, cinq projets de recherche ont été établis. Ce sont : l'élaboration d'un système d'acquisition de données; une étude sur les mécanismes à la source des coups de toit; l'utilisation de données tirées des trains d'ondes complets comme outil perfectionné de conception de mines dans le but d'atténuer les incidences des coups de toit; les techniques de soutènement à employer pour les massifs sujets à des coups de toit; et l'utilisation de remblai dense pour soutenir les massifs sujets à des coups de toit. Les trois premiers projets ont été proposés par le groupe de sismologie du département de géologie de la Queen's University (Kingston), alors que le quatrième (sur le soutènement) a été proposé par le Groupe de recherche en géomécanique de l'Université Laurentienne de Sudbury. La proposition finale a été faite par Minerais Lac Ltée et par D.G.F. Hedley, Ph. D., aujourd'hui consultant dans le secteur privé.

Pendant cette seconde phase, CANMET a conservé les systèmes macrosismiques qui avaient été installés dans quatre mines, a continué d'analyser les données recueillies, a entretenu et amélioré le Réseau télémétrique local de Sudbury (RTLS) et les trois autres stations sismographiques qui avaient été installées auparavant à Elliot Lake et aux mines Macassa et Campbell Red Lake, et a continué à effectuer de la recherche fondamentale sur les causes et la surveillance des coups de toit. En outre, le groupe des remblais, également du Laboratoire de Sudbury (CANMET) a effectué des études à l'appui du projet sur le remblai dense.

Au moment de terminer le Programme canadien de recherche sur les coups de toit (PCRCT), à la fin de 1995, le Comité de gestion du projet a estimé que les objectifs techniques avaient été atteints, surtout en ce qui a trait au soutènement dans le sol et au remblai, au fonctionnement des systèmes microsismiques et à l'analyse des données obtenues, au perfectionnement du RTLS et à l'application des données tirées des trains d'ondes complets à la modélisation numérique destinée à la conception (Comité de gestion du projet, 1994). Cependant, on ne savait pas s'il devait y avoir une troisième phase des travaux et, le cas échéant, comment elle serait organisée. Après dix ans de recherche, les travaux étaient arrivés à maturité (ce qui était prévisible) et on estimait qu'il conviendrait de se concentrer à l'avenir sur les applications pratiques, dans les mines en fonctionnement, de ce que l'on avait appris et sur la définition du risque sismique dans le contexte des risques et coûts généraux liés à l'extraction minière (Udd, 1984).

Le présent volume contient un résumé des travaux résultant des contributions de CANMET au PCRCT pendant la période de 1990 à 1995. Il comporte six chapitres. Afin de donner au lecteur un aperçu des notions fondamentales de sismologie et des méthodes sismologiques suivies dans l'analyse des données, le chapitre 2 présente les définitions et les notions se rapportant à la sismologie minière. Le chapitre 3 présente un historique du RTLS et de son amélioration pendant la phase II de la recherche sur les coups de toit. Le chapitre 4 discute de l'amélioration et du perfectionnement des systèmes macrosismiques de CANMET et des logiciels connexes. Le chapitre 5 porte sur les efforts du personnel de CANMET dans l'élaboration d'un nouvel algorithme de localisation des événements (ADASLS) ainsi que sur les études de cas connexes qui figurent aux annexes. Le chapitre 6 discute des études relatives aux sources sismiques pour une échelle étendue de

magnitudes et qui reposent sur les données sismiques enregistrées dans les mines de l'Ontario. Le traitement graphique du logiciel de CANMET, la liste des publications du personnel de CANMET pendant la phase II de la recherche sur les coups de toit et la liste des coups de toit enregistrés dans les mines de l'Ontario par le système macrosismique de CANMET figurent en annexe.

1.5 Références

Christian, J.D. (1939). «Rockbursts at the Teck-Hughes Mine». *CIM Transactions* 42:550-567.

Comité de gestion du projet (1994). «Cooperative Rockburst Research – A review of the Canadian RockburstResearch Program 1990-1995 and a Proposal for Further Research». Mining Research Directorate, Sudbury (Ontario), 11 pages.

Hedley, D.G.F. (1992). *Manuel des coups de toit dans les mines de roche dure de l'Ontario*. CANMET, Rapport spécial SP92-1F.

Hodgson, E.A. (1943). «Recent Developments in Rockburst Research at Lake Shore Mines». *CIM Transactions* 45:313-324.

Langford, G.B. (1941). «The Rockburst Problem». *CIM Transactions* 44:169-182.

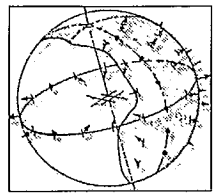
Morrison, R.G.K. (1942). «The Rockburst Situation in Ontario Mines». *CIM Transactions* 45:225-272.

Robertson, A.F. (1939). «Rockbursts at Wright-Hargreaves Mine». *CIM Transactions* 42:538- 592.

Robson, W.T. (1946). «Rockburst Incidence, Research and Control Measures». *CIM Transactions* 59:347-374.

Robson, W.T., Adamson, J.C. et Selnes, W.E. (1940). «Rockbursts at Lake Shore Mines». *CIM Transactions* 43:7-30.

Udd, John E. (1984). *A proposal for a Major Research Project on Rockbursts*. CANMET, Laboratoires de recherche minière, Rapport de division MRP/MRL 84-84 (TR), 18 pages.



Définitions et notions de sismologie minière

2.1 Introduction

Ce chapitre résume les termes et les techniques sismologiques employés en sismologie minière et particulièrement dans l'analyse de la sismicité induite par l'exploitation minière et les coups de toit. Nous avons essayé de conserver une terminologie descriptive dans la définition des termes et techniques applicables à l'ensemble du texte. La section 2 du présent chapitre définit les termes généraux employés dans ce domaine : les méthodes sismiques, la sismicité induite par l'exploitation minière, la surveillance et les coups de toit, alors que la section 3 porte sur les propriétés des ondes de volume (ondes P et S) dans les roches. Les techniques de localisation sont étudiées à la section 4. La section 5 traite des différentes méthodes utilisées dans l'analyse des mécanismes à la source des événements sismiques. À la section 6, on discute de la détermination des paramètres de la source. La section 7 traite de géotomographie et résume quelques-unes des techniques employées dans l'évaluation du risque sismique.

2.2 Définitions

La géophysique est une branche de la physique qui se consacre à l'étude de la Terre par les méthodes et les outils de la physique. Au siècle dernier, en Europe, l'industrie minière appliquait déjà la géophysique à la recherche de gisements miniers dans le but de mesurer les variations du champ magnétique de la Terre causées par les propriétés magnétiques des corps minéralisés. Plus tard, les variations des propriétés des roches, comme l'élasticité, la conductivité électrique, la gravité, le magnétisme et la radioactivité ont été utilisées pour obtenir des renseignements sur la sous-surface dans la recherche de différents types de minéraux.

2.2.1 Sismologie et méthodes sismiques

La sismologie se consacre principalement à l'étude des tremblements de terre, souvent à l'aide de sismogrammes, trains d'ondes enregistrés par des capteurs lors de secousses sismiques. Les méthodes sismiques sont utilisées pour déterminer la géométrie des structures souterraines ou la nature d'une source sismique d'après des sismogrammes enregistrés par des capteurs placés à des endroits stratégiques par rapport à la zone étudiée. D'après Kasahara (1981), on distingue trois domaines d'étude principaux en sismologie :

- l'exploration de la structure interne de la Terre,
- l'étude des processus se rapportant à l'activité sismique et aux causes des séismes,
- l'application des connaissances sismologiques à l'activité humaine.

La *sismologie des tremblements de terre,* qui se rapporte aux deux premiers domaines, utilise des méthodes passives d'étude fondées sur les sismogrammes obtenus lors de tremblements de terre. Ces tremblements de terre sont principalement causés par la fracturation de la croûte terrestre lorsqu'il y a déplacement de part et d'autre de la fracture. Le principal objectif de cette discipline consiste à étudier la nature des événements sismiques, question fondamentale en sismologie. Ce domaine de recherche se concentre sur plusieurs aspects, notamment l'analyse des séismes particuliers, la compréhension de l'activité sismique (p. ex. étude des mécanismes et des paramètres de la source) et l'analyse de l'activité sismique dans son ensemble, y compris les relations qui existent entre les événements sismiques, la tectonique, la géologie, etc.

Le troisième domaine regroupe plusieurs applications des méthodes sismiques (p. ex. la prévention des désastres, la prospection sismique des ressources naturelles, la détection d'explosions nucléaires souterraines, etc.). La *sismologie d'exploration* est fondée sur l'utilisation de sources artificielles dans le but d'étudier les structures souterraines et fait ainsi appel à des méthodes actives d'exploration. Depuis peu, les méthodes sismiques comptent parmi les méthodes géophysiques les plus utilisées dans l'exploration minière, en raison notamment de leur grande précision, de leur haute résolution et de la grande profondeur de pénétration qu'elles permettent comparativement à d'autres méthodes géophysiques. Les méthodes sismiques sont utilisées dans une grande variété de situations afin de définir la géométrie de la sous-surface, par exemple, dans les structures géologiques associées aux gisements de pétrole et de gaz (failles, plis anticlinaux et synclinaux) et dans le substratum rocheux où l'on construit de grandes structures artificielles. Cependant, certaines études sismologiques font appel à plusieurs de ces domaines et ne se limitent donc pas à un seul d'entre eux. Par exemple, la *sismologie minière* consiste à appliquer des techniques sismologiques aux mines et, pour cette raison, cette discipline est considérée comme faisant partie du troisième domaine. Toutefois, l'expansion rapide de ce domaine de recherche au cours des deux dernières décennies a nécessité l'utilisation d'un grand nombre de techniques sismologiques se rapportant aux deux premiers domaines.

2.2.2 Sismicité induite

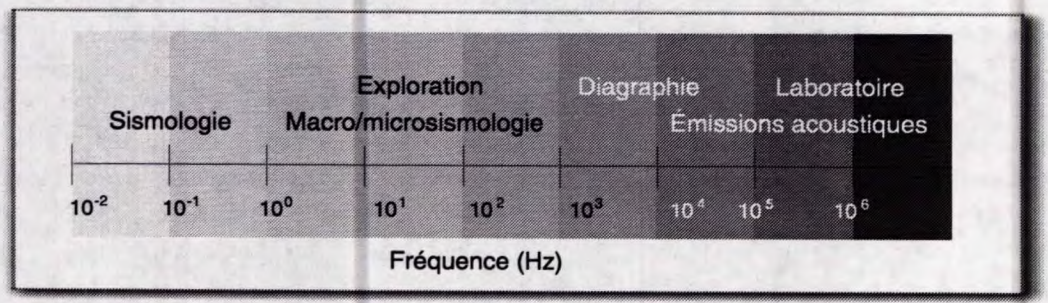
La sismicité induite définit de façon générale la sismicité causée par l'activité humaine, c'est-à- dire la sismicité qui ne découle pas directement de processus naturels. Ce phénomène peut être causé de différentes manières, notamment par :

- l'enlèvement d'une partie du massif rocheux (extraction minière, perçage de tunnels),
- la perturbation du régime hydraulique naturel (injection de fluide/extraction, construction de barrages),
- la fluctuation de la température de la roche (craquage thermique).

Dans tous les cas, le champ des contraintes dans le massif rocheux est perturbé et les contraintes sont redistribuées, ce qui peut provoquer une certaine instabilité, particulièrement dans les massifs fissurés assujettis à de fortes contraintes. On observe ce phénomène dans une grande échelle de magnitudes qui va de l'émission acoustique dans des échantillons en laboratoire aux événements sismiques d'envergure induits par l'exploitation minière et observés autour des mines profondes (Talebi, 1994).

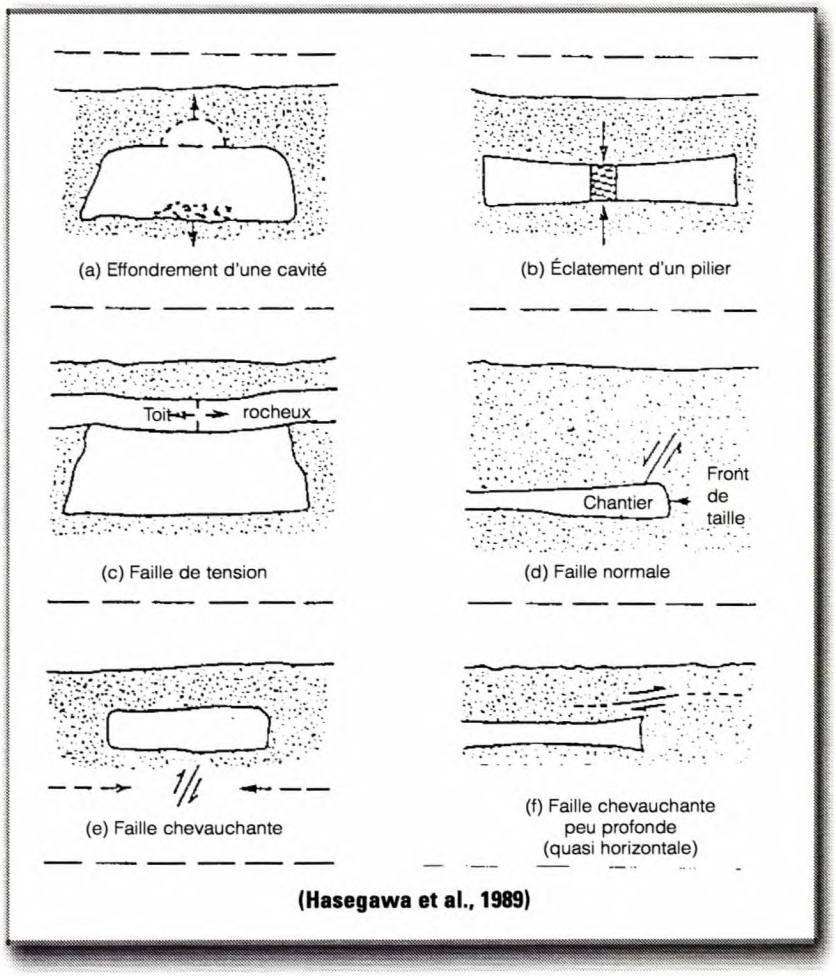
Des termes différents sont employés pour définir les instabilités ou événements causés par la fissuration de la roche à différentes échelles (voir figure 2.1). Par exemple, en sismologie minière, les événements d'envergure sont souvent appelés secousses minières ou événements induits par l'exploitation minière. Des événements de moindre envergure surviennent souvent près des chantiers actifs et sont habituellement définis comme étant des événements microsismiques en raison de leur magnitude beaucoup plus faible. À l'extrémité inférieure du spectre de magnitudes, on a souvent recours au terme émission acoustique pour indiquer les émissions haute fréquence ou les bruits de roche enregistrés dans des échantillons de roche assujettis à une charge dans un laboratoire ou observés dans des zones de rupture localisées dans une mine. Les limites entre ces différentes

Figure 2.1 Bandes de fréquence enregistrées pour les tremblements de terre, l'activité macro/microsismique, les émissions acoustiques et les domaines connexes d'étude et de recherche



catégories ne sont pas très bien définies et de nombreux auteurs emploient l'expression émission acoustique-microsismique ou simplement EA/MS pour désigner les deux dernières catégories de façon générale.

Figure 2.2 Schéma représentant six modèles concevables d'événements induits par l'activité minière.
Les flèches en continu indiquent le sens du mouvement associé à l'événement sismique dans la roche.



2.2.3 Sismicité induite par l'exploitation minière

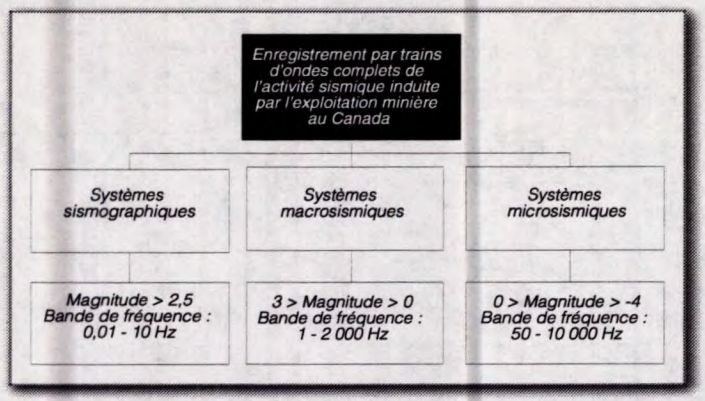
L'excavation de grands volumes de roche en profondeur et la redistribution des contraintes qui en résulte peut donner lieu à la propagation de fissures et à des déplacements le long de plans de fracture préexistants. Ce processus peut générer des événements sismiques et est connu sous le nom de sismicité induite par l'exploitation minière. Il existe différentes classifications des événements induits par l'exploitation minière. Par exemple, Hasegawa et al. (1989) fait état de six modèles décrivant de tels événements (figure 2.2). L'effondrement résulte soit d'un coup de toit dans un plafond d'une galerie de mine ou de la chute d'un morceau de roche sous l'effet de la gravité (éboulis). Un coup de pilier est généralement causé par des forces convergentes liées à l'avancement des chantiers et par des effets liés au temps. Cependant, les types d'événements sismiques les plus courants sont causés par des failles déjà existantes; on appelle ces événements rejets de faille.

Gibowicz (1990) distingue deux types d'événements sismiques qui surviennent dans les mines : ceux qui sont directement liés aux opérations d'extraction minière et qui sont causés par la rupture soudaine d'une roche cassante en raison de la concentration des contraintes autour des chantiers, et ceux qui ne sont pas liés directement aux opérations d'extraction minière mais sont causés par des mouvements sur les failles principales et d'autres discontinuités en raison de l'interaction des contraintes tectoniques et des contraintes induites par l'extraction minière. Bien qu'il s'agisse là d'une classification plutôt générale, elle atteste une tendance observée dans bon nombre de mines. Gibowicz, par exemple, a observé une distribution bimodale et un comportement différent pour ces deux types d'événements en se fondant sur une analyse probabiliste. Les dommages les plus importants sont habituellement associés au second type d'événements sismiques (c'est-à-dire au rejet de faille).

2.2.4 Surveillance de la sismicité induite par l'exploitation minière

Comme la sismicité induite par l'exploitation minière se produit dans une grande échelle de magnitudes, on a recours à différents systèmes d'enregistrement dont la sensibilité est propre à certains intervalles de magnitude ou à certaines gammes de fréquences (figure 2.3).

Figure 2.3 Trois bandes de magnitude/fréquence pour la détection des trains d'ondes complets dans l'étude de la sismicité induite par l'activité minière au Canada



On utilise généralement des *systèmes sismographiques* pour détecter les événements sismiques dont la magnitude est supérieure à 2,5. Ces systèmes sont utilisés pour la recherche sismologique sur les tremblements de terre et pour les secousses importantes induites par l'exploitation minière.

Les *systèmes macrosismiques* enregistrent dans une échelle de magnitude allant de 0 à 3, intervalle dans lequel les coups de toit dommageables les plus courants ont été observés.

Les *systèmes microsismiques* enregistrent dans une échelle de magnitude allant de - 4 à 0.

Il existe d'autres types de systèmes dont le fonctionnement est restreint aux échelles mentionnées ou dont l'intervalle est légèrement inférieur à ces derniers. Par exemple, les *systèmes haute fréquence portatifs* (échelle de magnitude allant de -6 à -3) permettent l'enregistrement des émissions acoustiques provenant des zones d'extraction minière. Dans la plupart des cas, un certain nombre de capteurs sont installés autour ou à l'intérieur des zones d'intérêt dans le but d'enregistrer les signaux sismiques représentatifs des mouvements du sol. Ces signaux informent sur la source des ondes ainsi que sur la trajectoire qu'elles suivent, y compris les conditions locales du site où se trouve le capteur. Pour cette raison, il est d'une importance capitale de tenir compte de tous ces facteurs pendant le traitement des signaux sismiques.

2.2.5 Coups de toit

Les coups de toit sont des événements sismiques particuliers induits par l'activité minière. Ils engendrent généralement des dommages et une perte de production pour la mine. La définition d'un coup de toit, selon Hedley (1992) est la suivante : «événement sismique qui cause des dommages aux installations ou des blessures aux personnes, ou encore le déplacement de plus de cinq tonnes de roche» dans une mine. Il convient de noter que la définition n'établit pas de relation directe entre les coups de toit et une échelle particulière de magnitude sismique. En réalité, les événements sismiques de grande envergure ne génèrent pas nécessairement de coups de toit et il arrive souvent que de petits événements sismiques provoquent des dommages considérables (Gibowicz, 1990).

2.3 Ondes de volume (ondes P et S)

Deux types d'ondes de volume se propagent dans les solides : l'un correspond à la composante de dilatation du mouvement et l'autre à la composante de rotation du mouvement selon la théorie de l'équation d'onde. Le premier type d'onde est connu sous différentes appellations, notamment onde de dilatation, onde de compression, onde longitudinale, onde de distension et, le plus souvent, onde P (primaire). Cette dernière appellation vient du fait qu'à la suite d'un tremblement de terre, ce type d'onde est généralement le premier à être enregistré. Le second type est également connu sous différents noms tels onde de cisaillement, onde transversale, onde de rotation, ou simplement onde S (secondaire).

2.3.1 Vitesses

Les vitesses des ondes P et S dans un massif rocheux isotrope, homogène et élastique sont les suivantes :

$$Cp = ((\lambda + 2\,\mu) / \rho)^{0,5} \quad (1)$$

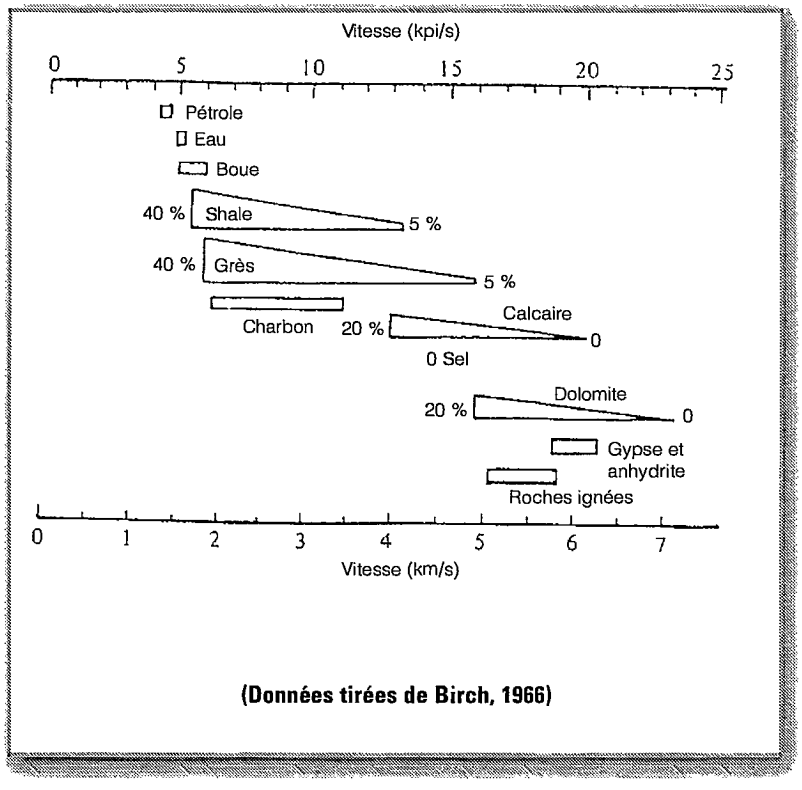
$$Cs = (\mu / \rho)^{0,5} \quad (2)$$

où
- Cp est la vitesse de l'onde P
- Cs est la vitesse de l'onde S
- λ est la constante de Lamé
- μ est le module de cisaillement de la roche
- ρ est la densité de la roche

Le rapport de la vitesse de l'onde S à la vitesse de l'onde P varie de zéro à environ 0,7. Comme les fluides n'offrent aucune résistance au cisaillement, μ est nul et, par conséquent, les ondes S ne se propagent pas dans les fluides. Toutefois, la plupart des roches ne peuvent pas être considérées comme des milieux homogènes. La figure 2.4 présente les vitesses obtenues pour différents types de roches, telles que présentées par Birch (1966). L'intervalle de valeurs obtenues pour le même type de roches s'explique par le fait que celles-ci sont constituées de minéraux dans lesquels se trouvent des vides. En réalité, ces vides sont le principal facteur qui contribue à la porosité de la roche, facteur déterminant de certaines propriétés de la roche, notamment les vitesses des ondes P et S. En outre, comme ces vides sont souvent remplis de fluides, les vitesses sismiques en sont encore plus affectées (Telford et al. 1990).

2.3.2 Atténuation

Figure 2.4 Vitesse de l'onde P dans différents types de roche



(Données tirées de Birch, 1966)

Différents types de mécanismes entraînent une diminution de l'amplitude des ondes sismiques lorsqu'elles se propagent dans les roches :

- L'*étalement géométrique* prend sa source dans l'expansion sphérique du front d'onde (on appelle également ce phénomène divergence sphérique). Lorsque les ondes se propagent, le front d'onde s'élargit et l'amplitude de l'onde diminue en fonction de la distance puisque l'énergie doit demeurer la même. Dans ce cas, la densité de l'énergie diminue de façon inversement proportionnelle au carré de la distance par rapport à la source.
- Une partie de l'énergie est perdue par *dispersion*. En réalité, les massifs rocheux sont souvent associés à la présence de discontinuités de taille différente. La réflexion des ondes de volume sur ces discontinuités leur fait perdre une partie de leur énergie.

- *Absorption* ou *atténuation :* Une partie de l'énergie des ondes de volume est absorbée par le milieu et transformée en chaleur. Ce phénomène est responsable de la distorsion des ondes et parfois de leur disparition complète.

L'atténuation est un aspect fondamental de la propagation des ondes de volume dans les roches. Elle consiste en la filtration sélective des fréquences de l'onde de volume. Ce phénomène s'explique par la nature non élastique des matériaux qui impose des pertes d'énergie aux ondes sismiques lorsqu'elles se propagent. Le mécanisme par lequel survient une perte d'énergie dépend de plusieurs facteurs, notamment de la friction interne le long des diaclases et des discontinuités, de la viscosité et de l'écoulement des fluides présents dans les pores et les fractures. Le mécanisme réel par lequel ce phénomène se produit n'est pas encore tout à fait clair et, dans certains cas, il pourrait s'agir d'une combinaison des facteurs précités. Toutefois, on estime que la friction interne et la perte d'énergie subies lors de la création de nouvelles fractures en sont les causes principales.

Il est très difficile de mesurer directement l'atténuation et les résultats obtenus en laboratoire ne s'appliquent pas facilement *in situ.* Il est possible de prendre des mesures sur le terrain pour autant que les ondes sismiques se propagent dans une masse rocheuse homogène et que les corrections appropriées sont apportées pour tenir compte de la réflexion et de la réfraction des ondes. La perte d'énergie varie de façon exponentielle en fonction de la distance et est souvent décrite comme suit :

$$A_1 = A_2 \exp(-\alpha x) \qquad (3)$$

où A_1 et A_2 sont des amplitudes d'ondes en deux points à une distance x l'une de l'autre et où α est le paramètre d'atténuation. Le facteur Q (de qualité) est souvent employé pour décrire l'atténuation de l'onde. La relation entre le facteur de qualité et le paramètre d'atténuation est la suivante :

$$Q = \pi f/\alpha C \qquad (4)$$

où f est la fréquence de l'onde. De nombreuses expériences ont démontré que le paramètre d'atténuation est proportionnel à la fréquence et que le facteur de qualité dépend de la fréquence. La plupart des observations indiquent que les facteurs de qualité se rapportant aux éboulis se situent généralement dans l'intervalle de 20 à 150. Des valeurs beaucoup plus élevées ont été obtenues à de grandes profondeurs pour les roches compétentes.

2.3.3 Polarisation

La propagation des ondes P et S dans un milieu homogène isotrope peut suivre deux modes différents. Si l'on considère le mouvement des particules au sommet d'un front d'onde en expansion, on observe dans le cas des ondes P que les particules se déplacent selon un mouvement de va-et-vient dans une direction parallèle à la direction de propagation de l'onde (figure 2.5). Cette propriété fondamentale sert parfois à obtenir de l'information concernant le milieu ou l'orientation des capteurs. Cependant, dans le cas des ondes S, le mouvement des particules se situe dans un plan perpendiculaire à la direction de la propagation de l'onde.

Dans un milieu anisotrope ou en présence de couches à l'intérieur d'un milieu, on observe un découplage de l'onde S en deux composantes orthogonales se propageant à des vitesses différentes. Ce phénomène porte le nom de dédoublement de l'onde de cisaillement ou biréfringence. Dans les solides isotropes, ces deux composantes des ondes S possèdent exactement les mêmes propriétés et se propagent à la même vitesse; on ne peut donc les distinguer l'une de l'autre. Les ondes sismiques sont souvent constituées d'ondes SH et SV. La composante SH est horizontale alors que la composante SV se trouve dans un plan vertical et est perpendiculaire au rayon sismique.

2.4 Localisation de la source

Bien que le chapitre 5 examine de façon approfondie la théorie de la localisation des événements sismiques et la méthodologie courante employée dans l'industrie, nous en donnerons ici une brève description.

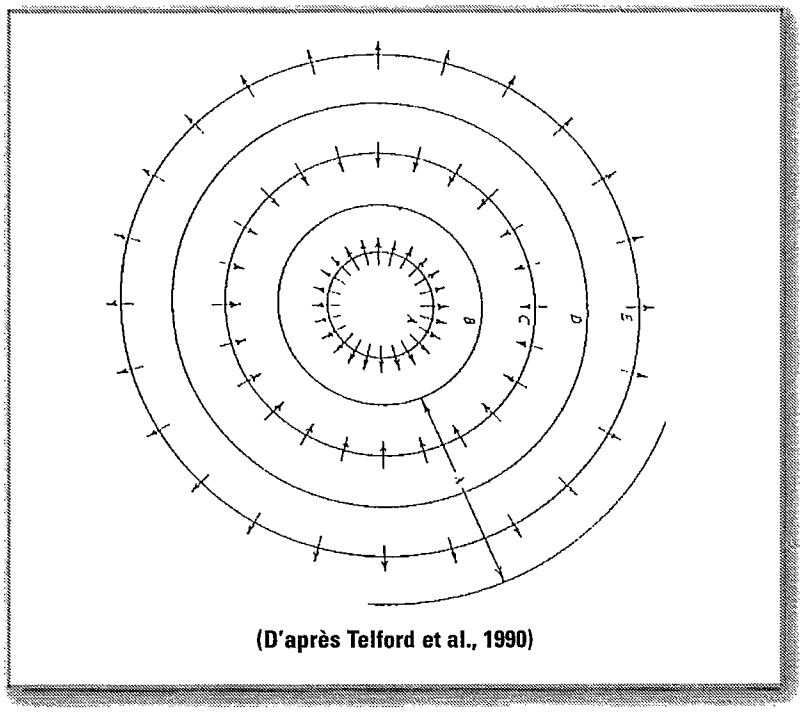


Figure 2.5 Mouvement des particules provoqué par une onde P sphérique. Les cercles représentent les fronts d'onde en expansion et les flèches indiquent la direction du déplacement des ondes P à mesure qu'elles se propagent depuis la source. La longueur d'onde est représentée par le symbole λ.

(D'après Telford et al., 1990)

2.4.1 Source

L'information la plus importante concernant un événement sismique est l'emplacement où il se produit. Le *foyer,* ou *hypocentre,* est le point duquel émanent les ondes sismiques. Plus particulièrement, l'hypocentre correspond au point géométrique où prend naissance la rupture et à partir duquel les premières ondes P sont générées. La projection de ce point à la surface de la Terre est l'*épicentre.* En raison de l'étendue de la surface de rupture associée à un événement sismique, on ne peut pas toujours supposer que la source soit un point géométrique et souvent, le terme *source* ou *foyer* devrait plutôt être utilisé. Il est important de noter ici que l'expression *localisation de la source,* telle que précisée et employée dans certaines études pour définir la zone où la rupture survient, est en fait l'équivalent de l'hypocentre, c'est-à-dire l'amorce du point de rupture. C'est seulement dans les cas où la source peut être considérée comme étant un point, c'est-à-dire lorsque les dimensions de la zone de rupture sont très petites par rapport à la distance au point d'observation que la localisation de la source correspond exactement à la zone générale où survient la rupture.

2.4.2 Techniques de localisation de la source

Ces techniques visent à déterminer l'emplacement de l'hypocentre d'un événement sismique. Les paramètres employés habituellement pour atteindre cet objectif sont, par ordre de fréquence d'emploi, le temps d'arrivée de l'onde P, le temps d'arrivée de l'onde S et les propriétés de polarisation des ondes P et S. La procédure à suivre comprend souvent la détermination de quatre paramètres : les coordonnées de la source (x, y et z) et son temps d'origine (t). Le temps qui s'écoule lors de la propagation des ondes de volume dans le massif rocheux entre la source et le capteur est lié d'une manière non linéaire à ces quatre paramètres; pour cette raison, on obtient un système non linéaire d'équations qui doivent être résolues. Les techniques de localisation de la source se divisent en deux types différents du point de vue de la procédure de calcul. Les *méthodes directes* consistent à linéariser le système d'équation non linéaire puis à résoudre ce système en une seule étape dans le but d'obtenir les valeurs de x, y, z et t. La méthode du USBM est basée sur cette démarche. Par ailleurs, dans le cas des *méthodes itératives,* on a recours à une démarche itérative pour trouver la solution finale à un système d'équations quasi-linéaire ou linéaire. Habituellement, une solution commune est utilisée pour commencer la procédure et cette solution commune est améliorée en suivant un schéma, jusqu'à ce que ce dernier satisfasse à une condition préétablie. La méthode de Geiger et la méthode Simplex sont des exemples de méthodes itératives (Ge, 1988).

La recherche entreprise sur les méthodes itératives de localisation de la source consiste à comparer les temps d'arrivée d'une nouvelle solution aux temps observés pour le train d'ondes provenant de la source. Ces méthodes visent à mieux localiser la source en réduisant au minimum une certaine quantité qui représente la différence entre les temps d'arrivée observés et calculés. La source correspond au point où cette quantité est la plus petite. L'*analyse des erreurs spatiales,* souvent combinée à la méthode Simplex consiste à calculer la valeur de la fonction d'erreur pour une grille spécifique dans l'espace. La méthode consiste à attribuer la valeur de l'erreur à chaque point de l'espace, c'est-à-dire à réaliser une distribution de l'erreur spatiale. La fonction d'erreur est habituellement de la norme L1 (estimateur de la déviation absolue) ou de la norme L2 (estimateur par les moindres carrés). Cette méthode présente l'avantage de visualiser les régions locales où la fonction d'erreur est minimale et, par conséquent, où elle peut être utilisée comme localisation fiable de la source. Toutefois, elle est quelque peu laborieuse.

2.4.3 Méthode du USBM

Cette méthode a été élaborée au début des années 70 et est couramment utilisée depuis dans les applications minières en Amérique du Nord. Il s'agit d'une méthode directe qui a l'avantage d'être simple et explicite. En outre, elle fait intervenir la technique des moindres carrés et est plus efficace que toute autre méthode directe. Elle doit utiliser les données d'au moins cinq capteurs pour définir la localisation de la source.

2.4.4 Méthode de Geiger

Cette méthode a été élaborée au début du XXe siècle et est aujourd'hui la méthode de choix utilisée par les sismologues pour la localisation des tremblements de terre. Elle est aussi largement utilisée dans le domaine minier. La méthode de Geiger est une méthode très sophistiquée et efficace de localisation de la source. Elle donne des résultats précis lorsque l'algorithme converge de manière satisfaisante. Le processus itératif de cette méthode consiste à calculer un vecteur d'ajustement (Δx, Δy, Δz, Δt) par les moindres carrés et à l'ajouter à la solution obtenue lors de la première itération. La source est localisée lorsqu'une condition préétablie satisfait à la valeur d'inadaptation.

2.4.5 Méthode Simplex

Cette méthode, connue depuis plus de vingt ans, est un outil mathématique visant à optimiser la solution de systèmes surdéterminés. Elle a été modifiée par Gendzwill et Prugger (1985) au cours des dernières années pour localiser les sources. Bien que cette méthode soit itérative, elle est complètement différente de celle de Geiger. Le processus de recherche consiste à trouver le point de l'erreur minimale dans un espace d'erreur. Il suffit d'établir une figure géométrique initiale Simplex (c'est-à-dire une figure géométrique qui comporte un sommet de plus que les dimensions de l'espace à étudier), de calculer les erreurs pour tous les sommets et de déterminer un nouveau sommet en déplaçant le sommet qui comporte l'erreur la plus grande à une position qui comporte une erreur moins grande. Comme le processus est répétitif, le Simplex se déplace dans l'espace en prenant de l'expansion, en se contractant, en diminuant et en se tournant vers le point d'erreur minimal, c'est-à-dire vers la source (Ge, 1988).

2.5 Mécanisme de la source

La détermination du processus de rupture à l'origine d'un événement sismique est un aspect fondamental de la recherche sur les tremblements de terre et sur la sismologie induite par l'exploitation minière. Nous savons depuis longtemps que la friction entre les plans de faille est souvent instable, que des mouvements soudains de glissement le long de failles peuvent générer des ondes sismiques et que la plupart des tremblements de terre observés sont attribuables au mécanisme de glissement. Toutefois, ce mécanisme n'est pas le seul possible à l'origine d'événements sismiques. Il faut connaître avec précision le processus de fracturation à la source pour définir une stratégie d'évaluation adéquate du risque sismique et les exigences relatives au soutènement du massif rocheux.

2.5.1 Tenseur du moment sismique

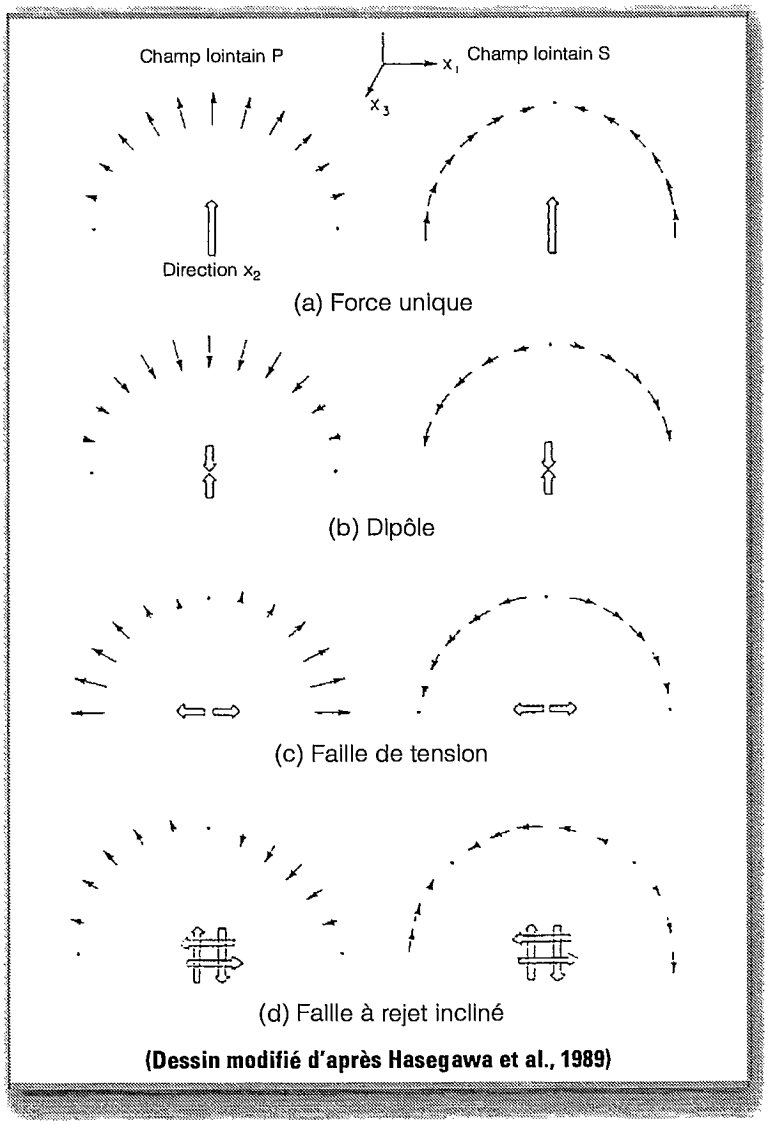
On peut tenter d'évaluer l'importance relative des différentes composantes de la rupture à l'origine d'un événement sismique à l'aide de la *technique d'inversion du tenseur du moment.* De telles inversions peuvent être tentées si deux conditions de base sont respectées, soit : la source est un point (seules des longueurs d'onde plus grandes que la dimension de la source sont utilisées) et les effets de la propagation des ondes dans le milieu sont adéquatement modélisés.

Le tenseur du moment, un tenseur symétrique du deuxième ordre, comporte six composantes indépendantes qui contiennent toute l'information relative à un mécanisme de la source ponctuelle. De façon générale, le rayonnement sismique émanant d'une source peut être calculé à l'aide d'une convolution spatio-temporelle de la *fonction de rejet* avec la *fonction de Green.* La fonction de rejet décrit le déplacement d'une faille pendant la rupture en fonction du temps et de la position du plan de faille, alors que la fonction de Green représente la réponse du massif au glissement. Par conséquent, la fonction de rejet et la fonction de Green expriment quantitativement les effets de la source et de la propagation sur le mouvement sismique respectivement. À ce jour, ces notions ont été plus ou moins considérées dans l'étude de la sismicité induite par l'exploitation minière.

2.5.2 Coefficient de rayonnement

Le coefficient de rayonnement des ondes générées par un événement sismique est l'une des propriétés les plus courantes dans l'étude du mécanisme de la source de l'onde sismique. À l'exception de quelques études qui portent principalement sur les ondes sismiques enregistrées en *champ proche,* c'est-à-dire à des distances de la source plus petites que les longueurs d'onde réelles, le coefficient de rayonnement et d'autres propriétés de la source ont été généralement étudiés en *champ lointain.* Cette notion suppose que le point d'observation se trouve à plusieurs longueurs d'onde de la source, de sorte que la contribution des termes du mouvement en champ proche peut être négligée en toute confiance. La figure 2.6 présente les patrons de rayonnement pour quatre types de mécanismes de sources sismiques. Il est utile de décrire le lien entre ces coefficients fondamentaux de rayonnement et les différents types d'événements induits par l'exploitation minière (figure 2.2). Par exemple, la figure 2.6(a) illustre le coefficient de rayonnement pour une force unique correspondant à l'effondrement de la figure 2.2(a), alors que la figure 2.6(b) indique la même chose mais pour un dipôle qui caractérise un coup de pilier indiqué à la figure 2.2(b). La figure 2.6(c) correspond à une faille en tension, comme celle indiquée à la figure 2.2(c) alors que la figure 2.6(d) correspond à différents types de failles indiqués aux figures

Figure 2.6 Patron de rayonnement normalisé des ondes P et S en champ lointain (flèches continues) pour quatre types de sources ponctuelles, illustrées à la figure 2.2.
Les flèches dont la queue est ouverte représentent le système de force ponctuelle à la source (voir le texte pour plus de détails).



(Dessin modifié d'après Hasegawa et al., 1989)

Figure 2.7 Patron de rayonnement des ondes P et S pour une source à double couple.
Les flèches à la surface des sphères indiquent la direction de la polarisation.

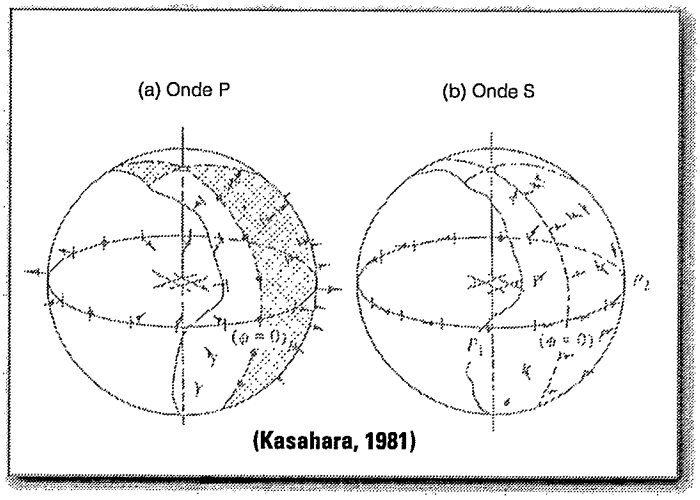
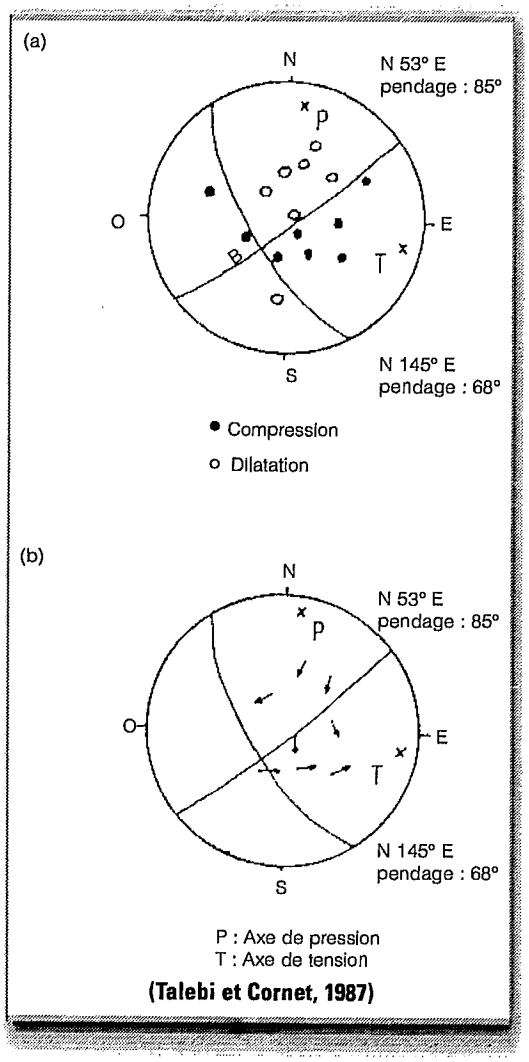


Figure 2.8 Mécanismes au foyer pour un événement de cisaillement induit par l'injection de fluides : (a) première arrivée de l'onde P; (b) polarisation de l'onde S.



2.2(d), 2.2(e) et 2.2(f). Les propriétés fondamentales employées pour de tels modèles sont l'amplitude et la direction de la polarisation des composantes des ondes P et S à différents points autour de la source. Il s'ensuit que la différence entre les coefficients de rayonnement émanant de différents types de mécanismes de source permet d'établir une distinction entre les différentes sources si l'on dispose de mesures d'amplitude des ondes P et S.

La polarité de l'impulsion initiale de l'onde P est un paramètre connu et facile à utiliser : si elle se dirige vers l'hypocentre ou dans la direction opposée, elle indique un premier mouvement de dilatation ou de compression, selon la calibration du capteur.

Des études portant sur les événements induits par l'exploitation minière que l'on a observés autour des ouvertures de mines indiquent que la plupart de ces événements sont causés par une rupture en cisaillement le long de plans de faille ou de zones de faiblesse préexistantes dans le massif rocheux (Spottiswoode et McGarr, 1975; McGarr et al., 1979). Ces études indiquent également qu'il ne semble y avoir aucune différence fondamentale entre les tremblements de terre naturels et les événements induits par l'exploitation minière. Le modèle de base pour un tel mécanisme pourrait être évalué par un *double-couple,* comme c'est le cas pour les tremblements de terre. Cette conclusion a mené à une grande utilisation des techniques de recherche sur les tremblements de terre dans l'étude des événements induits par l'exploitation minière. Deux de ces techniques pertinentes sont la solution du plan de faille ou la détermination du mécanisme au foyer et l'analyse spectrale. La première technique est habituellement basée sur l'utilisation du coefficient de rayonnement des ondes P alors que la deuxième utilise les propriétés des signaux sismiques rayonnés dans le domaine fréquentiel.

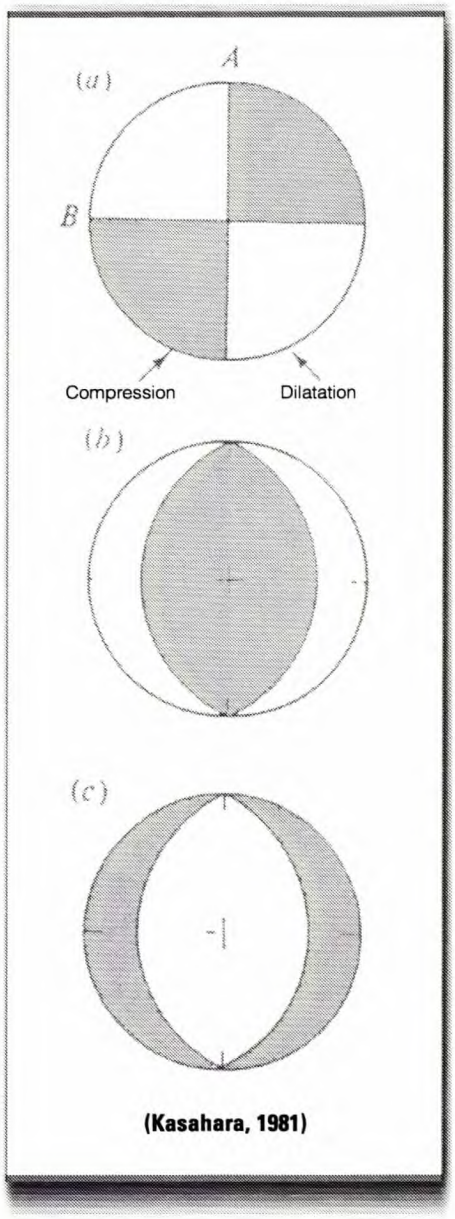
2.5.3 Mécanisme au foyer

Nous savons depuis longtemps que le coefficient de rayonnement pour un événement en cisaillement s'approche d'un double-couple et est très caractéristique (figure 2.7). L'espace qui entoure la source est divisé en quatre quadrants, deux de compression et deux de dilatation, selon le sens du mouvement initial des ondes P émises par la source. La détermination du mécanisme au foyer ou du mouvement le long d'une faille peut être utilisée si un nombre suffisant de capteurs se trouvent autour de la source afin de tracer la courbe du mouvement initial des ondes P dans un diagramme stéréographique de Wulff et de déterminer les deux plans nodaux qui séparent les quadrants de compression et de dilatation. Les amplitudes des ondes P et S et les directions de la polarisation de l'onde S ont également été utilisées par certains auteurs pour déterminer le mécanisme au foyer. L'un des deux plans nodaux correspond au plan réel de cassure et l'autre s'appelle plan auxiliaire. Un exemple de ces

déterminations est indiqué à la figure 2.8. Trois axes sont définis à partir d'un mécanisme au foyer : l'axe des pressions (P) et l'axe des tensions (axe T) qui correspondent respectivement aux axes des contraintes principales maximales et minimales, et l'axe B (ou de mouvement nul) qui correspond à l'intersection des deux plans nodaux (figure 2.8(a)). Les directions de la polarisation des ondes S divergent de l'axe P, convergent vers l'axe T et sont perpendiculaires aux plans nodaux (figure 2.8(b)).

Les déterminations des mécanismes au foyer sont particulièrement riches en information puisque les trois axes (P, T et B) peuvent contribuer à l'évaluation des orientations des contraintes principales *in situ,* ce qui veut dire que les solutions du mouvement le long d'une faille sont des outils puissants pour l'évaluation des conditions locales. Toutefois, cette technique comporte certaines limites. D'abord, les données sont généralement contaminées par des bruits qui causent une certaine imprécision dans les résultats. En outre, deux plans de faille possibles sont définis mais le vrai plan de faille ne peut être défini spécifiquement sans utiliser d'autres outils ou en faisant d'autres observations. Cependant, de façon générale, les solutions du mouvement le long d'une faille sont des outils valables pour déterminer à distance le régime des contraintes dans une certaine zone du massif rocheux. La figure 2.9 indique trois types fondamentaux de mécanismes au foyer qui correspondent à trois régimes de contraintes différents.

Figure 2.9 Types élémentaires de mécanisme au foyer : (a) faille décrochante; (b) rejet de faille inverse; (c) rejet de faille normale.



(Kasahara, 1981)

2.5.4 Modélisation de la source

En sismologie, on utilise couramment deux types de modèles de rupture en cisaillement pour décrire les événements sismiques. Ce sont les modèles cinématiques et les modèles quasi-dynamiques. Dans le premier cas, une dislocation survient le long d'une diaclase planaire et la fonction temps-source est définie arbitrairement alors que, dans le second cas, une fissure se propage et le modèle tente de tenir compte du processus de rupture à la source. Deux modèles sont utilisés actuellement, soit le modèle cinématique de Brune (1970, 1971) et le modèle quasi-dynamique de Madariaga (1976); les deux modèles supposent une zone de rupture circulaire. Bien que des démarches différentes soient suivies, les propriétés résultantes du rayonnement en champ lointain pour ces deux modèles sont semblables, la principale différence étant, dans le premier cas, que les propriétés résultantes de la source dépendent de l'azimut de l'observation, tandis que dans le deuxième, les résultats sont indépendants de l'azimut.

2.5.5 Modèles homogènes et hétérogènes

Les modèles présentés dans la partie précédente sont parfois appelés modèles homogènes étant donné qu'ils supposent un relâchement homogène des contraintes dans la zone de la source où la rupture s'est réalisée. Toutefois, on vise de plus en plus à utiliser des modèles hétérogènes et à assurer un relâchement hétérogène des contraintes à la source pour décrire un événement sismique plus complexe. Les expériences en laboratoire sur la friction des roches ont montré que lorsque deux roches entrent en contact, la zone réelle de contact peut n'être qu'une petite fraction des surfaces totales. Dans la théorie des tremblements de terre, on appelle ces zones de contact des aspérités, où la majeure partie de l'énergie sismique et des contraintes des tremblements de terre sont produites. En termes simples, de l'énergie sismique rayonne de ces aspérités sur la surface de la faille, lesquelles offrent une grande résistance aux

mouvements de cisaillement. Un certain nombre d'auteurs (McGarr, 1981) ont adopté cette notion dans leurs études des sources sismiques. Une notion semblable a été employée par Aki (1979), qui s'est servi de la notion de barrières pour définir les zones de résistance au front de rupture qui ne se sont pas brisées pendant le processus de rupture. Dans le modèle des aspérités, les concentrations de contraintes sont déjà présentes avant la rupture et lorsque les aspérités se brisent, la contrainte exercée sur la faille a tendance à s'uniformiser à la fin du processus de rupture. Dans le modèle à barrières, la contrainte le long de la faille est uniforme avant la rupture, mais devient irrégulière après la rupture à cause de la présence des barrières (Gibowicz, 1990).

L'analyse des modèles hétérogènes convient davantage à l'étude des grands mouvements du massif en champ proche. En effet, l'activité maximale du mouvement est associée à la déformation sur une fraction de la zone de faille seulement, soit la zone d'aspérités. Les évaluations des paramètres des grands mouvements en champ proche permettent d'évaluer l'importance ainsi que d'autres caractéristiques du processus relatif à la source en décrivant les aspérités sur toute la zone de la source. Bien que la plupart des études dans ce domaine indiquent qu'un modèle de rupture en cisaillement homogène convient habituellement pour décrire des événements simples, plusieurs auteurs ont fait état d'événements complexes et, dans ces cas, l'utilisation d'un modèle simple pour les décrire est assez discutable. Par ailleurs, nous savons que certaines répliques se produisent hors des plans de faille principaux pendant les tremblements de terre et donnent lieu à des événements complexes. Pour cette raison, au moins une partie de la complexité du rayonnement sismique ne peut être attribuée à l'événement principal tel que supposé dans les modèles hétérogènes (Scholz, 1990).

2.6 Paramètres de la source

Les paramètres qui caractérisent la source d'événements sismiques induits par l'exploitation minière sont souvent appelés paramètres de la source. Ces paramètres sont essentiellement calculés dans les domaines temporel et fréquentiel, et mesurent trois propriétés (figure 2.10) : l'ampleur de l'événement (moment sismique, magnitude et énergie sismique), les dimensions de la source (rayon de la source et aspérités) et les estimations du relâchement des contraintes (chute de contrainte statique, dynamique ou quadratique moyenne, contrainte apparente). Ces paramètres sont utilisés couramment par les sismologues dans le domaine de la sismicité induite pour analyser les événements sismiques. Les paramètres les plus courants sont la magnitude et le moment sismique, qui mesurent l'intensité d'un événement.

La plupart des modèles sismiques, cinématiques ou quasi-dynamiques prévoient une tendance continue des spectres de déplacement en champ lointain pour les basses fréquences et une tendance décroissante pour les hautes fréquences qui sont inversement proportionnelles à certaines gammes de fréquences (Brune, 1970; Madariaga, 1976). Trois paramètres sont utilisés régulièrement pour décrire les spectres de déplacement en

Figure 2.10 Trois types de paramètres sismiques de la source

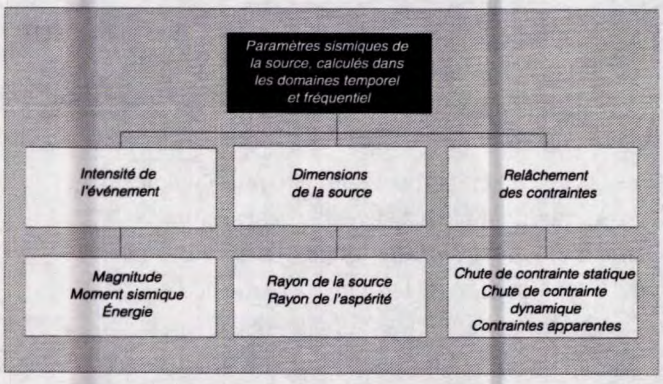
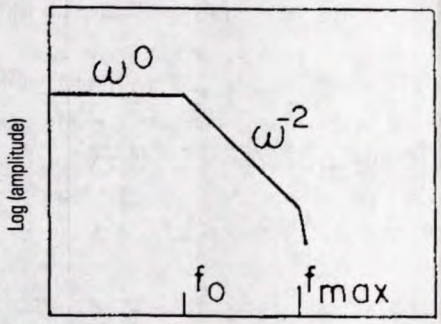


Figure 2.11 Représentation schématique des spectres de déplacement des ondes P et S en champ lointain



champ lointain : le niveau des basses fréquences, la pente de la décroissance des hautes fréquences et la fréquence-coin qui est définie comme la fréquence se trouvant à l'intersection des tendances basses et hautes fréquences (figure 2.11). Aux basses fréquences, la portion plane des spectres est contrôlée par le moment sismique et la source peut être considérée comme un point. Une diminution de l'amplitude est observée près de la fréquence-coin. Cette région est dominée par les fréquences dont la longueur d'onde est liée à la durée de la rupture. Lorsque la vitesse de rupture est constante, la fréquence-coin est inversement proportionnelle aux dimensions de la faille. Enfin, une tendance décroissante des hautes fréquences est observée avec une pente de -2 ou moins. L'analyse spectrale est aujourd'hui pratique courante dans l'étude des petits événements. Plusieurs auteurs indiquent dans leurs études antérieures que cette technique peut être utilisée avec succès pour analyser les événements sismiques induits par l'exploitation minière (Spottiswoode et McGarr, 1975; Gibowicz et al., 1977).

2.6.1 Magnitude

La magnitude est le paramètre le plus courant pour décrire l'ampleur d'un événement. La magnitude est calculée à l'aide d'une échelle logarithmique basée sur l'amplitude maximale d'une onde sismique à une fréquence particulière, corrigée pour tenir compte de la distance source-capteur et de la réponse de l'instrument. Il existe plusieurs types d'échelles de magnitudes prévues pour différentes situations, par exemple :

- M_L : échelle de magnitude locale introduite par Richter et employée par la plupart des sismologues, particulièrement pour les événements sismiques de la partie ouest de l'Amérique du Nord;
- m_N : magnitude locale introduite par Nuttli pour les événements sismiques de la partie est de l'Amérique du Nord, à l'est des Rocheuses;
- M_S : échelle de magnitude basée sur les ondes de surface;
- M_A : échelle de magnitude basée sur l'accélération maximale;
- M_D : échelle de magnitude basée sur la durée du coda.

En effet, on doit prévoir des variations de la valeur de la magnitude pour le même événement à différentes stations en raison du fait que les coefficients de rayonnement et les propriétés de la trajectoire source-capteur sont différents. L'énergie sismique rayonnée lors d'événements de magnitude semblable peut différer considérablement. Dziewonski et Woodhouse (1983) décrivent la magnitude comme suit : «mesure invariablement inadéquate de l'ampleur d'un tremblement de terre». Même dans les meilleurs cas, il faut prévoir des erreurs de 0,2 à 0,3 unité dans une magnitude calculée (Bath, 1973). En outre, les échelles de magnitude ont tendance à se saturer lorsque l'intensité d'un événement est plus grande, étant donné que la plus grande portion de l'énergie rayonnée dans ce cas se situe à l'extérieur des fréquences mesurables par les systèmes d'enregistrement.

Au cours des dernières années, la magnitude du moment M a été plus souvent utilisée pour estimer l'intensité de la source puisque ce paramètre convient à un grand intervalle d'intensités. Ce paramètre a été simplement défini par Hanks et Kanamori (1979) comme :

$$M = 2/3 \log M_0 - 6{,}0 \qquad (5)$$

où M_0 est le moment sismique en Newton-mètres.

2.6.2 Moment sismique

Le moment sismique est une mesure qui convient davantage à l'importance d'un tremblement de terre qu'à sa magnitude. Ce paramètre comporte une interprétation physique distincte indépendamment du modèle de source particulier qui a été adopté. De façon générale, le système de forces équivalentes qui agit à la source

peut être décrit par un tenseur symétrique du second ordre accompagné de six composantes indépendantes et appelé tenseur du moment. Dans le cas d'une source à double-couple, seuls les termes s'éloignant de la diagonale du tenseur du moment sismique ne sont pas nuls et on utilise souvent un chiffre scalaire :

$$M_0 = \mu A u \qquad (6)$$

où
- μ est le module de cisaillement à la source
- A est l'aire de la source sismique
- u est le rejet moyen sur le plan de faille

Cette relation peut être utilisée pour calculer le moment sismique à partir des données sur le terrain, dans la mesure où le déplacement moyen le long du plan de cassure ou de faille peut être mesuré. Toutefois, dans la pratique, en raison de l'inaccessibilité de la source pour l'observation directe, le moment sismique est habituellement calculé à partir de la tendance basse fréquence des spectres de déplacement corrigés des ondes P ou S, comme suit :

$$M_0 = \frac{4 \pi \rho C^3 R |\Omega_0|}{F_C R_C} \qquad (7)$$

où
- ρ est la densité de la roche
- C est la vitesse des ondes P ou S
- R est la distance source-capteur
- $|\Omega_0|$ est le module du niveau plateau du spectre de déplacement
- F_C est le coefficient de rayonnement de l'onde P ou S
- R_C est l'effet de surface libre

Si les mécanismes au foyer de l'événement sont inconnus, des valeurs moyennes de 0,52 et 0,63 sont utilisées pour (F_C) dans le cas des ondes P et S respectivement (Boore et Boatwright, 1984). Pour les mines souterraines, l'effet de surface libre (R_C) peut être négligé sans problème pour les capteurs installés dans des trous de forage.

2.6.3 Dimensions de la source

L'estimation des dimensions de la source à partir des spectres sismiques exige la formulation de certaines hypothèses concernant le processus de rupture, ce qui le rend plus dépendant du modèle. Il est généralement admis que les dimensions de la surface de rupture sont inversement proportionnelles à la fréquence-coin. Par exemple, dans le modèle de Brune (1970), la fréquence-coin (f_0) est interprétée comme étant inversement proportionnelle à la durée de la rupture. Pour une source circulaire et une vitesse de rupture constante, le rayon de la source est calculé à partir des spectres de déplacement corrigés des ondes S, comme suit :

$$r_0 = 2{,}34\, C / 2 \pi f_0 \qquad (8)$$

Dans le modèle quasi-dynamique de Madariaga (1976), des corrections sont requises pour l'angle de la normale à la faille et pour l'angle de départ. Les rayons de la source calculés à partir de ce modèle sont environ la moitié de ceux calculés à partir du modèle de Brune (Gibowicz, 1990). Toutefois, le modèle de Brune continue à être couramment utilisé en raison de sa simplicité.

La détermination de la fréquence-coin (f_0) peut être effectuée de différentes façons. Une des approches possibles est celle de Snoke (1987) qui consiste à calculer deux paramètres indépendants directement à partir des spectres de déplacement corrigés des ondes S : (Ω_0), le niveau de la tendance constante de la contrainte basse fréquence et (J_C), le flux d'énergie qui est l'intégrale du carré de la vitesse des particules pour la fenêtre de l'onde S. Deux fréquences (f_1 et f_2) sont définies dans cette démarche comme étant les limites de la

largeur de la bande spectrale sur laquelle le calcul du flux d'énergie est effectué. La méthode suppose une amplitude spectrale constante du spectre de déplacement pour les fréquences inférieures à f_1 et une atténuation de f^{-2} pour les fréquences supérieures à f_2 (Gibowicz 1990). Les fréquences-coins peuvent être calculées à partir de la relation suivante :

$$f_0 = (J_c / 2\pi^3 \Omega_0^2)^{1/3} \quad (9)$$

2.6.4 Relâchement des contraintes

Il existe plusieurs façons de mesurer le relâchement des contraintes produit par un événement sismique (p. ex. chute de contrainte statique et chute de contrainte dynamique). Ces valeurs peuvent concorder dans certains cas mais ne sont pas nécessairement comparables étant donné qu'elles correspondent à différents modèles de relâchement des contraintes le long de la zone de rupture. En effet, les estimations du relâchement des contraintes comptent parmi les paramètres de la source les plus dépendants du modèle et doivent être considérées avec prudence. Toutefois, lorsqu'un paramètre particulier est estimé pour plusieurs événements, la différence relative des résultats peut être discutée (Scholz, 1990). L'estimation la plus utilisée du relâchement des contraintes est la chute de contrainte statique, définie comme étant la différence moyenne entre les niveaux de contrainte initial et final sur un plan de faille. Pour un relâchement complet des contraintes le long de la faille, la chute de contrainte peut être calculée comme suit, à partir des estimations du moment sismique (M_0 et du rayon de la source (r_0) conformément à Brune (1970, 1971) :

$$\Delta\sigma = 7 M_0 / 16 r_0^3 \quad (10)$$

Cette équation représente une réduction uniforme de la contrainte le long de la faille et est considérée comme une approximation de la chute de contrainte statique.

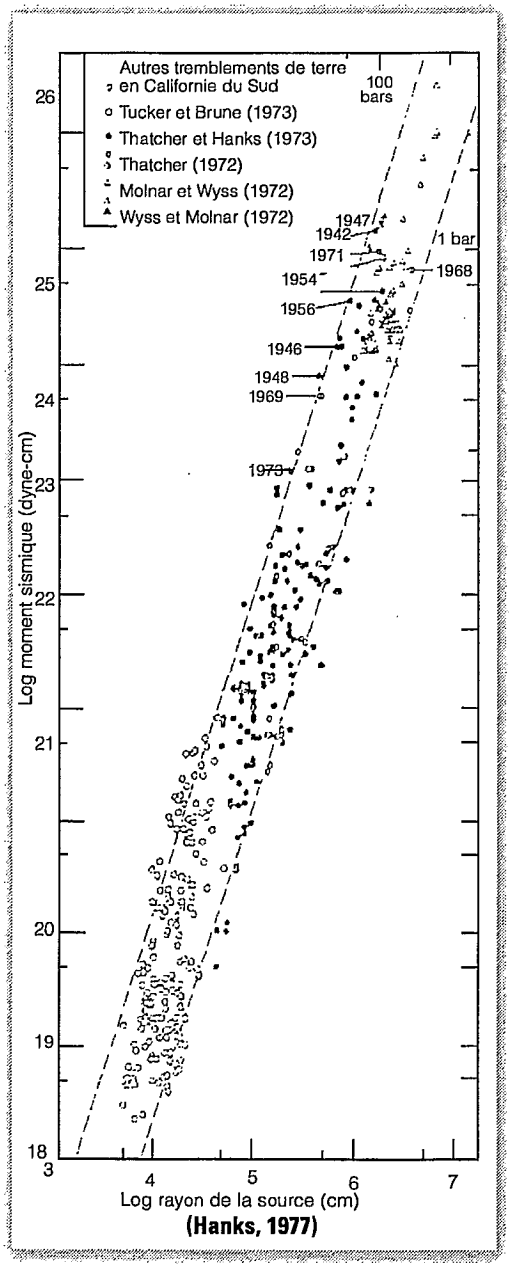
Deux estimations du relâchement des contraintes dynamiques peuvent être déduites d'après la vitesse et l'accélération du mouvement aux capteurs. La chute de contrainte dynamique (σ_d) est calculée d'après la pente initiale du signal de vitesse en champ lointain (Boatwright, 1980) ou l'accélération maximale des ondes S (McGarr, 1981). La seconde (σ_{rms}) est calculée à partir de la valeur quadratique moyenne de l'accélération pendant la durée de l'onde S (Hanks et McGuire, 1981), ce qui représente une moyenne du relâchement des contraintes dynamiques. Lorsque le processus de rupture est simple (c.-à-d. lorsque la vitesse de rupture est constante), les estimations précitées devraient concorder raisonnablement (Gibowicz, 1990); autrement, les résultats seront considérablement différents en raison de la complexité du processus de rupture. Les rapports des différentes estimations du relâchement des contraintes sont employés pour caractériser la complexité de la rupture associée aux événements sismiques.

2.6.5 Relations de proportionnalité

Les relations de proportionnalité des sources sismiques sont les relations entre les estimations des deux premiers types de paramètres de la source, c'est-à-dire les relations entre l'ampleur de la source et ses dimensions. Plus précisément, les relations de proportionnalité de la source décrivent de quelle manière la durée de la source ou ses dimensions augmentent en fonction de l'augmentation du moment sismique. L'importance de ce type d'analyse dans l'étude des événements induits par l'exploitation minière est que ces événements sont enregistrés pour un grand intervalle de fréquences et de magnitudes; le fait qu'ils aient ou non le même comportement dans tout cet intervalle de magnitudes a des conséquences importantes, du point de vue pratique, sur la manière dont ils peuvent être analysés.

Dans les études portant sur les paramètres de la source pour un grand nombre d'événements sismiques et une grande échelle de magnitudes, on observe que la chute de contrainte est sensiblement indépendante de la magnitude et varie principalement entre 0,1 et 10 MPa. On peut observer clairement que le moment

Figure 2.12 Moment sismique en fonction du rayon de la source pour de petits tremblements de terre



sismique dépend de r_0^3 (voir figure 2.12) (Hanks, 1977). Ce schéma a été confirmé par de nombreuses études sur les événements sismiques et volcaniques, les répliques sismiques, les secousses induites en Afrique du Sud, en Pologne, etc. (Gibowicz, 1990). Un modèle de chute de contrainte constante fait intervenir un processus de rupture auto-similaire indépendamment de l'ampleur des événements sismiques. Cela indique, en termes simples, que les tremblements de terre, les secousses induites par l'exploitation minière et les événements microsismiques sont générés de manière semblable, mais le long de failles de grandeurs différentes.

Contrairement à l'observation générale de similarité du processus de rupture pour une grande échelle de magnitudes, on constate de plus en plus une répartition de cette similarité pour les événements de peu d'ampleur, tels qu'observés par une chute de contrainte marquée lorsque le moment sismique diminue. Cet effet, observé à l'extrémité la plus basse du spectre, signifie que le moment sismique diminue beaucoup plus rapidement que r_0^3, ce qui laisse croire qu'il pourrait y avoir une limite inférieure aux dimensions des sources (Gibowicz et al., 1991; Hasegawa, 1983). Une telle observation peut s'expliquer par n'importe quel phénomène à la source, dans le milieu ou le système d'enregistrement, ce qui entraîne une réduction des hautes fréquences dans les signaux enregistrés. Les sismologues proposent deux explications différentes pour cette observation, étant donné que l'incidence du système d'enregistrement peut être négligée. Hanks (1982) estime qu'il s'agit d'un effet de propagation et qu'il y a une limite de fréquence maximale (f_{max}) que l'on peut détecter. Cela s'explique en raison des niveaux d'atténuation élevés dans le milieu près de la surface de la Terre, où les stations sismographiques employées pour la surveillance des tremblements de terre sont installées. Aki (1984), pour sa part, estime qu'il s'agit d'un effet réel de la source et qu'il y a une limite minimale de la dimension de la source (Scholz, 1990). Des résultats récents favorisent l'atténuation comme étant à l'origine de cet effet.

2.6.6 Effets de parcours

Les signaux sismiques renferment des renseignements utiles concernant la source et le milieu dans lequel les ondes se propagent. Dans certains cas, ces effets de parcours peuvent être négligés si la qualité du milieu est élevée. Cependant, des études récentes indiquent que les effets de parcours ne peuvent pas toujours être négligés, particulièrement lorsqu'il s'agit d'études microsismiques à hautes fréquences. Cette question revêt une plus grande importance en sismologie induite et

particulièrement dans le cas des signaux enregistrés à de courtes distances de la source car la mine est généralement située dans un milieu hétérogène en raison de la présence de zones de remblai, d'ouvertures, etc. qui ont une incidence sur la propagation des ondes sismiques.

Les spectres sismiques doivent donc être corrigés pour tenir compte de l'atténuation causée par la propagation des ondes le long du parcours entre les sources et les capteurs. De telles corrections sont de la plus haute importance pour un relevé adéquat des paramètres de la source de petits événements, même s'ils sont enregistrés à de courtes distances. Les effets de l'atténuation sur les signaux sismiques et microsismiques et la nécessité d'appliquer la correction qui convient ont été soulevés par plusieurs auteurs (Talebi et Cornet, 1987; Cranswick et Sembera, 1989; Spottiswoode, 1993). Pour corriger l'atténuation le long du parcours, les spectres doivent être multipliés par le terme exponentiel $\exp(\pi f R / C Q)$ où R est la distance source-capteur et C est la vitesse de l'onde de volume étudiée.

2.7 Géotomographie

La tomographie est une méthode visant à reconstruire certaines propriétés d'un objet le long d'une coupe transversale en mesurant, sur le périmètre de l'objet, l'énergie qui le traverse. Le cadre mathématique de la tomographie a été démontré au début du siècle et la méthode a été utilisée dans plusieurs disciplines pour de nombreuses applications. Par exemple, la tomographie aux rayons X est très populaire en médecine, notamment pour l'examen tomodensitométrique. Les géophysiciens utilisent cette méthode pour obtenir des informations utiles concernant la Terre et la technique porte généralement le nom de géotomographie.

L'application de la géotomographie à l'exploitation minière est fondée sur les ondes sismiques ou électromagnétiques. On construit des images ou des cartes illustrant les propriétés du massif rocheux en vue d'obtenir des renseignements qui facilitent l'exploitation minière, comme la délimitation des contacts lithologiques, la détection de fissures et de fluides, l'évaluation des niveaux de contrainte ou l'efficacité des opérations de dynamitage pour relâcher les contraintes, etc.

2.7.1 Imagerie tomographique

L'imagerie tomographique est effectuée selon deux principes différents. La *tomographie par transmission* utilise les propriétés des ondes qui traversent l'objet alors que la *tomographie par diffraction* utilise les propriétés des ondes qui sont dispersées par les discontinuités du milieu. Selon la situation étudiée, cette dernière méthode présente des avantages dans la détection des anomalies, mais ses applications sont quelque peu difficiles en raison de la nécessité de détecter les ondes dispersées. La tomographie par transmission, cependant, peut s'effectuer en utilisant les propriétés des premières ondes arrivées, ce qui est plus pratique, et la méthode comporte de nombreuses autres applications. La procédure consiste à placer un certain nombre de sources et de capteurs d'énergie sur le périmètre d'un objet. Comme les ondes se propagent dans l'objet en provenance de chaque source et en direction de chaque capteur, elles sont influencées par les propriétés du milieu. Chaque projection contient de l'information sur l'objet tout le long du parcours du rayon. Cette information est alors obtenue à partir des trains d'ondes et une image tomographique est produite à l'aide de techniques mathématiques. L'image fournit donc de l'information sur les propriétés physiques de la structure interne du milieu.

2.7.2 Techniques d'inversion

Les deux principales caractéristiques des ondes transmises sont le temps de propagation et l'amplitude de l'onde. La première dépend de la longueur du parcours et de la vitesse le long du parcours. Ces données sont utilisées pour produire une image de la distribution de la vitesse dans un objet. Comme la vitesse sismique dépend des propriétés élastiques du milieu et de la présence de discontinuités, il peut être utile d'imager ces

propriétés. Par exemple, un ensemble pertinent de données d'ondes P et S peut servir à imager les propriétés élastiques de l'objet, comme le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. L'amplitude, par ailleurs, dépend de la longueur du parcours et des propriétés d'atténuation du milieu; elle est beaucoup plus influencée par la présence de zones de discontinuités et peut être utilisée pour les imager. Toutefois, cette démarche s'avère souvent peu pratique en raison de la difficulté de mesurer adéquatement l'atténuation.

Le temps de propagation entre la source et le récepteur peut être décrit comme l'intégrale curviligne suivante :

$$t = \int s \, . \, dl \qquad (11)$$

où s est le ralentissement à chaque point du parcours (l'inverse de la vitesse) et dl est l'accroissement du parcours. La fonction s se rapproche habituellement d'un ensemble d'éléments discrets ou de pixels ayant chacun un ralentissement ou une vitesse uniforme. Pour un ensemble complet de données, les relations précitées sont alors transformées en un certain nombre de relations linéaires exprimées sous forme de matrice :

$$T = D \, . \, S \qquad (12)$$

où T est un vecteur contenant l'information relative au temps de propagation pour tous les trajets source-capteur et S est un vecteur contenant toute l'information relative au ralentissement du modèle. La matrice rectangulaire D représente une transformation linéaire du modèle de ralentissement par rapport aux données, c.-à-d. les longueurs de parcours dans les pixels. L'objectif de l'inversion consiste à trouver un modèle S à l'aide d'un ensemble de données T qui puisse satisfaire à l'équation indiquée précédemment. Cette procédure exige le calcul de la matrice D. Il s'agit d'un simple problème de géométrie dans les cas où l'on suppose que les rayons sismiques sont droits. Dans la pratique, l'existence de contrastes importants dans les vitesses donne lieu à une réfraction et une flexion des rayons et, pour cette raison, la géométrie des rayons doit être calculée pour tenir compte du modèle de vitesse de manière à atteindre l'objectif final.

Les techniques d'inversion outrepassent la portée du présent document, c'est pourquoi nous nous attarderons seulement aux principes de certaines techniques courantes.

Nous pouvons effectuer l'*inversion directe* de l'équation 12, mais cette démarche fait appel à un processus très long qui nécessite un grand nombre d'opérations matricielles.

La *rétroprojection* est une solution approximative du problème de l'inversion. Elle consiste à transposer la matrice D plutôt que de l'inverser; on obtient cette matrice en divisant chaque ligne de D par le carré de la longueur du parcours. Cette procédure ne donne pas de solutions très précises, mais les résultats peuvent être utilisés comme point de départ vers des techniques d'inversion plus sophistiquées.

Les techniques des *moindres carrés* visent à trouver une solution en réduisant au minimum la différence entre le temps de propagation mesuré et le temps de propagation calculé. En pratique, les *méthodes des moindres carrés amortis* donnent généralement de meilleurs résultats et sont plus faciles à appliquer. La *décomposition univoque* est une autre méthode employée pour calculer des matrices singulières.

Il existe d'autres techniques d'inversion directe, notamment : les *techniques de reconstruction algébrique (TRA)*. Il s'agit de techniques itératives basées sur la réduction de la résiduelle du temps de propagation le long de chaque rayon et dans lesquelles un modèle de vitesse est modifié jusqu'à ce qu'il y ait convergence vers une solution.

Les *techniques de reconstruction itérative simultanée (SIRT)* sont elles aussi itératives et employées pour l'inversion de données. Les techniques TRA et SIRT sont faciles à utiliser et les calculs qu'elles supposent sont moins laborieux que ceux des techniques d'inversion directe.

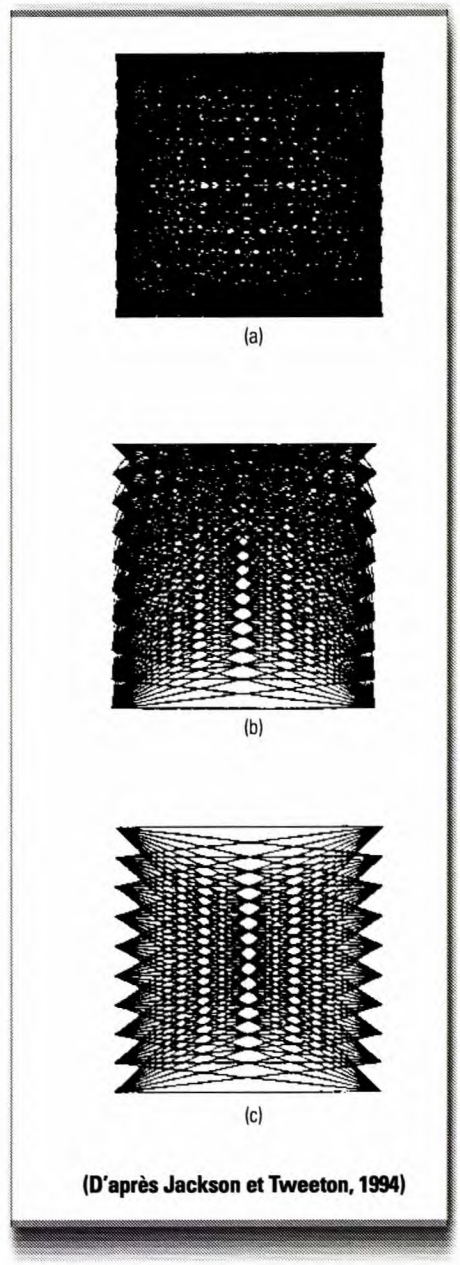
2.7.3 Dispositif expérimental et résolution

En imagerie tomographique, la résolution dépend principalement de la longueur d'onde utilisée. De façon générale, plus la longueur d'onde est courte, plus la caractéristique pouvant être imagée est petite; cependant, dans le cas des longueurs d'onde courtes, l'atténuation est plus forte que celle des longueurs d'onde plus longues et leur portée de propagation est limitée. Il faut donc faire un compromis entre le degré de résolution de la caractéristique étudiée et la portée de l'étude. La flexion des rayons limite également la résolution lorsque d'importants contrastes de vitesse sont observés. En outre, l'utilisation de données relatives au temps de propagation comme données d'entrée introduit dans la plupart des cas un biais dans le type d'anomalie qu'on peut détecter. En réalité, les anomalies haute vitesse ont une incidence sur le temps d'arrivée qui est beaucoup plus grande que celle des anomalies basse vitesse, ce qui rend les anomalies du premier type plus faciles à détecter que celles du second.

La configuration la plus pratique pour les expériences tomographiques est l'insertion de sources et de capteurs dans l'ensemble de la zone d'étude afin de s'assurer que l'échantillonnage de tout le massif rocheux étudié et soumis aux rayons sismiques est complet. Cette configuration est possible dans certains cas, par exemple dans le cas d'un pilier de mine. Une autre procédure plus courante consiste à insérer des sources et des capteurs dans un ou plusieurs trous et ouvertures. La géométrie du sondage transversal sismique est couramment utilisée pour éviter l'atténuation causée par la roche près de la surface ou par les ouvertures de mines. Dans n'importe quel cas, le pouvoir de résolution d'un dispositif expérimental peut être estimé par simulation numérique avant que l'expérience soit effectuée.

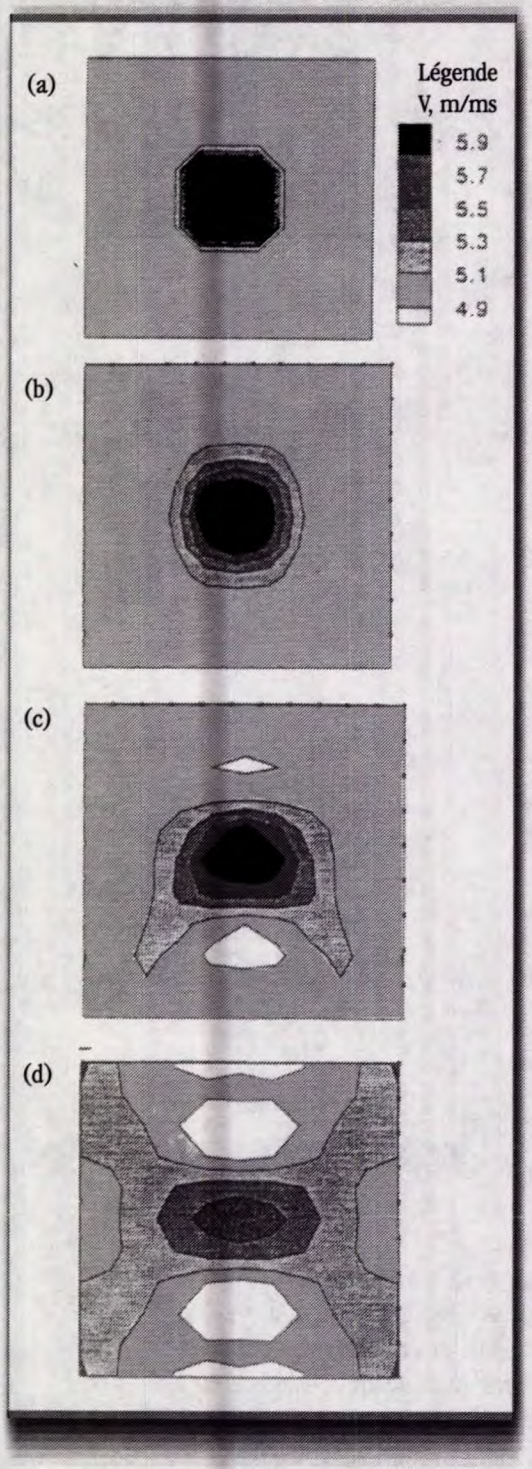
Jackson et Tweeton (1994) donnent un exemple d'une telle approche à la figure 2.13, qui indique la zone balayée par le parcours du rayon dans trois configurations expérimentales différentes où l'espacement entre les différentes stations est le même. Il est clair que la résolution des différentes zones de ces configurations n'est pas identique et qu'elle dépend principalement de la manière dont les parcours des rayons s'entrecroisent dans chaque zone. La figure 2.14(a) illustre un modèle d'essai pour lequel les temps de propagation peuvent être calculés et utilisés pour les trois configurations indiquées à la figure 2.13. Le pouvoir de résolution de chaque dispositif peut être estimé en inversant les données synthétiques obtenues pour chaque géométrie. Il est clair que plus la configuration est bonne, plus l'image produite et le modèle initial correspondent. Les figures 2.14(b), 2.14(c) et 2.14(d) montrent les images obtenues pour les trois configurations des figures 2.13(a), 2.13(b) et 2.13(c) respectivement. Une couverture complète donne une image précise de l'anomalie quant à sa position, ses dimensions, sa taille, sa forme et son ampleur (figure 2.14(b)). Lorsque trois côtés sont couverts (figure 2.14(c)), une image quelque peu altérée est obtenue, en ce sens que les dimensions, la forme et la magnitude de l'anomalie sont déformées. Lorsque seulement deux côtés de l'objet sont couverts (figure 2.14(d)), la déformation est encore plus grande. Ce problème n'est pas lié à la faible couverture des rayons mais plutôt aux angles de visée limités; une reconstruction faite à partir de la même géométrie mais ayant une densité de rayons augmentée d'un facteur 9 serait considérablement différente de celle de la figure 2.14(d) (Jackson et Tweeton, 1994). Les exemples précités indiquent l'importance cruciale d'une configuration adéquate des réseaux source-capteur pour les expériences de tomographie sismique.

Figure 2.13 Balayage associé à trois configurations expérimentales; (a) zone balayée sur les quatre côtés; (b) zone balayée sur trois côtés; (c) zone balayée sur deux côtés.



(D'après Jackson et Tweeton, 1994)

Figure 2.14 Test de résolution avec des données de synthèse : (a) modèle de vitesse; (b) reconstruction d'après la zone balayée sur quatre côtés, figure 2.13 (a) ; (c) reconstruction d'après la zone balayée sur trois côtés, figure 2.13 (b) ; (d) reconstruction d'après la zone balayée sur deux côtés, figure 2.13 (c).



2.8 Risque sismique

Dans la recherche en sismicité induite par l'exploitation minière, l'objectif socio-économique le plus important consiste à mettre en pratique les connaissances acquises sur la réduction des risques causés par les coups de toit. Au cours des dernières décennies, on a tenté à maintes reprises de prédire les tremblements de terre naturels, mais sans succès. Les notions et méthodes de prédiction des tremblements de terre sont pour le moment loin d'être fiables ou directement applicables pour prévoir la sismicité induite par l'exploitation minière. La différence fondamentale entre les tremblements de terre et la sismologie induite par l'exploitation minière est que les tremblements de terre sont causés par des processus naturels qui ne font pas intervenir directement l'activité humaine alors que les coups de toit et les événements sismiques induits sont causés par l'activité humaine.

Dans la présente section, nous verrons quelques concepts fondamentaux se rattachant à la prédiction des tremblements de terre. Ces méthodes, comme nous l'avons mentionné plus tôt, concernent les tremblements de terre qui surviennent naturellement et *ne sont pas* directement applicables au problème des coups de toit. La présente partie vise à donner au lecteur des connaissances de base relatives à ce domaine particulier de la recherche en sismologie.

2.8.1 Cycle sismique des tremblements de terre

L'analyse des données chronologiques portant sur l'activité sismique montre que les tremblements de terre surviennent de manière cyclique dans les failles ou dans des sections de celles-ci. La récurrence des tremblements de terre fait allusion au temps qui s'écoule entre des épisodes de rupture consécutifs dans une certaine région, c.-à-d. à la période du cycle qui précède les tremblements de terre. Des registres de données chronologiques relatifs à plusieurs régions sismiques de la Terre renforcent cette idée. Le cycle sismique est parfois divisé en quatre phases fondamentales d'activité : l'activité intersismique, présismique, cosismique et postsismique.

2.8.2 Prédiction des tremblements de terre

La prédiction des tremblements de terre consite habituellement à décrire l'endroit et le moment où se produira le tremblement de terre ainsi que son ampleur. La difficulté du processus réside dans la précision des renseignements obtenus. L'utilisation de ces renseignements est généralement peu pratique en raison de l'imprécision des paramètres prédits. La première étape de cette démarche est habituellement la *prédiction statistique.* Elle est fondée sur l'hypothèse que les tremblements de terre surviennent à une fréquence statistique qui ne change pas en fonction du temps. La deuxième étape est la *prédiction tectonique,* qui vise à obtenir de l'information sur la magnitude et la tectonique d'un tremblement de terre, mais où il n'est pas si important

d'obtenir une information temporelle précise. Toutefois, la *prédiction physique* vise à déterminer avec précision les trois facteurs (temps, endroit et ampleur) d'un tremblement de terre.

La prédiction se divise en trois grandes catégories : la prédiction à long terme, à moyen terme et à court terme. Dans la prédiction des tremblements de terre, le long terme correspond à un intervalle de temps se situant entre un certain nombre d'années et une décennie, le moyen terme à un intervalle se situant entre quelques semaines et quelques années, et le court terme à un intervalle se situant entre quelques heures et quelques semaines (Scholz, 1990). La prédiction à long terme tire profit de la répétition du cycle sismique des tremblements de terre et est fondée sur le calcul de la récurrence des tremblements de terre sur une faille et sur la détermination du moment approximatif du prochain tremblement de terre. Ce domaine de recherche progresse régulièrement depuis quelques décennies. Par ailleurs, les prédictions à moyen et à court terme sont fondées sur des phénomènes précurseurs de différents types. Les progrès réalisés dans ce domaine de recherche demeurent insatisfaisants.

2.8.3 Phénomènes précurseurs

Les phénomènes précurseurs se rapportent à des anomalies observées avant les tremblements de terre, mais ils n'indiquent pas nécessairement l'imminence d'un tremblement de terre. Scholz (1990) fait remarquer que l'observation de phénomènes précurseurs dans le passé est attribuable au hasard et qu'ils ont été identifiés après l'événement. De telles observations prêtent à interprétation et les modèles utiles se sont vu tantôt accorder, tantôt refuser la faveur de la communauté scientifique. L'existence des phénomènes précurseurs est évidente, mais il est difficile de désigner un précurseur unique qui puisse être accepté universellement. De la même façon, une recherche crédible ne peut être entreprise sans qu'on ait déterminé au préalable le champ d'étude qui utilise des méthodes à long terme.

Différents phénomènes précurseurs ont été rapportés et analysés. Ils sont associés à différents aspects ou propriétés de la source, par exemple :

- les déformations de terrain anormales, p. ex. celles enregistrées par les inclinomètres et les jauges extensométriques;
- les modèles de sismicité fondés sur les observations faites pendant des périodes sismiques, particulièrement les phénomènes précurseurs et d'autres propriétés comme le coefficient b;
- les changements de vitesse des ondes P et S et de leur rapport;
- les changements dans les propriétés hydrochimiques et géochimiques des eaux souterraines, du pétrole ou du gaz (p. ex. la pression, le débit, la couleur, le goût, l'odeur, la composition chimique);
- les changements dans la résistivité électrique ou le champ magnétique du sol.

L'indice le plus évident est le *phénomène précurseur,* ou activité sismique observée avant le tremblement de terre. Jones et Molnar (1979) rapportent que 60 à 70 % de tous les tremblements de terre de magnitude supérieure à 7 enregistrés depuis 1950 ont été précédés de secousses prémonitoires. Cette activité est facilement observable quelques jours avant l'événement principal et s'accélère jusqu'à ce que l'événement survienne. La principale difficulté du recours aux secousses prémonitoires est qu'il est difficile de les distinguer des autres tremblements de terre (Scholz, 1990).

2.8.4 Modélisation des phénomènes précurseurs

On distingue deux types de modèles : les premiers sont les modèles fondés sur les relations constitutives des failles qui prédisent le comportement de rupture en cisaillement mais pas les changements des propriétés de la roche qui entoure la zone de la faille; les seconds sont les modèles fondés sur les relations constitutives de la roche qui prédisent les changements qui surviennent dans les propriétés physiques de la

roche se trouveant dans la zone de la faille. La réaction d'un massif rocheux soumis à un glissement jusqu'au point d'instabilité s'appelle nucléation; ce phénomène peut être modélisé à l'aide de modèles de fracturation ou de modèles de frottement :

- *Modèles de nucléation.* Les modèles de fracturation et de frottement prédisent qu'il n'y aura rupture qu'après un glissement sur une partie du rayon critique d'une faille. Le rayon critique dépend de la résistance mécanique de la faille, de l'état des contraintes et des propriétés élastiques des roches environnantes (Scholz, 1990). Comme la nucléation est une partie essentielle de l'instabilité, la prédiction est toujours possible si certaines propriétés géophysiques du processus de nucléation peuvent être détectées. Toutefois, dans les faits, le problème comporte plusieurs lacunes sur le plan pratique, comme par exemple le manque d'information sur l'ampleur de l'événement, même si la nucléation a été détectée avec efficacité.
- *Modèles de dilatance.* Ces modèles sont fondés sur les changements des propriétés de la roche à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone de rupture. Il en existe deux types : les modèles de dilatance de volume et les modèles de dilatance de la zone de faille. À ce jour, plusieurs phénomènes précurseurs ont été observés avant les tremblements de terre, mais il n'existe aucune théorie les expliquant complètement.

2.8.5 Estimation du risque sismique

L'estimation du risque sismique est un objectif très valable dans les études de sismicité. Les méthodes classiques employées dans ce domaine sont souvent fondées sur les résultats de l'observation de la sismicité antérieure dans une région donnée. L'hypothèse sous-jacente à ces méthodes est que la sismicité à venir sera similaire à la sismicité antérieure. Cette hypothèse est valide à deux conditions : il faut qu'une récurrence de l'activité sismique ait été établie et que la période de temps à l'étude soit plus longue que la période de récurrence réelle de la zone de faille. Dans la pratique, ces conditions sont rarement réunies, même dans les études sur les tremblements de terre. En outre, même si l'on suppose que les petits et grands tremblements de terre sont de nature similaire, conformément aux lois d'échelle, il est impossible de formuler des extrapolations entre ces deux types d'événements. Toutefois, nous sommes en mesure de faire des estimations à long terme du risque si nous considérons certaines données géologiques comme le taux de glissement de faille. Un examen attentif du cycle sismique peut permettre d'étendre les résultats au facteur temporel. L'amélioration des estimations des mouvements de sol importants pourrait également s'inscrire dans de tels efforts. En comprenant mieux la réponse du site, il sera possible, à partir des prédictions, de faire une estimation des dommages (Scholz, 1990).

2.9 Références

Aki, K. (1979). «Characterization of Barriers on an Earthquake Fault». *J. Geophys. Res.* 84:6140-6148.

Aki, K. (1984). «Asperities, Barriers and Characteristics of Earthquakes». *J. Geophys. Res.* 89:5867-5872.

Bath, M. (1973). «Introduction to Seismology». *Natur Och Kultur,* Stockholm, p. 395

Birch, F. (1966). «Compressibility; Elastic Constants» dans *Handbook of Physical Constants, Geological Society of America Memoir 97,* Clark, S.P. dir., pp. 97-173.

Boatwright, J. (1980). «A Spectral Theory for Circular Seismic Sources: Simple Estimates of Source Dimension, Dynamic Stress Drop and Radiated Seismic Energy». *Bull. Seism. Soc. Am.* 70:1-27.

Boore, D.M. et Boatwright, J. (1984). «Average Body-Wave Radiation Coefficients». *Bull. Seism. Soc. Am.* 74:1615-1621.

Brune, J.N. (1970). «Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes». *J.Geophys. Res.* 75:4997-5009.

Brune, J.N. (1971). «Correction». *J. Geophys. Res.* 76:5002.

Cranswick, E. et Sembera, E. (1989). «Earthquake Site/Source Studies in the AE/MS Domain». *Proceedings of the 4th Conference on AE/MS Activity in Geological Structures and Materials*, Trans-Tech Publications, pp. 375-402.

Dziewonski, A. et Woodhouse, J.H. (1983). «Studies of Seismic Source Using Normal-Mode Theory» dans *Earthquakes, Observations, Theory and Interpretation,* Kanamori, H. et Boschi, E. dir., North Holland, pp. 45-137.

Ge, M.C. (1988). *Optimization of Transducer Array Geometry for Acoustic Emission/Microseismic Source Location.* Thèse de doctorat, Pennsylvania State University, 237 p.

Gendzwill, D.J. et Prugger, A.F. (1985). «Algorithms for Microearthquake Locations». *Proceedings of the 4th Symposium on AE/MS*, Pennsylvania State University, Trans-Tech Publications, pp. 601-615.

Gibowicz, S. J. (1990). «Keynote Lecture: The Mechanism of Seismic Events Induced by Mining: A Review». *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, University of Minnesota, pp. 3-27.

Gibowicz, S.J., Cichowicz, A. et Dybel, T. (1977). «Seismic Moment and Source Size of Mining Tremors in Upper Silesia, Poland». *Acta Geophys. Pol.* 25:201-218.

Gibowicz, S. J., Young, R. P., Talebi, S. et Rawlence, D. J. (1991). «Source Parameters of Seismic Events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling relations for Events with Moment Magnitude Smaller than -2». *Bull. Seism. Soc. Am.* 81(4):1157-1182.

Hanks, T.C. (1977). «Earthquake Stress Drops, Ambient Tectonic Stresses, and Stresses that Drive Plates». *Pure and Applied Geophysics* 115: 441-458.

Hanks, T.C. (1982). «F_{max}». *Bull. Seism. Soc. Am.* 72:1867-1880.

Hanks, T.C. et Kanamori, H. (1979). «A Moment Magnitude Scale». *J. Geophys. Res.* 84:2348- 2350.

Hanks, T.C. et McGuire, R.R. (1981). «The Character of High-Frequency Strong Ground Motion». *Bull. Seism. Soc. Am.* 71:2071-2096.

Hasegawa, H. S. (1983). «Log Spectra of Local Earthquakes Recorded by the Eastern Canada Telemetered Network and Spectral Scaling». *Bull. Seism. Soc. Am.* 73:1041-1061.

Hasegawa, H.S., Wetmiller, R.J., et Gendzwill, D.J (1989). «Induced Seismicity in Canada – An Overview» dans *Seismicity in mines,* réimpression de *PAGEOPH* 129:3/4, Birkhauser Verlag, Basel.

Hedley, D.G.F. (1992). *Manuel des coups de toit dans les mines de roches dures de l'Ontario.* CANMET, Rapport spécial SP92-1F, 305 p.

Jackson, M.J. et Tweeton, D.R. (1994). *Migratom – Geophysical Tomography Using Wavefront Migration and Fuzzy Constraints.* Rapport de recherche du U.S. Bureau of mines RI 9497, 35p.

Jones, L. et Molnar, P.(1979). «Some Characteristics of Foreshocks and their Possible Relationship to Earthquake Prediction and Premonitory Slip on Faults». *J Geophys. Res.* 84: 3596 -3608.

Kasahara, K. (1981). *Earthquake Mechanics*. Cambridge University Press.

Madariaga, R. (1976). «Dynamics of an Expanding Circular Fault». *Bull. Seism. Soc. Am.* 66:639-666.

McGarr A. (1981). «Analysis of Peak Ground Motion in Terms of a Model of Inhomogeneous Faulting». *J. Geophys. Res.* 86:3901-3912.

McGarr, A., Spottiswoode, S.M., Gay, N.C. et Ortlepp, W.D. (1979). «Observations Relevant to Seismic Driving Stress, Stress Drop and Efficiency». *J. Geophys. Res.* 84:2251-2261.

Scholz, C.H. (1990). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting.* Cambridge University Press, 439 p.

Spottiswoode, S.M. (1993). «Seismic Attenuation in Deep-Level Mines». *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, Balkema, pp. 409-414.

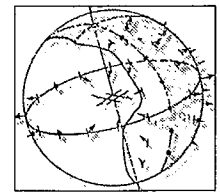
Spottiswoode, S.M. et McGarr, A. (1975). «Source Parameters of Tremors in a Deep-Level Gold Mine». *Bull. Seism. Soc. Am.* 65:93-112.

Snoke, J.A. (1987). «Stable Determination of (Brune) Stress Drop». *Bull. Seism. Soc. Am.* 77(2):530-538.

Talebi, S. (1994). *Source Studies of Mine-Induced Seismic Events Over a Broad Magnitude Range (- 4 <m_N< +4).* CANMET, Rapport de division MRL 94-030(CL), 55 p.

Talebi, S. et Cornet, F.H. (1987). «Analysis of the Microseismicity Induced by a Fluid Injection in a Granitic Rock Mass». *Geophys. Res. Lett.,* 14(3):227-230.

Telford, W.M., Geldart, L.P. et Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics.* Cambridge University Press.



Réseau sismographique numérique de CANMET

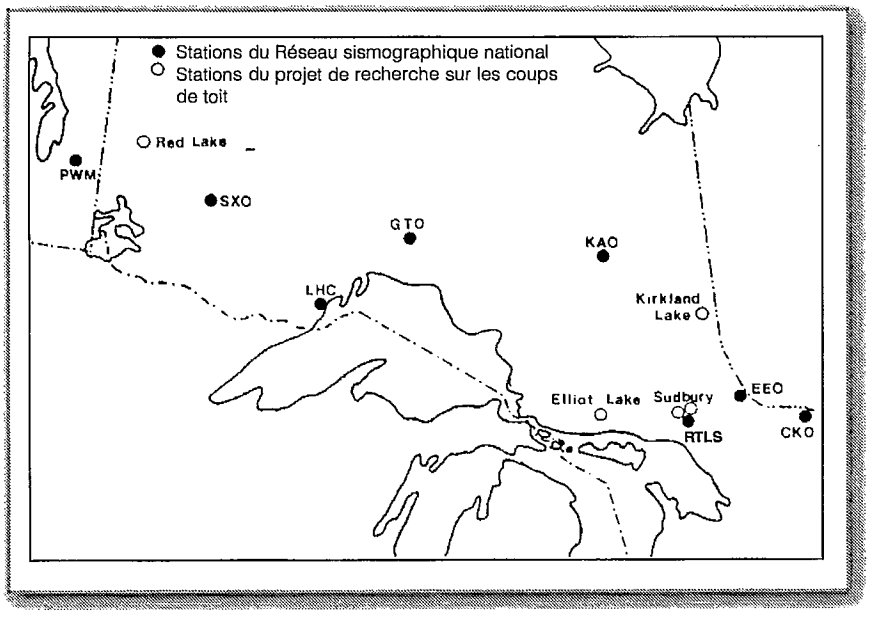
3.1 Introduction

Le Réseau télémétrique local de Sudbury (RTLS) est devenu opérationnel en 1987 dans le cadre du Projet de recherche Canada-Ontario-Industrie sur les coups de toit (PRCOICT). Le principal objectif du RTLS consistait à améliorer la détection et la localisation des sources des événements sismiques induits par l'exploitation minière et des coups de toit dans le Bassin de Sudbury. Le réseau comportait trois accéléromètres uniaxiaux situés en périphérie du Bassin.

Au cours de la phase 2 du projet sur les coups de toit [Programme canadien de recherche sur les coups de toit (PCRCT), 1990-1995], le réseau sismographique exploité par CANMET dans le nord-est de l'Ontario et dans le nord-ouest du Québec, dont fait partie le RTLS, a été révisé et il a été décidé que le réseau serait amélioré afin d'accroître ses capacités et de le rendre plus efficace. L'installation de la version améliorée du RTLS a débuté en juillet 1993 et les données ont été réacheminées au Laboratoire de Sudbury de CANMET en vue d'y être traitées. Le réseau perfectionné comprenait alors quatre capteurs sismographiques uniaxiaux et une station sismographique triaxiale.

L'expansion du Réseau sismographique numérique de CANMET (RSNC) la plus récente a été faite en novembre 1994 et consistait à inclure trois sismographes numériques uniaxiaux autonomes situés à Kirkland Lake (Ontario), à Matagami (Québec) et à Val-d'Or (Québec). Cette expansion a été possible grâce au financement provenant du Programme québécois de recherche sur les coups de toit qui a été lancé en 1993. L'expansion a permis la surveillance d'une plus grande région dans le nord-est de l'Ontario et dans le nord-ouest du Québec, soit du camp minier d'Elliot Lake, en Ontario, à Matagami, au Québec, le coeur du réseau se trouvant à Sudbury.

Figure 3.1 Emplacement des stations sismographiques dans le nord de l'Ontario



Le présent chapitre résume les objectifs de l'installation et les différentes composantes du RSNC, ainsi que son fonctionnement et la surveillance des coups de toit pendant la phase II du Programme canadien de recherche sur les coups de toit.

3.2 Historique

La plupart des régions minières de roches dures du nord de l'Ontario se trouvent dans le Bouclier précambrien et sont sismiquement stables. Comme la sismicité dans cette partie du Canada n'a jamais été importante, elle a été peu surveillée. En effet, la seule

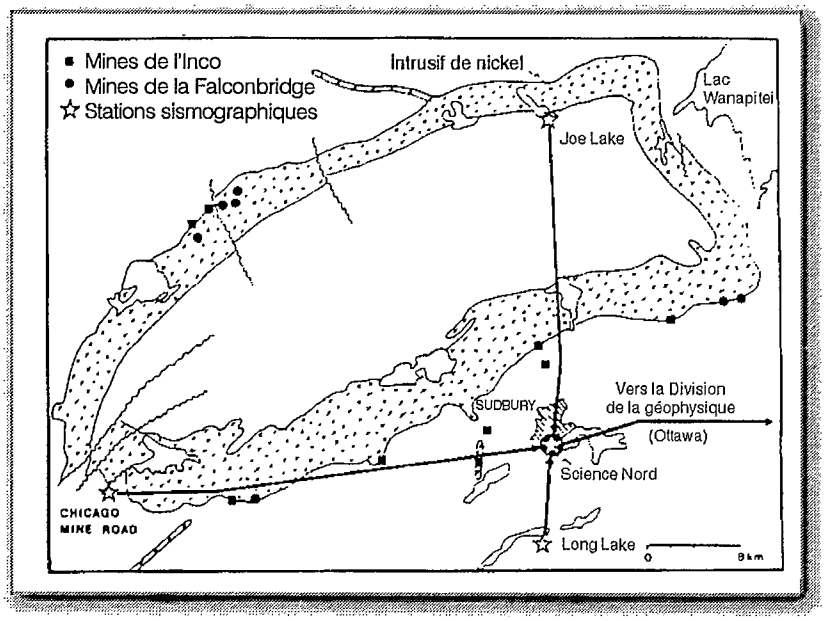
exception était la station sismographique installée à Kirkland Lake dans les années 40 et destinée à l'enregistrement des coups de toit dans les mines d'or locales. La couverture s'est améliorée considérablement depuis 1982 lorsque le Programme canadien de gestion des déchets de combutisbles nucléaires, dirigé par Énergie atomique du Canada Limitée, a financé l'installation de six stations sismographiques dans le nord de l'Ontario et au Manitoba dans le but de recueillir des données aux fins d'estimation du risque sismique régional (figure 3.1). Ces stations font partie du Réseau sismographique national qui est exploité par la Division de la géophysique de la Commission géologique du Canada (CGC) dans le but de détecter les tremblements de terre dans l'ensemble du pays. À la plupart de ces stations, seul un signal analogique était enregistré sur un tambour enregistreur dont il fallait changer le sismogramme chaque jour (Hedley, 1992).

En raison du besoin pressant qu'avait l'industrie de disposer de plus de données numériques à la suite d'un événement, l'une des premières tâches entreprises dans le cadre du PRCOICT a été d'accroître le nombre de stations sismographiques en périphérie du bassin de Sudbury, le faisant passer de un à trois, afin d'augmenter la portée des événements enregistrés et de pouvoir localiser les coups de toit qui ne pouvaient l'être auparavant. Ce réseau, connu sous le nom de RTLS est devenu entièrement opérationnel en 1987. Le réseau original assurait la couverture des mines de la région de Sudbury et était constitué de trois stations en périphérie du Bassin (figure 3.2).

Des stations sismographiques ont également été installées à Elliot Lake, Red Lake et Kirkland Lake (Plouffe et al., 1990). Toutes ces stations comprenaient un sismomètre vertical uniaxial Télédyne-Geotech S13 ayant une période d'une seconde, qui enregistrait généralement dans la bande de fréquences de 1 à 16 Hz. Les signaux des sismographes étaient numérisés à chaque station et transmis par ligne téléphonique dédiée à Science Nord, centre scientifique public de Sudbury. À cet endroit, un processeur enregistrait les événements sismiques déclenchés et ces derniers étaient envoyés automatiquement par ligne téléphonique dédiée à la CGC d'Ottawa où ils étaient traités et archivés.

Hedley (1992) fait remarquer que, même si dans certains cas il est possible de différencier les coups de toit des sautages, il en va tout autrement dans d'autres cas. La figure 3.3 montre des sismogrammes de deux coups de toit et de deux sautages enregistrés sur le sismographe d'Elliot Lake. La distinction entre les coups de toit et les sautages est plutôt facile à établir lorsque les deux types d'événements sont enregistrés à de courtes distances (figures 3.3(a) et 3.3(b)), en raison des signatures différentes et du fait que les sautages de production surviennent selon un horaire régulier. Toutefois, à de plus grandes distances (figures 3.3(c) et 3.3(d)), cette tâche est plus difficile et les événements doivent être confirmés par les exploitants des mines. Il est intéressant de noter que la qualité des données s'est grandement améliorée si l'on compare les enregistrements analogiques aux enregistrements numériques réalisés par le RSNC qui figurent dans le présent rapport. La figure 3.4 présente un histogramme des événements sismiques importants (MN > 2,0), enregistrés par l'ancien système dans les mines de Sudbury de 1984 à 1990.

Figure 3.2 Emplacement des stations sismographiques autour de Bassin de Sudbury et transfert des données du RTLS original



3.3 Amélioration du réseau

En 1991, pendant la seconde phase du projet des coups de toit, le réseau de stations sismographiques exploité par CANMET dans le nord de l'Ontario a été révisé et une proposition a été faite pour l'améliorer (Mottahed, 1991). Cette amélioration visait à remplacer les systèmes classiques utilisés à l'époque par des stations sismographiques à convertisseur analogique-numérique à distance, comme celles fournies par Nanometrics Inc. d'Ottawa. Le principal objectif du remplacement consistait à améliorer les capacités du réseau et à le rendre plus efficace. Ce remplacement était en outre compatible avec le projet de la CGC qui visait à modifier le Réseau sismographique national canadien à peu près de la même manière. Le remplacement (Pritchard et Talebi, 1994) permettait de :

- continuer à diriger les données provenant des trois stations uniaxiales du RTLS original installées en périphérie du Bassin de Sudbury, vers l'unité d'acquisition située à Science Nord, à Sudbury;
- convertir le sismographe analogique d'Elliot Lake en sismographe numérique en transférant aussi ces données à Science Nord et en les fusionnant aux données provenant des stations sismographiques originales du RTLS;
- installer une station sismographique à trois composantes dans le Bassin de Sudbury dont les données seraient aussi transférées à Science Nord et fusionnées avec les données des stations sismographiques originales du RTLS;
- augmenter la fréquence de l'échantillonnage en la faisant passer de 60 Hz à 100 Hz pour obtenir des données de meilleure qualité;
- procéder au traitement des données et à la détermination de la magnitude au Laboratoire d'Elliot Lake de CANMET. Cette seule modification a rendu possibles des économies substantielles quant au coût des lignes téléphoniques dédiées auparavant à la transmission de données vers Ottawa;
- planifier la conversion des stations analogiques de Red Lake et de Kirkland Lake en sismographes numériques, avec l'option de la transmission continue reportée à une date ultérieure;
- utiliser un ordinateur de pointe et des technologies numériques dotés de logiciels perfectionnés d'analyse et de communication.

En raison du déménagement du groupe de CANMET sur les coups de toit d'Elliot Lake à Sudbury en 1993, la destination finale des données et l'unité de traitement se trouvent maintenant au Laboratoire de Sudbury. L'installation du RTLS amélioré a débuté en juillet 1993 lorsque CANMET en a pris l'entière responsabilité. Le RTLS perfectionné de l'époque était constitué de cinq stations sismographiques (y compris celle d'Elliot Lake) et de 7 composantes au total (quatre capteurs uniaxiaux et un capteur triaxial) qui

Figure 3.3 Signaux sismiques analogiques associés à des sautages et des coups de toit, enregistrés par le sismographe d'Elliot Lake

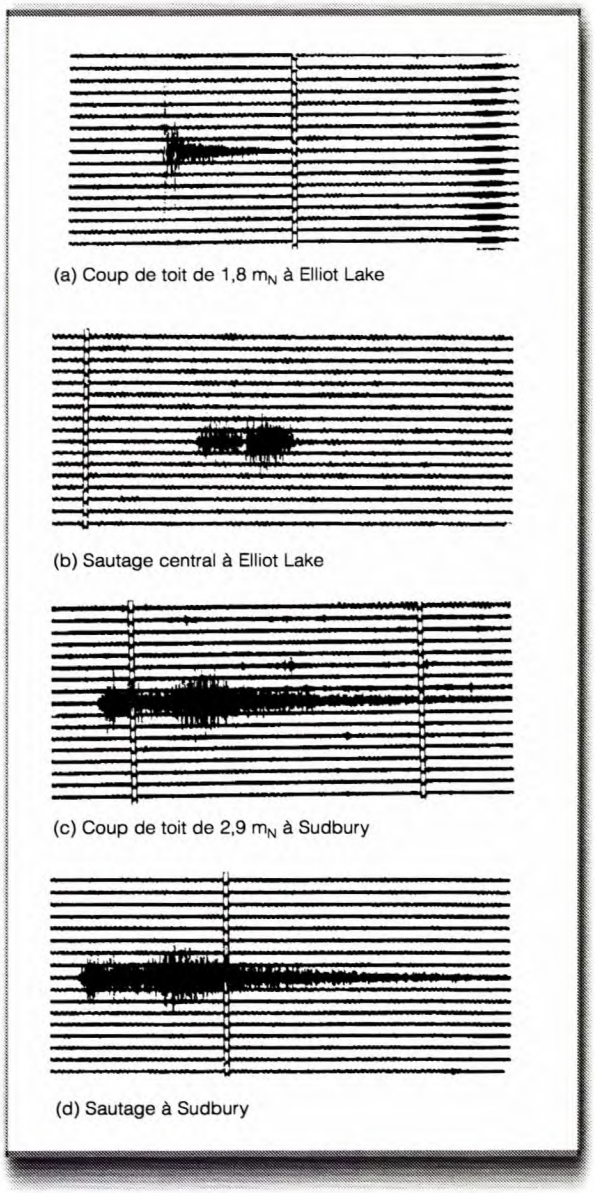
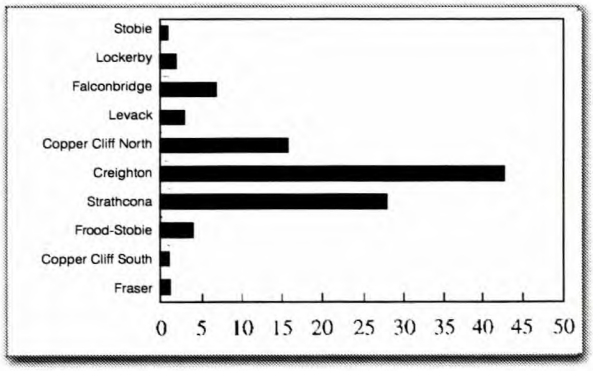


Figure 3.4 Histogramme indiquant le nombre d'événements sismiques (m_N > 2,0) dans les mines de Sudbury au cours de la période de 1984 à 1990



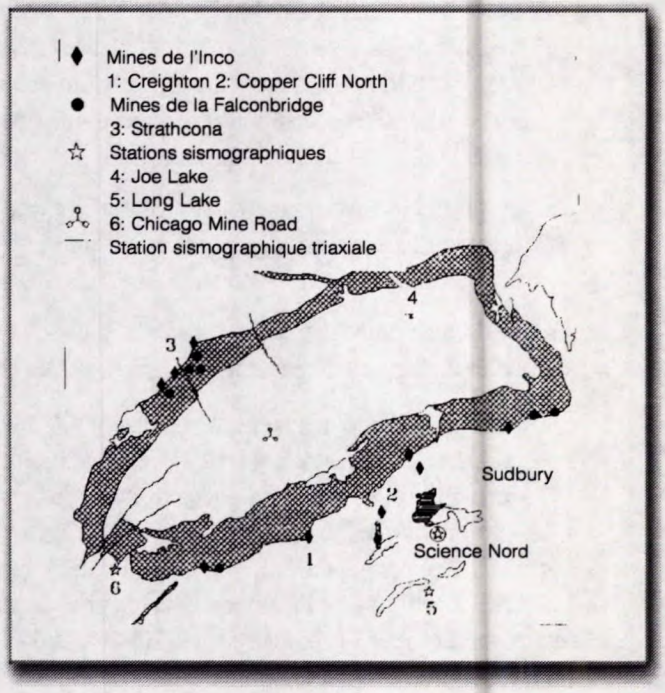
couvraient les régions minières de Sudbury et d'Elliot Lake (figure 3.5). La station triaxiale, située dans la région de Dowling, au centre du Bassin de Sudbury est composée de trois capteurs orthogonaux : l'un est vertical et les deux autres sont horizontaux (1 nord-sud et 1 est-ouest).

Les résultats de l'amélioration du RTLS peuvent être résumés comme suit :

- fréquence d'échantillonnage accrue de 60 Hz à 100 Hz en vue d'une meilleure qualité des données numériques;
- capacités accrues de détection et de localisation des événements;
- réduction du coût du transfert des données puisque le traitement est réalisé à Sudbury;
- supervision et entretien en continu;
- nombre de capteurs accru pour une plus grande précision de localisation de la source;
- un capteur triaxial assure une meilleure couverture et recueille des données utiles pour de la recherche approfondie;
- capacités d'expansion accrues dans l'avenir en Ontario et au Québec;
- qualité accrue des données, des logiciels d'analyse des données et de la communication.

L'expansion la plus récente du RSNC, réalisée en novembre 1994, a consisté à inclure au réseau trois nouveaux sismographes numériques localisés à Kirkland Lake (Ontario), à Matagami (Québec) et à Val-d'Or (Québec). Cette expansion a été rendue possible en raison de l'appui financier du Programme québécois de recherche sur les coups de toit par le biais de l'Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement minéral. La couverture additionnelle permet maintenant de surveiller un plus grand territoire en Ontario et au Québec et de déterminer les magnitudes des événements induits par l'exploitation minière qui surviennent dans les mines du nord-ouest du Québec. Elle entraîne également une certaine redondance des calculs de magnitudes à l'intérieur du réseau. Le RSNC a maintenant le potentiel de couvrir une partie importante du nord-est de l'Ontario et du nord-ouest du Québec, c.-à-d. d'Elliot Lake (Ontario) à Matagami (Québec), le coeur du réseau se trouvant dans la région minière de Sudbury (figure 3.6).

Figure 3.5 Emplacement des stations sismographiques du RTLS amélioré



3.4 Aperçu du système

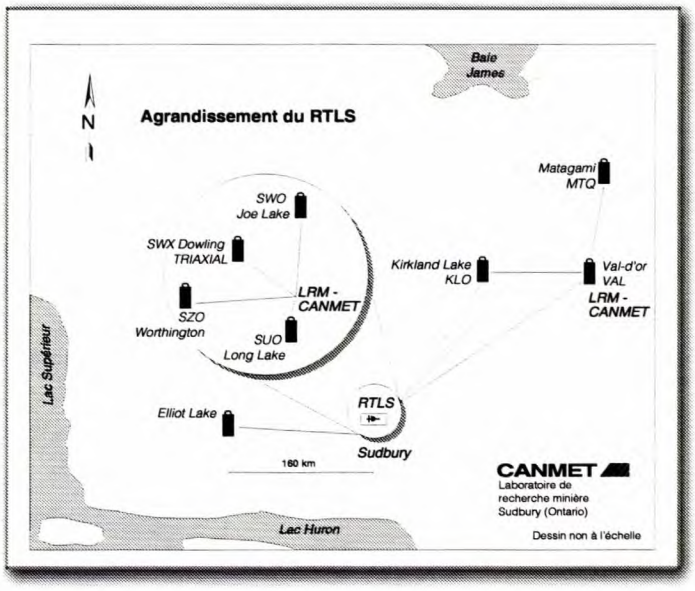
Dans cette parttie, nous verrons les détails techniques du RSNC ainsi que les procédures à suivre pour l'acquisition et le traitement des données. Les figures 3.7 et 3.8 illustrent schématiquement les procédures schématiques suivies pour le transfert et le traitement des données du système.

3.4.1 Matériel

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, le réseau comporte deux types de capteurs, soit des capteurs uniaxiaux et des capteurs triaxiaux. Les capteurs uniaxiaux sont des capteurs ayant une période d'une seconde et comportent une unité Télédyne-Geotech S13 qui est employée dans de nombreuses applications sismologiques partout dans le monde; le capteur triaxial, pour sa part, est constitué de trois unités uniaxiales montées orthogonalement les unes par rapport aux autres

dans une voûte scellée. Chaque capteur réagit à un mouvement de sol minimal détectable de 2 nm/s (nanomètres par seconde). Cette résolution est équivalente à l'amplitude d'un tremblement de terre de magnitude 1,5 m_N localisé à une distance de 100 km. La gamme de fréquences de ces capteurs se situe entre 0,5 et 40 Hz. Ces capteurs sont conçus pour fonctionner de façon fiable à des températures aussi basses que – 40°C. Les signaux analogiques générés par les capteurs sur le site sont filtrés et convertis en signaux numériques à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique RD3 de 100 Hz. Des signaux numériques continus sont transmis par modem haute vitesse et par lignes téléphoniques dédiées au Laboratoire de CANMET à Sudbury afin d'y être analysés.

Figure 3.6 Carte illustrant l'étendue du réseau sismographique numérique de CANMET



Le progiciel du processeur de communications est constitué de plusieurs composantes de matériel et de logiciel. Des modems haute vitesse spécialisés reçoivent les données provenant des capteurs à distance et les transfèrent à un processeur de transmission. Chacun d'eux est relié au processeur de communications qui est spécialement configuré pour les opérations des sismographes. Le processeur s'occupe de la réception et du décodage des données d'entrée et de l'information du système de déclenchement. Une horloge maîtresse du Système de positionnement global (Global Positioning Satellite : GPS) est utilisée pour lier toutes les données d'entrée en temps réel avec une précision de quatre points décimaux. Un logiciel appelé Network AcQuisition Software (NAQS) est utilisé comme programme principal d'acquisition des données et fait fonctionner l'ordinateur central du Laboratoire de Sudbury (figure 3.7). Chaque événement déclenché est stocké simultanément dans une grande zone tampon ou sur une partie du disque dur de l'ordinateur principal d'acquisition des données. Les données relatives à l'événement sont alors transférées à un ordinateur spécialisé en vue du traitement.

Au cours de l'installation et de la mise en place initiales du réseau, la société Nanometrics Inc. a calibré le système dans le but de déterminer sa réponse fréquentielle. La calibration a démontré que les capteurs du RTLS répondaient bien aux signaux générés à l'intérieur de la bande de fréquences prévue et établie par le fabricant (de 0,5 Hz à 40 Hz). Le personnel de CANMET a également calibré le capteur d'Elliot Lake dans une gamme de fréquences plus étendue (de 0,5 à 100 Hz) dans le but de déterminer la réponse du sismographe qui est utilisé pour déterminer les magnitudes.

3.4.2 Logiciels

Le protocole de transfert de données sismiques à distance (Wide Area Seismic Protocol : WASP) est le progiciel utilisé depuis la station centrale pour le transfert automatique des données individuelles des stations sismographiques (figures 3.7 et 3.8). Des messages de liaison dans lesquels on demande des données relatives aux événements déclenchés sont envoyés de la station centrale vers les stations périphériques qui envoient à leur tour les données demandées à l'ordinateur central aux fins du traitement et de l'analyse. Le remplacement du système antérieur par ce procédé automatique est une amélioration importante. Elle a permis de gagner beaucoup de temps puisque la manipulation des données est pratiquement éliminée et que les appels sont effectués pendant les heures creuses. Depuis que le WASP est devenu opérationnel, les liaisons sont établies automatiquement et les données sont stockées dans l'ordinateur pour examen et traitement à chaque matin.

Figure 3.7 Représentation schématique du transfert des données sur le RTLS amélioré

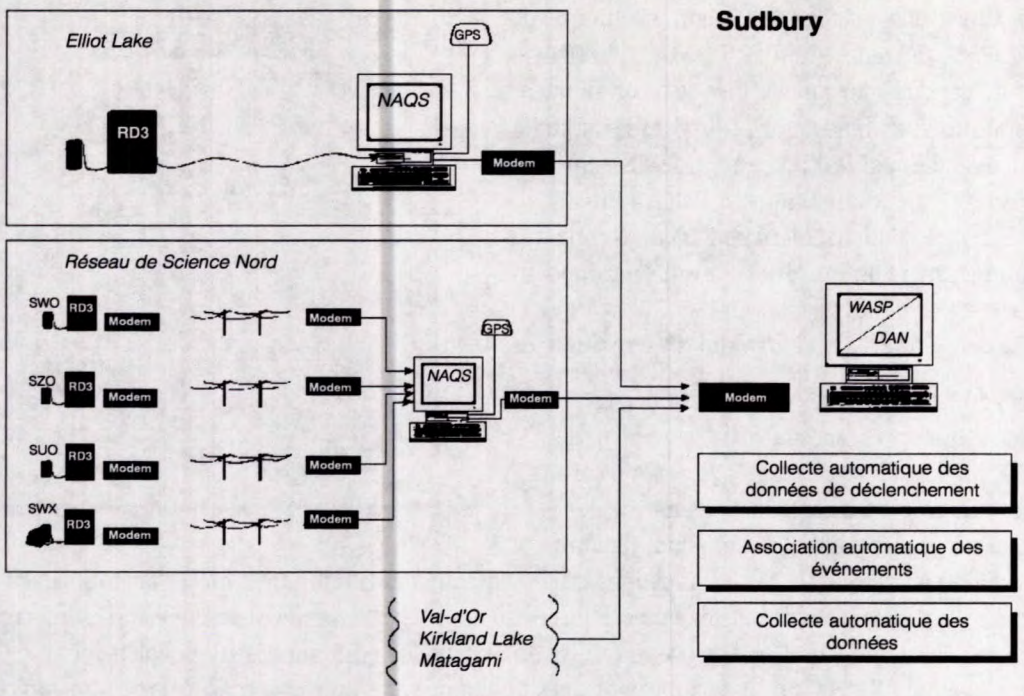
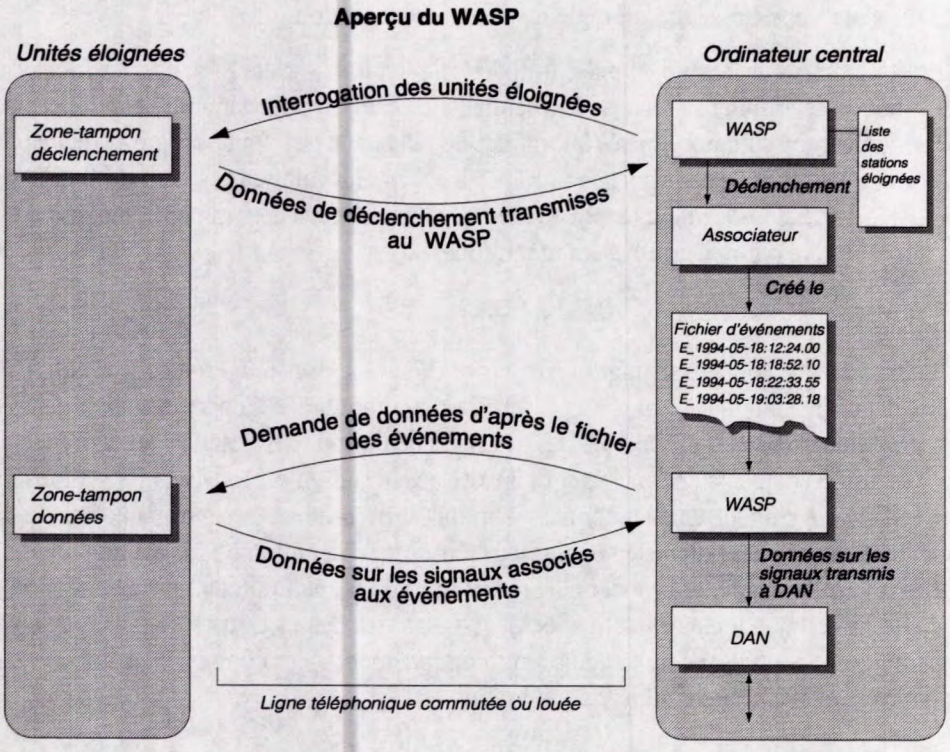


Figure 3.8 Représentation schématique du traitement des données pour le RTLS amélioré



3.4.3 Procédure quotidienne

Après le transfert des données d'événements enregistrées par l'ordinateur central à l'ordinateur de traitement par ligne téléphonique dédiée, les fichiers des événements déclenchés sont recueillis et chaque événement est examiné quotidiennement. Les événements sont habituellement classés en quatre catégories :

- *Sautages :* Événements liés aux activités d'extraction minière et de construction (figures 3.9 et 3.10);
- *Événements induits par l'exploitation minière :* Événements sismiques confirmés par les exploitants de la mine, soit par un système microsismique dans la mine ou par des observations souterraines (figures 3.11, 3.12, 3.13 et 3.14);
- *Événements possibles :* Événements non enregistrés sur un système de surveillance microsismique ni ressentis par les exploitants de la mine en l'absence d'un tel système sur le site minier;
- *Événements régionaux :* Événements importants qui se produisent à distance, à l'extérieur du Bassin de Sudbury (figures 3.15 et 3.16).

Lorsque l'événement a été classé comme un événement sismique induit par l'exploitation minière, on procède aux étapes suivantes :

- Les temps d'arrivée des ondes P et S sont déterminés pour chaque capteur et l'algorithme de localisation de la source est utilisé pour l'événement d'après ces temps d'arrivée. Les événements qui surviennent à l'intérieur du réseau du RSNC sont les plus faciles à localiser et ce, avec une plus grande précision.
- Les sismographes à distance, comme celui du site d'Elliot Lake, sont reliés au réseau par modem et les données sont extraites pour la même fenêtre temporelle que pour l'événement enregistré. Tous les fichiers enregistrés sont alors fusionnés et la magnitude est déterminée.
- Le produit final est un plan de localisation sur lequel figurent les capteurs déclenchés, les coordonnées de la source et la magnitude de l'événement (figures 3.14 et 3.16).

La localisation de chaque événement est confirmée par les exploitants de la mine lorsque la mine dispose d'un système de surveillance microsismique. La précision de la localisation de la source du RSNC est alors comparée à

Figure 3.9 Exemple de signal d'un sautage enregistré sur le RTLS

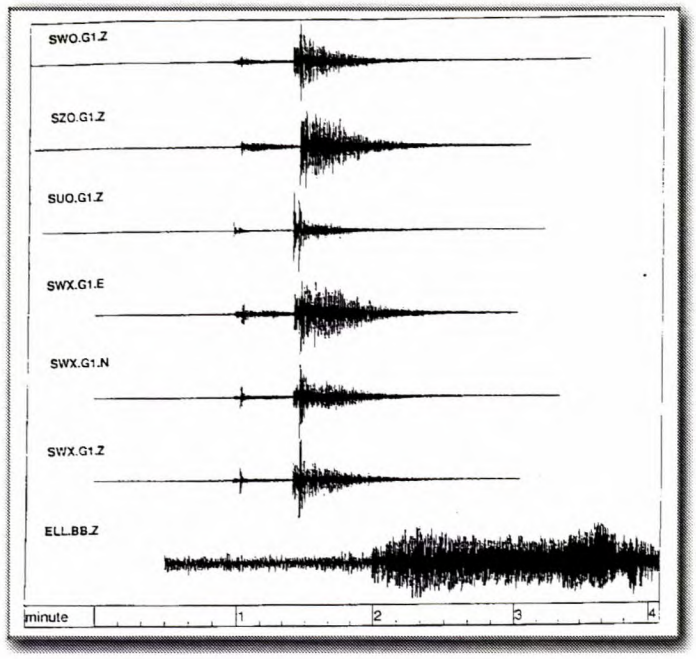


Figure 3.10 Exemple de signaux associés à un sautage avec délais prolongés, suivi d'un événement induit par l'exploitation minière

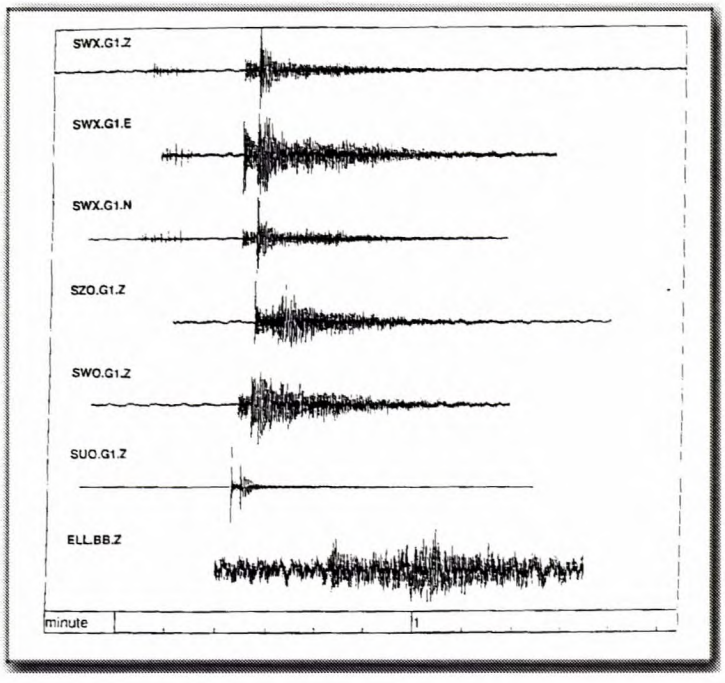


Figure 3.11 Exemple d'un événement induit par l'exploitation minière à la mine Creighton d'Inco, enregistré par le RTLS, et plan connexe de localisation de la source

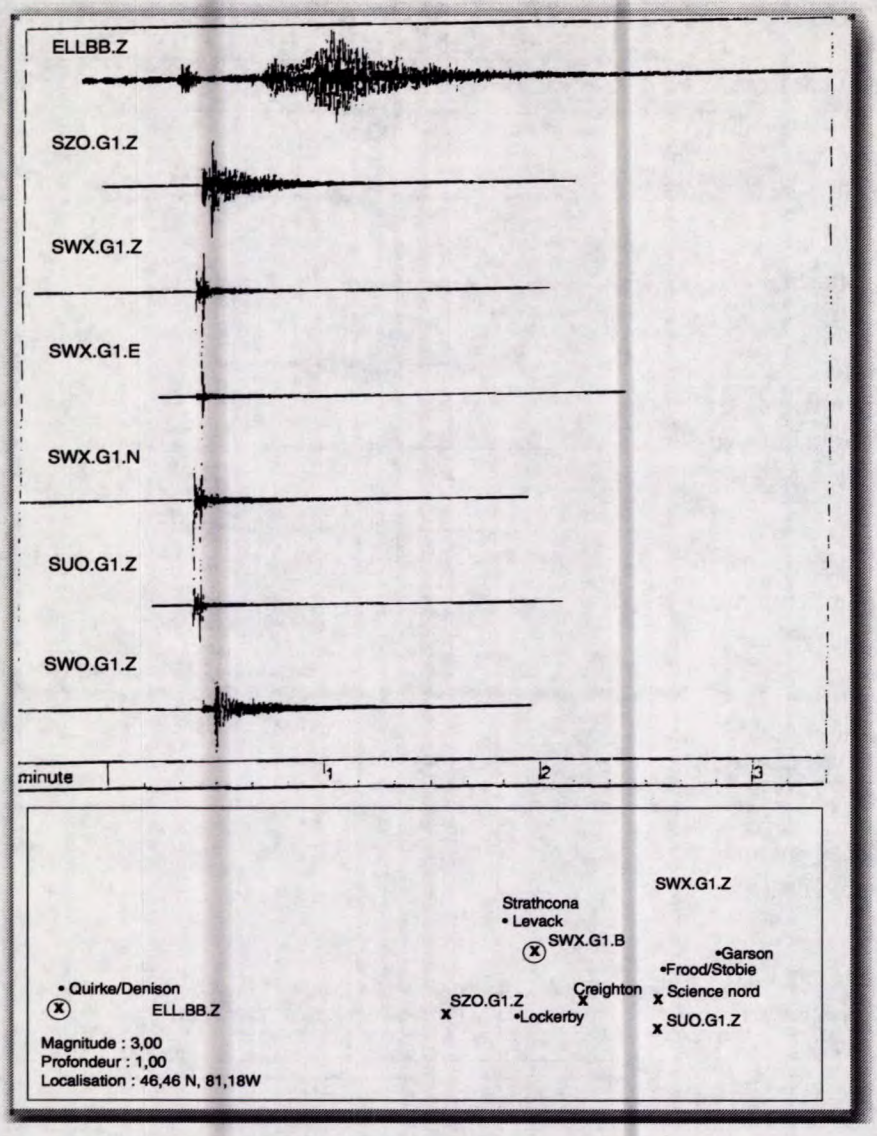
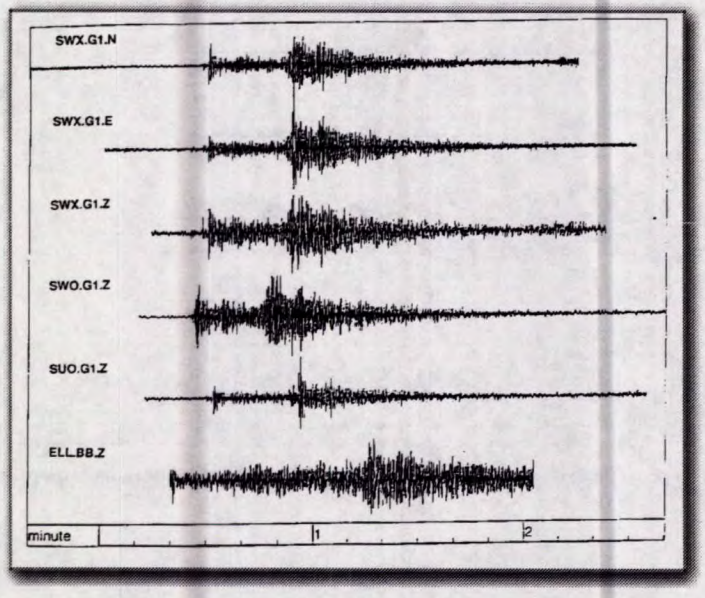


Figure 3.12 Signaux enregistrés par le RTLS pour le coup de toit mortel du 26 novembre 1993 à la mine Macassa de Kirkland Lake (Ontario)



celle du système de surveillance sur le site. L'épicentre (c.-à-d. la projection verticale de l'événement à la surface terrestre) est habituellement déterminé avec une précision d'environ 1,0 km. Les trains d'ondes de l'événement indiquant les temps d'arrivée des ondes P et S sont imprimés. Les renseignements ainsi constitués sont alors envoyés sur demande au département de surveillance du sol de la mine à des fins d'archivage. En outre, l'événement et ses paramètres sont ajoutés à la base de données de CANMET. À la fin de chaque semaine, toutes les données relatives à l'événement sont copiées sur un disque optique aux fins d'archivage permanent. On conserve également une liste des signaux d'événements induits par l'exploitation minière pour chaque mine.

3.5 Résumé des opérations

Depuis la première étape de l'amélioration du RTLS en juillet 1993, un certain nombre de problèmes pratiques ont été résolus avant que le réseau ne devienne entièrement opérationnel. À la fin de décembre 1993, le système était devenu opérationnel environ 80 % du temps. Les temps d'arrêt, particulièrement depuis juillet 1993, étaient attribuables à des problèmes de logiciel, de matériel et à des difficultés liées aux lignes téléphoniques. Toutefois, malgré les difficultés, des coups de toit importants ont été enregistrés pendant cette période, y compris le coup de toit fatal qui a eu lieu à la mine Macassa en novembre 1993 (figure 3.12).

Le nouveau logiciel de communication (WASP) a été installé en deux étapes, en février 1994 et en juin 1994. Cette opération n'a pas été entièrement satisfaisante et les problèmes persistants de logiciel ont exigé une extraction manuelle des données. En août 1994, dans le cadre du plan global d'amélioration, on a décidé de déménager le matériel principal d'acquisition de Science Nord vers le Laboratoire de CANMET à Sudbury. Il est ainsi devenu possible d'obtenir une réponse plus fiable et plus

opportune aux problèmes de système. Il est intéressant de remarquer que les problèmes de matériel et de logiciel survenus depuis l'amélioration du système ne comprennent pas ceux du capteur d'Elliot Lake, de conception similaire, où l'ordinateur utilisé pour l'acquisition des données avait fonctionné pendant les deux années précédentes avec un temps d'arrêt de moins de trois jours au total.

Les tableaux 3.1, 3.2 et 3.3 présentent des listes d'événements induits dans le nord de l'Ontario depuis septembre 1992, tels qu'enregistrés par les systèmes de surveillance macrosismique de CANMET, par le Réseau sismographique numérique de CANMET et par le Réseau sismographique numérique exploité par la Division de la géophysique de la Commission géologique du Canada. La limite inférieure de magnitude de ces événements correspond à une magnitude de 1,5 m_N. Le tableau 3.1 résume les événements induits pour la période allant du 3 septembre 1992 au 15 juin 1993, moment où le Laboratoire de Sudbury a commencé à exploiter le réseau; le tableau 3.2 donne la liste des événements pour la période du 15 juin 1993 au 31 décembre 1993 et le tableau 3.3 résume les événements pour la période du 1er janvier 1994 au 31 décembre 1994 (Talebi et al., 1994).

Les figures 3.11 à 3.16 présentent certains événements importants enregistrés pendant la phase II du Programme canadien de recherche sur les coups de toit. Par exemple, la figure 3.13 montre les signatures de l'onde d'un événement sismique important (de magnitude 2,7 m_N) de la mine Macassa, de Kirkland Lake (Ontario), enregistré le 25 décembre 1994. La figure 3.14 présente la localisation de la source et la magnitude de cet événement et la figure 3.15 illustre les signatures d'onde d'un petit tremblement de terre survenu dans la région de Kapuskasing, dans le nord de l'Ontario, le 25 décembre 1994. La localisation de la source et la magnitude de cet événement sont indiquées à la figure 3.16.

Figure 3.13 Trains d'onde associés à un événement sismique majeur récent (magnitude de 2,7 m_N) à la mine Macassa de Kirkland Lake (Ontario), enregistrés le 25 décembre 1994

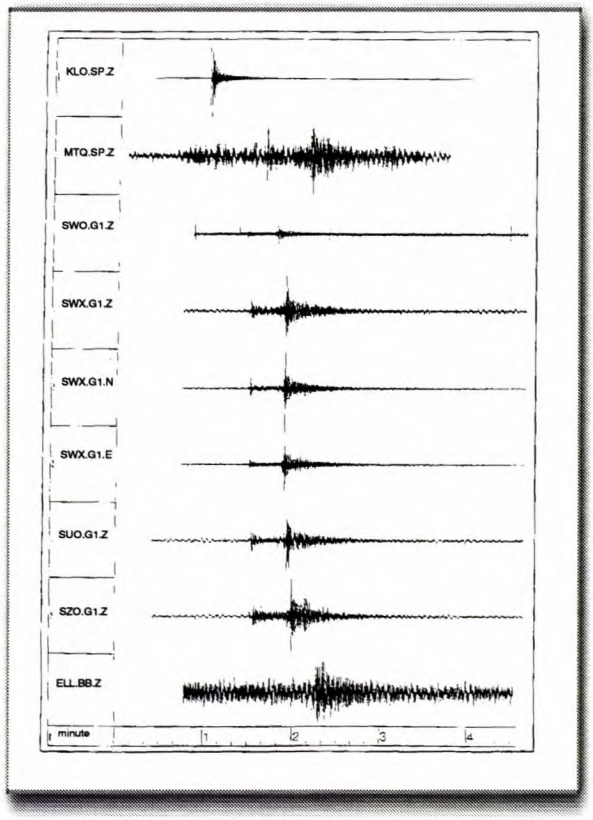
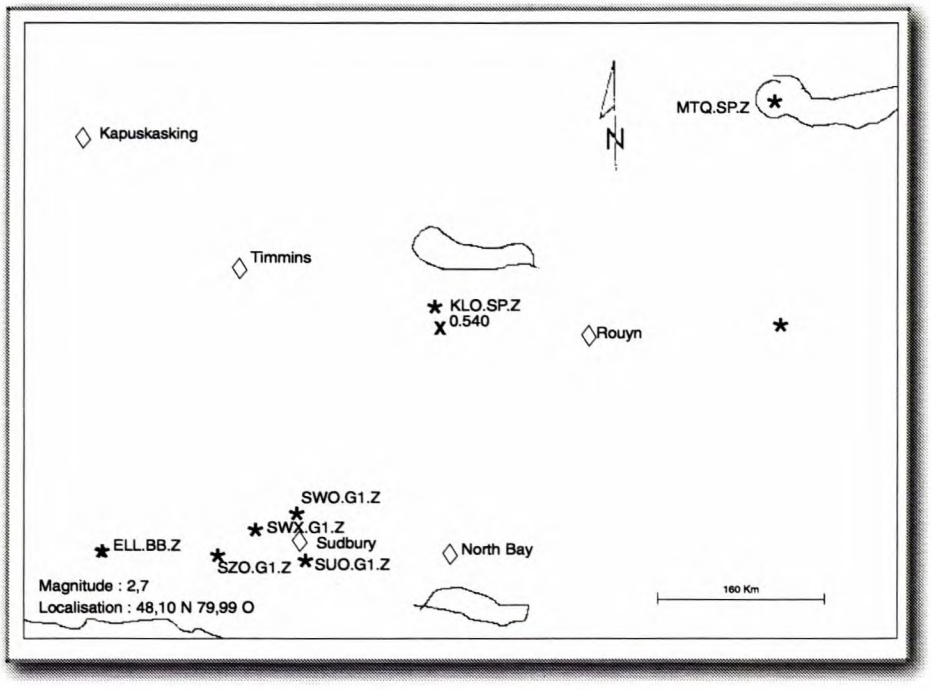


Figure 3.14 Localisation de la source et détermination de la magnitude de l'événement sismique du 25 décembre 1994 à la mine Macassa



3.6 Données et demandes d'information

Des demandes d'information proviennent de nombreuses sources, notammment de la CGC d'Ottawa, des entrepreneurs qui effectuent des opérations de dynamitage pour la construction et la réfection des routes du Bassin de Sudbury, du public concerné ou intéressé ainsi

que des médias et des universités. L'échange d'information est chose courante entre la Division de la géophysique de la CGC à Ottawa et le Laboratoire de CANMET à Sudbury concernant la surveillance des coups de toit, principalement pour comparer les magnitudes déterminées par le RSNC à celles déterminées par le Réseau de télémétrie de l'Est du Canada. Les résultats de ces deux réseaux ne diffèrent généralement pas plus de ± 0,3 m_N pour l'intervalle de surveillance du RSNC, ce qui est acceptable. La CGC a parfois demandé des données relatives aux tremblements de terre enregistrées dans le RSNC pour ses archives. L'un des événements mondiaux les plus importants enregistrés par le RTLS était de magnitude 8,2, situé en profondeur (500 km) et survenu le 9 juin 1994 en Bolivie. Cet événement a été ressenti dans une bonne partie de l'hémisphère Nord, donc dans la partie nord de l'Ontario.

3.7 Conclusion

Grâce à l'amélioration du RTLS et de l'expansion du RSNC, le réseau est maintenant composé de sept stations sismographiques uniaxiales et d'une station sismographique triaxiale. Les nouvelles stations uniaxiales se trouvent à Kirkland Lake (Ontario), à Matagami et à Val-d'Or (Québec). La station triaxiale a été installée dans la région de Dowling, dans le Bassin de Sudbury.

La couverture additionnelle fournie par le RSNC élargi a augmenté considérablement la qualité de la détermination de la magnitude des événements induits par l'exploitation minière qui surviennent dans les mines du nord-est de l'Ontario et du nord-ouest du Québec.

Figure 3.15 Ondes associées à un faible tremblement de terre dans la région de Kapuskasing, au nord de l'Ontario, le 25 décembre 1994

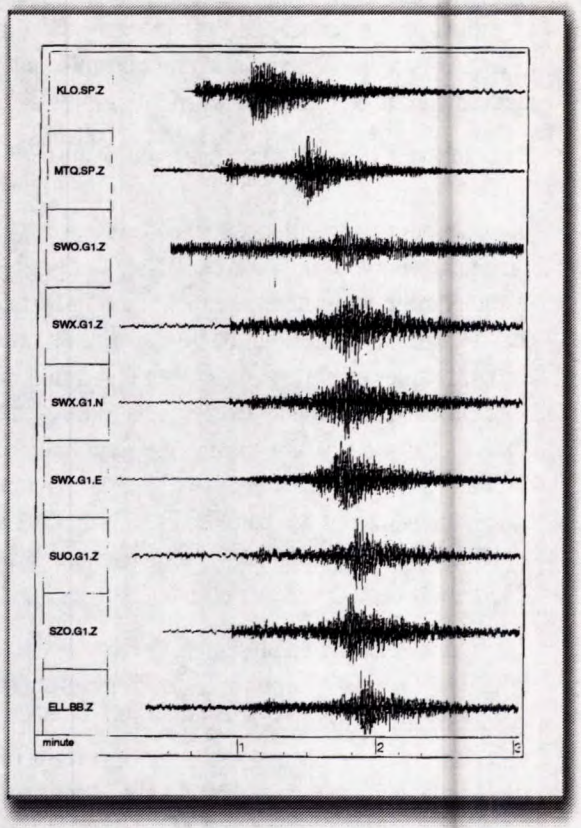


Figure 3.16 Localisation de la source et détermination de la magnitude pour le faible tremblement de terre du 25 décembre 1994 dans la région de Kapuskasing

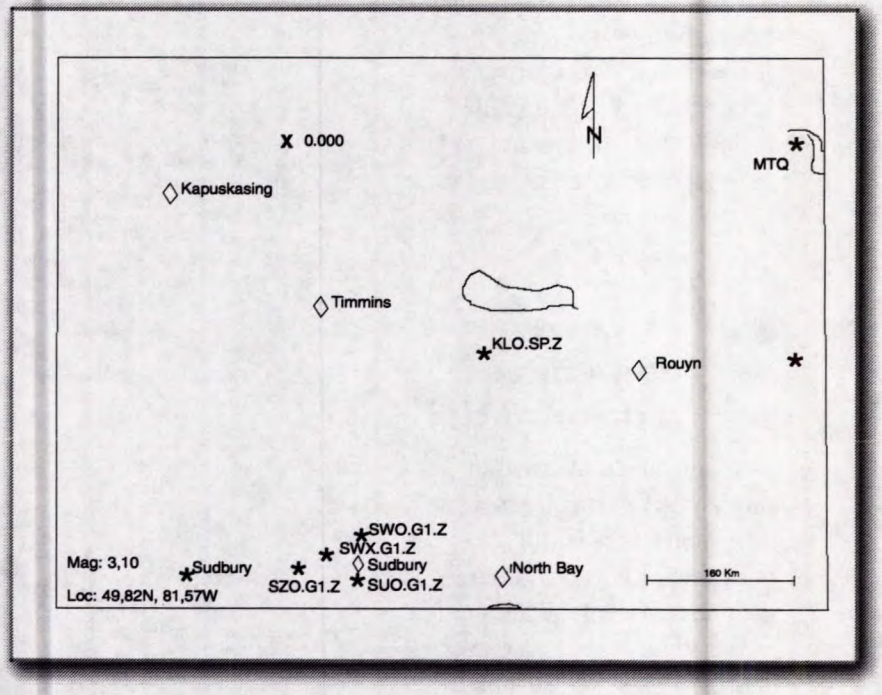


Tableau 3.1 Événements sismiques induits par l'exploitation minière (m_N >1,5) dans le nord de l'Ontario entre le 3 septembre 1992 et le 15 juin 1993. La quatrième colonne indique les résultats provenant des systèmes macrosismiques de CANMET (opérationnels aux mines Creighton, Macassa et Campbell) et la colonne suivante indique les résultats du réseau de sismographes de la CGC (données fournies par C.A. Galley et R.J. Wetmiller).
Nota : NE : événement non enregistré; NC : la CGC n'a pas été contactée, habituellement m_N<2; IMP : la détermination de la magnitude s'est avérée impossible d'après les données disponibles.

Date	Heure locale	Mine	Magnitude (m_N) CANMET- macro	Magnitude (m_N) CGC
3 sept. 1992	22:39:06	Creighton	2,4	2,7
4 sept. 1992	09:13:23	Creighton	1,5	1,5
5 sept. 1992	01:21:08	Creighton	1,8	1,5
7 sept. 1992	16:33:16	Creighton	1,6	1,7
11 sept. 1992	07:11:03	Creighton	1,5	1,4
11 sept. 1992	18:22:26	Creighton	1,6	1,7
12 sept. 1992	01:26:03	Creighton	1,6	1,5
16 sept. 1992	22:50:00	Creighton	1,8	NE
17 sept. 1992	17:51:27	Creighton	1,5	NE
23 sept. 1992	11:00:00	Falconbridge – Puits 5	–	2,0
23 sept. 1992	11:01:00	Falconbridge – Puits 5	–	2,4
1er oct. 1992	02:22:36	Creighton	1,8	1,8
1er oct. 1992	10:53:09	Macassa	1,5	NE
4 oct. 1992	21:29:24	Creighton	1,7	2,1
8 oct. 1992	14:06:56	Creighton	1,6	1,9
20 oct. 1992	18:37:28	Creighton	2,3	2,6
22 oct. 1992	15:54:57	Campbell	1,5	NE
28 oct. 1992	10:26:20	Macassa	2,1	2,3
28 oct. 1992	10:35:08	Macassa	2,3	2,6
28 oct. 1992	22:32:21	Creighton	1,7	1,9
29 oct. 1992	06:19:45	Creighton	1,6	1,5
29 oct. 1992	20:02:07	Creighton	1,9	2,1
31 oct. 1992	12:04:25	Creighton	1,8	2,1
7 nov. 1992	05:38:13	Creighton	1,9	2,0
9 nov. 1992	11:55:49	Macassa	1,5	NE
30 nov. 1992	21:58:51	Creighton	2,1	IMP
4 déc. 1992	15:42:12	Creighton	2,0	2,0
4 déc. 1992	16:19:10	Creighton	2,7	2,8
9 déc. 1992	22:14:15	Creighton	2,3	2,2
10 déc. 1992	05:15:51	Creighton	1,3	1,5
11 déc. 1992	21:36:24	Creighton	1,6	NE
17 déc. 1992	13:21:38	Creighton	2,1	2,6
6 fév. 1993	10:03:03	Creighton	1,6	1,8
7 fév. 1993	03:11:06	Creighton	1,4	1,9
21 fév. 1993	22:07:40	Creighton	1,6	1,6
16 mars 1993	02:22:02	Creighton	2,0	2,2
16 mars 1993	02:24:29	Creighton	1,5	NE
17 mars 1993	15:51:21	Campbell	2,1	NE
17 mars 1993	15:52:15	Campbell	1,6	NE
24 mars 1993	01:39:39	Creighton	1,6	NE
29 mars 1993	01:23:51	Creighton	NR	1,6
1er avril 1993	19:14:03	Creighton	2,2	2,1
2 avril 1993	14:23:13	Creighton	2,9	2,9
2 avril 1993	14:27:43	Creighton	1,5	NE
3 avril 1993	15:47:49	Campbell	1,5	NE
3 avril 1993	22:25:59	Creighton	1,5	NE
15 avril 1993	00:07:16	Campbell	1,7	NE
28 avril 1993	08:03:23	Creighton	1,5	2,2
29 avril 1993	15:26:12	Creighton	1,8	NE
8 mai 1993	14:57:12	Creighton	1,9	1,9
8 mai 1993	20:12:41	Creighton	2,6	2,5
12 mai 1993	21:03:21	Creighton	1,5	NE
14 mai 1993	08:05:12	Creighton	1,8	NE
14 mai 1993	08:07:12	Creighton	1,8	NE
5 juin 1993	22:13:06	Creighton	1,5	NE
8 juin 1993	17:02:10	Creighton	1,5	2,0
15 juin 1993	14:32:39	Creighton	2,6	2,7

Tableau 3.2 Événements sismiques induits par l'exploitation minière (m_N >1,5) dans le nord de l'Ontario entre le 15 juin 1993 et le 31 décembre 1993. Ces événements ont été enregistrés par les systèmes de surveillance macrosismique de CANMET, par le Réseau sismographique numérique de CANMET et par le réseau de la CGC respectivement.

Nota : NE : événements non enregistrés; NC : la CGC n'a pas été contactée, magnitude habituellement de m_N<2; IMP : la détermination de la magnitude s'est avérée impossible d'après les données disponibles.

Date	Heure locale	Mine	Magnitude (m_N) CANMET – macros	Magnitude (m_N) CANMET – RSNC	Magnitude (m_N) CGC
15 juin 1993	14:32:39	Creighton	2,6	NE	2,7
15 juin 1993	22:43:29	Creighton	1,5	NE	NC
22 juin 1993	07:50:48	Creighton	1,8	NE	NE
5 juil. 1993	19:02:11	Creighton	1,4	NE	1,5
5 juil. 1993	08:17:30	Creighton	1,5	NE	1,4
27 juil. 1993	02:00:11	Creighton	NE	NE	2,3
28 juil. 1993	14:33:04	Creighton	1,7	NE	2,4 Sautage suivi d'un coup de toit
5 août 1993	22:39:51	Creighton	3,1	NE	2,9
6 août 1993	06:48:22	Creighton	1,6	NE	NC
7 août 1993	21:18:36	Creighton	2,1	NE	2,2
10 août 1993	02:51:10	Creighton	1,7	NE	NE
11 août 1993	02:29:46	Creighton	1,5	NE	NC
13 août 1993	18:24:08	Creighton	1,7	NE	NE
15 août 1993	01:03:18	Creighton	1,5	NE	NE
19 août 1993	22:49:11	Creighton	2,0	1,5	1,7
23 août 1993	08:35:55	Creighton	1,6	1,6	1,4
3 sept. 1993	14:00:25	Creighton	1,9	1,9	NE
9 sept. 1993	04:52:07	Creighton	1,6	NE	NC
13 sept. 1993	23:59:07	Creighton	SD	2,4	2,3
22 sept. 1993	16:05:50	Creighton	1,6	NE	NC
25 sept. 1993	20:37:24	Creighton	1,9	NE	1,8
27 sept. 1993	08:25:21	Creighton	1,5	1,5	NC
2 oct. 1993	00:06:39	Creighton	1,9	2,3	NE
9 oct. 1993	16:55:48	Campbell	1,5	NE	NE
12 oct. 1993	16:19:54	Creighton	2,6	2,4	2,6
17 oct. 1993	04:44:30	Creighton	2,1	1,9	1,5
19 oct. 1993	22:23:04	Creighton	2,0	2,0	2,2
22 oct. 1993	08:58:09	Creighton	1,8	2,1	NE
26 oct. 1993	20:56:17	Creighton	1,8	2,1	NE
5 nov. 1993	03:43:21	Creighton	1,8	2,3	2,4
5 nov. 1993	22:23:22	Creighton	2,8	2,9	2,8
7 nov. 1993	09:15:47	Fraser	–	2,4	NE
19 nov. 1993	15:54:34	Creighton	1,5	NE	NE
20 nov. 1993	03:56:34	Campbell	1,9	NE	NE
23 nov. 1993	23:22:23	Lockerby	–	2,0	1,8
26 nov. 1993	08:20:38	Macassa	2,4	2,9	2,8
26 nov. 1993	08:20:45	Macassa	2,1	2,4	2,5
26 nov. 1993	08:20:47	Macassa	1,7	1,7	1,7
30 nov. 1993	17:28:51	Creighton	1,5	1,7	1,9
2 déc. 1993	12:36:13	Creighton	2,2	2,2	2,5
2 déc. 1993	12:31:34	Creighton	2,4	2,4	2,6
6 déc. 1993	16:11:40	Stobie	–	2,3	2,4
7 déc. 1993	23:32:16	Stobie	–	1,6	NE
20 déc. 1993	02:41:11	Creighton	1,6	NE	1,6
31 déc. 1993	12:31:34	Creighton	2,3	NE	NE

Tableau 3.3 Événements sismiques induits par l'exploitation minière (m_N >1,5) dans le nord de l'Ontario entre le 1er janvier 1994 et le 31 décembre 1994. Ces événements ont été enregistrés par les systèmes de surveillance macrosismique de CANMET, par le Réseau sismographique numérique de CANMET et par le réseau de la CGC respectivement.

Nota : NE : événements non enregistrés; NC : la CGC n'a pas été contactée, magnitude habituellement de m_N<2; IMP : la détermination de la magnitude s'est avérée impossible d'après les données disponibles.

Date locale	Heure	Mine	Magnitude (m_N) CANMET – macros	Magnitude (m_N) CANMET – RSNC	Magnitude (m_N) CGC
1er janv. 1994	19:57:27	Région de Frood-Stobie	–	1,8	1,5
6 janv. 1994	10:31:26	Creighton	1,8	1,8	NC
7 janv. 1994	22:30:17	Onaping	–	2,6	2,5
8 janv. 1994	23:35:20	Région de Frood-Stobie	–	1,8	NE
10 janv. 1994	06:24:42	Région de Frood-Stobie	–	2,1	2,1
19 janv. 1994	01:18:26	Creighton	1,8	NE	NC
19 janv. 1994	09:08:00	Kerr Addison	–	NE	2,4
19 janv. 1994	09:10:00	Kerr Addison	–	NE	2,2
19 janv. 1994	14:28:18	Creighton	1,7	NE	NC
25 janv. 1994	17:05:44	Creighton	2,0	NE	NE
13 mars 1994	20:32:02	Creighton	1,8	NE	NC
19 mars 1994	21:05:26	Creighton	1,6	NE	NC
23 mars 1994	21:09:26	Campbell	2,2	NE	2,3
23 mars 1994	21:22:04	Campbell	1,9	NE	NE
31 mars 1994	08:11:08	Creighton	2,5	2,2	2,3
2 avril 1994	08:26:30	Creighton	2,3	NE	2,0
2 avril 1994	13:32:28	Creighton	1,5	NE	NC
13 avril 1994	05:13:54	Kidd Creek	–	2,9	2,8
20 avril 1994	03:45:20	Campbell	1,5	NE	NE
14 mai 1994	12:59:35	Creighton	2,4	2,6	2,6
17 mai 1994	01:03:44	Creighton	1,6	1,9	NC
7 juin 1994	03:05:30	Creighton	1,6	1,9	NC
13 juin 1994	11:50:30	Strathcona	–	1,9	NE
3 août 1994	00:44:16	Creighton	1,6	NE	NC
7 août 1994	23:17:47	Creighton	1,8	NE	1,6
9 août 1994	11:06:53	Creighton	1,7	1,6	NC
13 août 1994	01:00:58	Creighton	1,7	1,9	NC
30 août 1994	14:58:07	Creighton	2,0	NE	1,7
30 août 1994	15:34:27	Creighton	1,5	NE	NC
31 août 1994	03:17:04	Creighton	2,9	2,9	3,1
10 sept. 1993	14:33:09	Macassa	1,5	NE	NC
20 sept. 1994	09:13:08	Creighton	3,2	2,9	2,9
20 sept. 1994	09:13:22	Creighton	2,0	1,9	NE
20 sept. 1994	21:15:45	Creighton	1,6	NE	NC
21 sept. 1994	02:26:19	Creighton	–	2,9	2,5
3 oct. 1994	00:55:24	Creighton	2,9	3,0	2,9
3 oct. 1994	10:13:28	Creighton	1,6	NE	NC
9 oct. 1994	22:18:09	Creighton	1,5	NE	NC
23 oct. 1994	04:54:51	Creighton	2,5	2,5	2,1
23 oct. 1994	23:19:47	Creighton	1,6	1,5	NC
26 oct. 1994	23:45:03	Campbell	1,5	NE	NE
31 oct. 1994	15:42:52	Campbell	2,6	NE	2,8
2 nov. 1994	09:15:44	Creighton	1,6	NE	NC
24 nov. 1994	20:00:14	Creighton	1,5	NE	NC
5 déc. 1994	08:24:37	Creighton	2,7	2,7	2,6
9 déc. 1994	08:52:46	Creighton	1,9	2,0	NC
18 déc. 1994	17:50:22	Creighton	3,0	2,7	2,8
19 déc. 1994	11:02:42	Creighton	2,1	1,7	NE
19 déc. 1994	23:50:29	Creighton	2,4	1,6	NC
20 déc. 1994	15:09:00	Kidd Creek	–	2,2	2,2
20 déc. 1994	16:19:16	Creighton	1,5	NE	NC
25 déc. 1994	07:56:35	Macassa	2,3 à 2 sites	2,7	2,5

3.8 Références

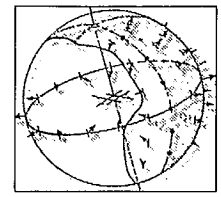
Hedley, D.G.F. (1992). *Manuel des coups de toit dans les mines de roches dures de l'Ontario.* CANMET, Rapport spécial SP92-1F. 305 p.

Mottahed, P. (1991). *A Report on the Seismograph Stations Operated by CANMET and a Proposal for Modification and Communication of Data.* CANMET, Rapport interne.

Plouffe, M., Cajka, M.G., Wetmiller, R.J. et Andrew, M.D. (1990). «The Sudbury Local Telemetered Network». *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines*, pp. 221-226.

Pritchard, C.J. et Talebi, S. (1994). *The Upgraded Sudbury Local Telemetered Network (SLTN): The First Year of Operation (93-94).* CANMET, Rapport de division MRL 94-053(TR), p.33.

Talebi, S., Pritchard, C.J. et Mottahed, P. (1994). *Rockburst Activity in Northern Ontario: September 1992-December 1994.* CANMET, Rapport de division MRL 94-071 (TR), p.15.



Système macrosismique de CANMET et logiciel d'analyse des ondes

4.1 Introduction

Les systèmes de surveillance microsismique qui avaient été installés pour la couverture locale des événements sismiques dans les mines avant la première phase du projet de recherche sur les coups de toit comportaient plusieurs limites. Même si ces systèmes fournissaient des données de temps d'arrivée fiables permettant de localiser les événements, ils n'étaient pas conçus pour enregistrer les signaux sismiques et déterminer de manière fiable la magnitude des événements.

L'un des mandats de CANMET consistait à répondre à ce besoin par la conception et l'installation de systèmes de surveillance sismique de nouvelle génération appelés systèmes de surveillance macrosismique. Pendant la première phase du projet de recherche sur les coups de toit, ces systèmes ont été installés dans cinq mines en Ontario, soit à la mine Strathcona de la Falconbridge, à la mine Creighton de la société Inco (ces deux mines se trouvent dans le Bassin de Sudbury), à la mine Quirke de la Rio Algom à Elliot Lake, à la mine Campbell de la Placer Dome à Balmerton et à la mine Macassa de Minerais Lac à Kirkland Lake.

Ces systèmes ont été conçus comme outils de recherche pour mieux comprendre le phénomène des coups de toit en enregistrant des signaux sismiques complets. Ils visent également à calculer la localisation de la source et à déterminer la magnitude de l'événement dans le but d'étudier les paramètres de la source sismique.

4.2 Système macrosismique de CANMET

Au moment de la conception, de la fabrication et de l'installation du nouveau système macrosismique, un ensemble de logiciels ont été élaborés pour faciliter l'enregistrement et l'analyse des données quotidiennes. Dans le présent chapitre, nous examinerons ces deux sujets, soit le système macrosismique et le logiciel d'analyse des signaux sismiques.

4.2.1 Revue historique des systèmes macrosismiques en Ontario

À l'origine, ces systèmes comportaient cinq capteurs triaxiaux situés à environ un kilomètre d'une zone minière sujette à des coups de toit. L'échelle de magnitude ciblée, sans saturation des capteurs, allait de 0,5 à 2,5 m_N, alors que la réponse en fréquence se situait généralement entre 1 et 2 500 Hz. L'unité d'acquisition des données se trouvait sur le site minier et toutes les données enregistrées étaient traitées au Laboratoire d'Elliot Lake de CANMET, puis au Laboratoire de Sudbury. Ces systèmes étaient accessibles à distance par des modems, ce qui permettait le transfert des fichiers de données et la surveillance à distance du système.

En mars 1987, le premier système de surveillance macrosismique était installé en surface à la mine Quirke de la Rio Algom près d'Elliot Lake. Le système a été mis au point par le Centre de recherches Noranda de la Noranda Mines Ltd (Labuc et al., 1987). À l'origine, c'est-à-dire entre mars 1987 et juin 1987, le système comportait cinq accéléromètres triaxiaux ADR-711 montés en surface (Kestle, 1983). Après cette période, comme la foudre avait détruit un certain nombre de fois ces capteurs, ceux-ci ont été remplacés par des géophones Geospace GS-40B de 8 Hz, de sensibilité de 0,27 V/cm/sec, et dont la capacité de mouvement du bâti par rapport au bobinage était de 0,18 cm.

La fréquence des signaux reçus par les capteurs était modulée; les signaux étaient multiplexés et envoyés par fibre optique à un ordinateur central où ils étaient convertis en électricité, démultiplexés, filtrés puis numérisés par un mini-ordinateur (précision de 16 bits) à 1 000 points par seconde pendant 0,8 sec, y compris un prédéclenchement de 0,2 sec. Les événements étaient considérés comme valides et enregistrés si l'amplitude de 9 des 15 canaux dépassait le seuil établi. En pareil cas, les 15 canaux de données étaient archivés en format ASCII en un fichier pour l'analyse interactive ultérieure sur le mini-ordinateur.

Au cours de la même période, le deuxième système macrosismique a été installé à la mine Strathcona. Le système comportait 5 accéléromètres triaxiaux, de modèle S-100, fabriqués par Télédyne-Geotech et ayant une réponse en fréquence allant de 0,01 à 2 000 Hz. La sensibilité à la sortie du montage accéléromètre/amplificateur était de 20 V/g. Trois des capteurs étaient installés en surface et deux sous terre aux niveaux 2 375 et 2 750; les signaux sismiques étaient transmis par un câble électrique à l'unité de traitement en surface. Le système avait été mis au point par la firme Instantel Inc., située à Kanata. Le système d'acquisition des données comportait 5 unités individuelles de traitement des signaux et le signal reçu par chaque capteur était numérisé au taux de 4 kHz/canal, avec une précision de 12 bits, et les signaux étaient temporairement archivés dans une zone tampon. Un multiplexeur monté en série était utilisé comme interface pour chaque processeur et relié à un micro-ordinateur IBM-AT pour la manipulation et l'archivage des données.

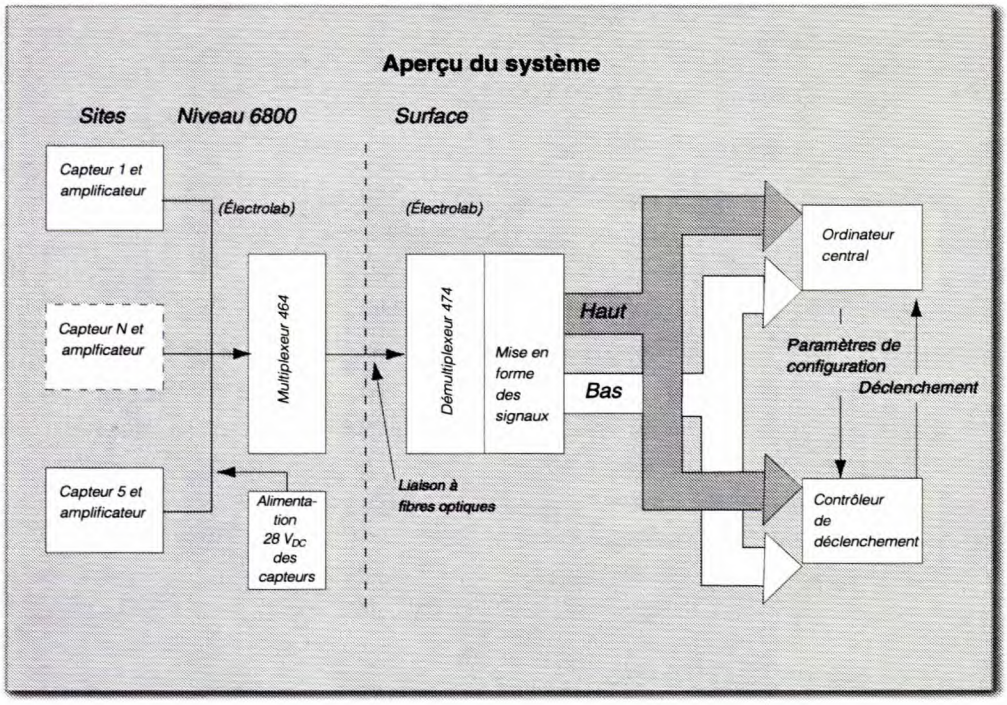
Les systèmes macrosismiques des mines Macassa et Campbell ont été installés en septembre 1988 et en août 1989 respectivement. La conception des deux systèmes était identique. Les systèmes comportaient 5 géophones triaxiaux à grande capacité de mouvement, de modèle 1130, fabriqués par Electro-Lab et comprenaient un amplificateur programmable (0 à 60 dB). Tous les capteurs étaient souterrains. Leur sensibilité était de 0,30 V/cm/sec alors que leur réponse en fréquence allait de 1 à 2 700 Hz.

À ces sites, les signaux sismiques étaient amplifiés à chaque capteur et transmis par câble électrique à l'unité d'enregistrement située en surface. Les signaux étaient alors conditionnés au moyen de filtres anti-aliasing et enregistrés. Toutefois, les mécanismes de déclenchement et d'enregistrement étaient tous deux basés sur la technologie Gould et n'étaient pas conçus pour ce type d'application. Le système était basé sur une précision de 8 bits seulement et était conçu pour être déclenché par un seul canal présélectionné. Dans plusieurs cas, les limites du système n'ont pas permis d'enregistrer des événements sismiques importants.

Le dernier système de surveillance sismique a été installé en mars 1991 à la mine Creighton. La conception de ce système est essentiellement la même que celle des systèmes des mines Macassa et Campbell, les principales différences étant les suivantes : le système de la mine Creighton utilisait une amplification double pour obtenir une plus grande réponse dynamique afin d'éviter la saturation lors d'événements sismiques plus importants, et les données étaient transmises par des câbles de fibre optique dans l'un des puits de la mine Creighton, un multiplexeur et un démultiplexeur se trouvant à chacune des extrémités du câble (figure 4.1). Le système comportait cinq capteurs triaxiaux à forte capacité de mouvement, installés entre les niveaux 5 400 et 7 000 afin de couvrir principalement les gisements 400 et 403.

Plusieurs problèmes sont survenus lors de l'installation du système macrosismique à la mine Creighton. L'installation du câble de fibre optique a pris presque deux ans, ce qui a retardé l'installation du système. De plus, le système, et plus particulièrement l'unité d'enregistrement conçue par Electro-Lab n'a pas fonctionné correctement et il a fallu la remplacer après quelques mois par une unité Gould.

Figure 4.1 Aperçu du système macrosismique de CANMET – mine Creighton



4.2.2 Revue historique des systèmes macrosismiques : le concept original

Comme mentionné plus tôt, les systèmes installés représentaient un regroupement de différentes technologies comme la fibre optique et les câbles électriques, les accéléromètres et les géophones, les amplificateurs à gain double ou à gain simple, les convertisseurs analogiques/numériques dont la précision allait de 8 à 16 bits, plusieurs mécanismes différents de déclenchement, des ordinateurs centraux allant du PC d'IBM aux mini-ordinateurs, des capteurs installés en surface ou sous terre, des technologies mises au point par différents fabricants et divers logiciels. La diversité des composants rendait l'entretien très difficile.

Le principal inconvénient de ces systèmes était lié à leurs limites ou à leur complexité dans certains cas. Aucun d'eux ne permettait d'atteindre les principaux objectifs visés, soit la fiabilité, la flexibilité, l'efficacité et la simplicité. Cette situation justifiait une nouvelle approche en matière de surveillance des signaux sismiques.

En se fondant sur l'expérience et le savoir acquis avec les systèmes mis en place, il a été décidé de concevoir et de fabriquer un système macrosismique au Laboratoire d'Elliot Lake de CANMET. En plus d'atteindre les objectifs visés et la sensibilité de sortie précitée, le système permet également d'éliminer les problèmes. Les principales exigences relatives à la conception du nouveau système étaient les suivantes :

- mécanisme de déclenchement intelligent,
- paramètres du système programmables,
- élimination des pointes de tension électrique,
- acquisition de données en mode continu et non continu,
- progiciel de communication fiable pour ce qui est de l'accès à distance,
- système d'exploitation en temps réel de haute performance,

- précision et extensibilité,
- adaptabilité à divers types de capteurs,
- calcul automatique de la magnitude en temps réel,
- convivialité du logiciel d'analyse des signaux sismiques.

En mai 1991, la première version du système proposé était terminée avec succès et mise à l'essai. Elle a été suivie d'une version à sécurité intrinsèque centralisée et portative destinée aux mines de charbon.

4.2.3 Amélioration des systèmes macrosismiques de l'Ontario

En mai 1991, les enregistreurs de signaux sismiques Gould, qui étaient désuets et utilisés comme unités de déclenchement et d'enregistrement, ont été remplacés par le nouveau dispositif de déclenchement de CANMET, par un convertisseur analogique/numérique de 12 bits en vue d'une meilleure précision et par un ordinateur plus puissant à titre d'unité d'enregistrement et d'archivage. En outre, un nouveau système haute performance d'exploitation multitâches en temps réel de 32 bits appelé QNX a été mis en place à titre de nouveau système d'exploitation de l'ordinateur. Ce système offre un environnement plus fiable pour les communications à distance. Le système macrosismique installé à la mine Creighton a également été amélioré avec succès en février 1992 en faisant appel à la même technologie. En novembre 1992, deux des cinq systèmes installés dans les mines de l'Ontario avaient été enlevés. La fermeture imminente de la mine Quirke de la Rio Algom a mené à l'arrêt du système macrosismique. Les négociations entre la Rio Algom et la Denison Mines (cette dernière devait également être fermée en juin 1993) n'ont pas abouti et le système a été enlevé en mai 1991. Dans le cas de la mine Strathcona de la Falconbridge, l'installation du système amélioré a été retardée par de nombreux problèmes, en partie causés par les contraintes opérationnelles, et le système n'a pas atteint les objectifs fixés. La fermeture de la mine a nécessité l'enlèvement du système en novembre 1992. Il est à noter que le système a toutefois enregistré les premières données sismiques complètes du site, que la Queen's University a utilisées par la suite dans le projet de mécanisme au foyer (Trifu et al., 1995).

4.2.4 Cueillette de données macrosismiques

En 1992, les trois systèmes encore en place (c'est-à-dire les systèmes des mines Macassa, Campbell et Creighton) ont été entièrement mis à jour à l'aide de la technologie de CANMET dans le but d'améliorer la capacité d'enregistrement des données. Par exemple, depuis février 1992 à la mine Creighton, le système de CANMET a enregistré plus de 925 événements sismiques dont la magnitude se situait entre 0,5 et 3,5 m_N (annexe II) et 5 500 événements générés par le sautage. Les magnitudes sont déterminées par l'intégration de l'énergie sismique enregistrée à l'aide des capteurs triaxiaux. Les valeurs calculées sont corrigées pour tenir compte de la distance puis converties à une échelle empirique de magnitude de Nuttli. Tel qu'indiqué à l'annexe II, les magnitudes fournies par le système de CANMET (première colonne) sont comparables à celles publiées par la Division de géophysique de la CGC (Ottawa) et comparables aux valeurs du Réseau sismographique numérique de CANMET (RSNC) (deuxième colonne), ce qui démontre la cohérence des données déduites.

Pendant la même période, le système de la mine Macassa a enregistré plus de 220 événements sismiques dont 175 avaient une magnitude entre 0,0 et 2,9 mN (annexe II) et 2 950 événements générés par des activités de dynamitage. À la mine Campbell, plus de 4 700 événements ont été enregistrés, dont 78 événements sismiques ayant une magnitude entre 0,0 et 2,8 m_N et les autres ont été générés par des sautages (annexe II). Comme nous l'avons mentionné plus tôt, tous les fichiers de données recueillies, y compris les données de sautages, ont été transférés par modem au Laboratoire d'Elliot Lake de CANMET, et ensuite au Laboratoire de Sudbury, aux fins de l'analyse, et les résultats ont été communiqués au site minier pour y être utilisés. En vertu de l'entente, CANMET était également responsable de l'entretien de tous les systèmes ainsi que de la mise à jour et de la publication de la banque de données.

4.2.5 Amélioration du système sismique de CANMET

Depuis novembre 1994, le système sismique de CANMET s'est grandement amélioré. Il a aujourd'hui la capacité de passer de 16 à 32 canaux par le simple ajout à l'ordinateur central d'autres convertisseurs analogiques/numériques ou d'autres dispositifs de déclenchement. Le prélèvement automatique en temps réel des temps d'arrivée, la localisation de la source et la détermination de la magnitude font maintenant partie des opérations d'acquisition de données du système. Une trousse d'analyse des données qui a été portée sur la plateforme Windows du QNX pourrait également être ajoutée au système. En outre, le système de CANMET a la capacité de s'adapter à une grande variété de capteurs (accéléromètres, géophones et hydrophones) uniaxiaux et triaxiaux. La capacité d'utiliser différents types de capteurs dans le même système confère au système la souplesse nécessaire pour satisfaire aux besoins d'une grande diversité d'applications.

Même si par le passé, les capteurs utilisés dans le système étaient fabriqués principalement par Electro-Lab ou Teledyne Geotech, la conception et la fabrication des géophones et des amplificateurs a été intégrée aux activités du groupe de sismologie de CANMET et de nombreuses unités ont été conçues, fabriquées et installées dans différents environnements miniers.

4.2.6 Détails techniques du système sismique de CANMET

4.2.6.1 Exigences relatives au matériel

Le système est conçu pour fonctionner avec tout ordinateur IBM 386 ou supérieur ou tout autre ordinateur compatible IBM ayant au moins deux lecteurs ISA et un mode d'interruption du matériel (de 3 à 7). Pour les systèmes à plus de 16 canaux, on recommande un PC monté sur support. Cette configuration permet d'utiliser un grand nombre de lecteurs ISA afin d'allouer jusqu'à 64 canaux d'enregistrement et faciliter le remplacement de la carte de l'UCT si nécessaire.

Le tableau 4.1 précise les exigences de base recommandées pour le matériel informatique.

Bien que les exigences minimales conviennent à un petit système, il est fortement conseillé de considérer une plateforme plus puissante pour exploiter toutes les capacités du système, surtout si l'acquisition de données en continu est requise (c'est-à-dire sans temps d'arrêt entre des événements successifs).

Les choix en matière de mémoire et de disque dur devraient être fondés sur le taux d'échantillonnage souhaité, la fenêtre de déclenchement et le mode d'acquisition de l'événement car ce sont là des facteurs qui déterminent la taille du fichier de données.

4.2.6.2 Mécanisme de déclenchement

L'une des caractéristiques propres au système d'acquisition de données de CANMET est son mécanisme de déclenchement. Conçu et élaboré sur place, le mécanisme est basé sur une fenêtre de déclenchement qui est amorcée lorsqu'un des canaux dépasse le seuil de déclenchement spécifié lors de la configuration du système. Une fois que la durée allouée à la fenêtre de déclenchement s'est écoulée, le nombre de canaux est alors comparé au nombre minimal de canaux prédéterminé pour un déclenchement valide. Si les deux exigences sont respectées, l'événement est enregistré.

Tableau 4.1 Exigences de base recommandées pour le matériel informatique

Ressource	Exigences minimales	Exigences recommandées
UCT	386DX 20 MHz	486DX2 66 MHz
Mémoire	4 mégaoctets	8 mégaoctets
Disque dur	200 mégaoctets	500 mégaoctets
Disque souple	3½", 1,4 mégaoctets	Même
Ports	1 série, 1 parallèle	Même
*Imprimante	à matrice de points, 24 aiguilles	Même
*Traceur	PostScript	Même
*Modem	9 600 bauds	14 400 ou 28 800 bauds

*=> *facultatif*

Cette technique de déclenchement a été mise au point afin d'éliminer l'enregistrement des événements sismiques de très faible magnitude. Elle permet aussi d'éviter que le bruit engendré par l'équipement d'extraction minière ou les pointes de tension électrique induite ne déclenchent le système tout en permettant que des événements sismiques importants soient enregistrés et archivés sur le disque dur.

Le mécanisme de déclenchement possède les paramètres logiciels configurables suivants :

- niveau de déclenchement de 5 à 90 % de la capacité du convertisseur analogique/numérique,
- durée de la fenêtre de déclenchement, entre 25 et 500 ms,
- nombre de canaux pour un déclenchement valide (1 à 15).

4.2.6.3 Logiciel d'acquisition

Le logiciel d'acquisition fonctionne sur la version 4.21 de QNX© et est entièrement rédigé en langage C. Bien qu'il puisse fonctionner dans un environnement Windows QNX, il a été conçu pour fonctionner de façon autonome sur des ordinateurs portatifs et pour être utilisé dans des systèmes intégrés, comme dans la version destinée aux ordinateurs portatifs.

Le progiciel est composé de plusieurs modules, comme indiqué au tableau 4.2. Les quatre premiers modules sont requis pour exécuter l'acquisition, alors que les autres modules sont utilisés à part pour configurer le système et procéder aux fonctions d'entretien.

Le programme d'acquisition principale (DAC) est au coeur du système. Il gère le lancement et le démarrage des trois autres modules afin d'activer l'acquisition et a donc la charge de la détection et de l'archivage des événements dans la mémoire.

Le programme d'acquisition secondaire (DAC_SON) est appelé par le DAC pour enregistrer sur disque les événements qui se trouvent en mémoire une fois acquis.

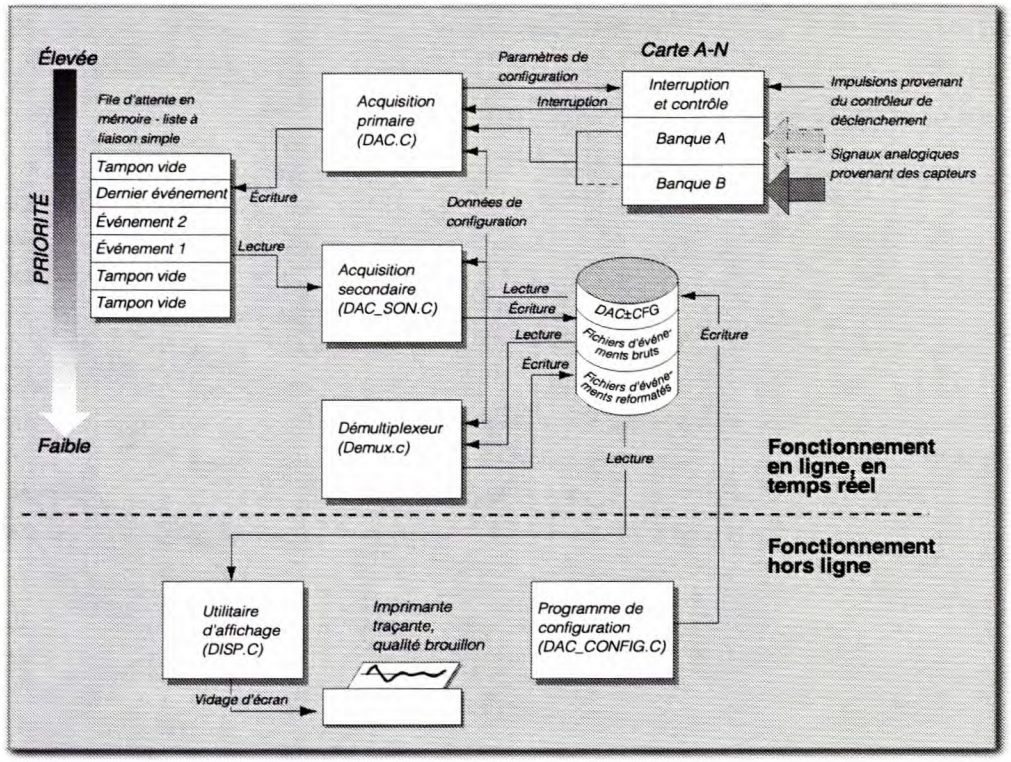
La tâche de démultiplexage (DEMUX) est alors appelée pour lire les données brutes sur le disque et les reformater dans un fichier avec un en-tête adéquat de façon que le logiciel d'analyse (SEI-CAN) ou l'unité d'affichage (DISP) puisse les lire et les afficher sur écran. Le module de localisation (LOCATE), utilisé pendant le démultiplexage, permet un prélèvement automatique en temps réel des temps d'arrivée pour calculer la localisation de la source et déterminer la magnitude de l'événement.

La circulation et l'interaction des données entre ces divers modules du programme sont illustrées à la figure 4.2. Chaque programme est autonome et fonctionne par priorité. Les tâches ayant la plus haute priorité se retrouvent en haut de la figure.

Le programme de configuration (DAC_CONFIG) permet à l'utilisateur d'établir tous les paramètres d'acquisition (matériel et logiciel) en tenant compte des conditions particulières de l'application. La configuration est effectuée soit en mode opérateur ou en mode technique. Le mode opérateur est utilisé uniquement pour établir la sensibilité du système en modifiant le niveau et les canaux de déclenchement. Le mode technique est accessible par mot de passe et est utilisé lors de la mise en place du système pour en établir les paramètres particuliers comme le taux d'échantillonnage, l'intensité et la durée de l'événement, le prédéclenchement, la fenêtre de déclenchement, le mode d'acquisition, les filtres anti-aliasing et d'autres paramètres, y compris les coordonnées du capteur et les facteurs de calibration. Les paramètres d'acquisition sont choisis par l'utilisateur à l'aide d'un menu qui avise ce dernier si les paramètres sélectionnés sont incompatibles.

Les cinq derniers modules (*) sont facultatifs et utilisés pour l'entretien et le dépannage.

Figure 4.2 Diagramme décrivant le logiciel d'acquisition des données ainsi que les interactions entre les différents modules du programme



4.2.6.4 *Commandes d'opération*

L'unité d'acquisition des données sismiques utilise plusieurs ressources qui, liées au système d'exploitation, fournissent à celui-ci des outils puissants destinés à son entretien.

L'accès à distance au système repose entièrement sur des commandes du système relatives à la liaison avec le modem, aux procédures d'entrée dans le système, au transfert de fichiers et à l'ordonnancement. L'environnement multitâches permet d'effectuer ces tâches sans interrompre l'acquisition de données.

Le tableau 4.3 donne la liste des commandes les plus importantes du système.

La commande modem est habituellement installée lors du processus d'initialisation du système et demeure active en tout temps.

Tableau 4.2 Flux de données et interaction entre les divers modules du programme

Programme	Description
DAC	Acquisition principale
DAC_SON	Acquisition secondaire
DEMUX	Démultiplexeur de l'événement
LOCATE	Localisation de la source et magnitude
DAC_CONFIG	Configuration
*SIMUL	Simulateur d'événement
*USER_EXEC	Exécution du menu principal
*MONITOR	Unité de surveillance audio
*DISP	Unité d'affichage – dépannage de base
*ARCHIVER	Unité de tassement et d'archivage des données

Tableau 4.3 Liste des commandes les plus importantes du système

Commande	Description
modem	Surveille et commande toutes les fonctions liées au modem
qtalk	Permet la communication et l'émulation du terminal par modem
qcp	Assure un protocole de transfert de fichiers efficace
ditto	Permet un accès interactif à distance, partagé avec n'importe quel pupitre (prend le relais de l'écran et du clavier)
cron	Constitue une unité d'ordonnancement permettant d'activer des commandes à des moments spécifiques

La commande qtalk sert à l'usager au besoin pour commencer une liaison avec un système à distance (pourrait être un ordinateur fonctionnant en DOS).

La commande qcp est un protocole particulier de transfert de fichiers QNX©. On utilise également le populaire protocole de transfert de fichiers X-Y-ZMODEM de l'environnement DOS.

La commande ditto est une caractéristique intéressante car elle permet à un utilisateur à distance de prendre littéralement le relais d'un pupitre de commande du système (écran virtuel et clavier associé), ce qui permet à l'utilisateur à distance d'effectuer n'importe quelle tâche comme s'il se trouvait à cet endroit, comme la configuration des paramètres du système, la commande de l'acquisition des données, y compris l'initialisation de la machine à distance. Seuls des programmes comme le programme d'analyse des ondes (SEI-CAN) et l'unité d'affichage des ondes (DISP) ne peuvent être exploités à distance puisqu'ils fonctionnent en mode graphique. Cette commande est particulièrement utile pour vérifier l'état du système d'acquisition de données ainsi que le résumé de l'activité enregistrée qui comprend l'établissement des paramètres d'acquisition des données, les données relatives aux événements enregistrés et l'heure à laquelle ils se sont produits, l'endroit, la magnitude, etc. Cette information est affichée sur le pupitre principal lorsque les programmes d'acquisition des données sont exécutés.

La commande cron est une méthode utile pour exécuter les commandes à des moments spécifiques sans que l'intervention de l'opérateur soit requise. Elle exige que le programme de l'horloge soit exécuté en tâche de fond.

Le système prévoit également un processus automatique d'initialisation du système qui initialise toutes les fonctions d'acquisition des données après une panne de courant. En outre, il comporte un système de mots de passe qui permet d'éviter que les fichiers soient manipulés par des utilisateurs inexpérimentés.

4.2.6.5 Capteurs

Le choix d'un capteur est déterminé par le type d'application et par les caractéristiques des événements sismiques à enregistrer. Le système sismique de CANMET convient à différents types de capteurs acoustiques uniaxiaux ou triaxiaux (accéléromètres, géophones ou hydrophones). L'utilisation simultanée de différents types de capteurs dans le même système confère à celui-ci une flexibilité lui permettant de répondre aux exigences d'une grande variété d'applications.

Les capteurs et les amplificateurs représentent souvent une partie importante du coût total du système. Pour maintenir les coûts à faible niveau, CANMET a mis au point ses propres capteurs et amplificateurs programmables qui facilitent l'installation et permettent de retirer l'unité en cas de besoin. Il est ainsi possible d'assurer la compatibilité avec le système d'acquisition de données.

Les capteurs peuvent être utilisés soit pour des systèmes à gain unique ou à double gain avec gain programmable de 6 à 64 dB en accroissements de 8, avec la possibilité de mettre hors tension soit par des bandes de court-circuit sur le site ou directement à partir du logiciel d'exploitation, selon le nombre de paires de fils électriques disponibles sur le site.

4.3 Détermination automatique de la localisation de la source et de la magnitude

Le système sismique de CANMET permet de localiser la source et de déterminer la magnitude d'événements sismiques sur le site en temps réel et automatiquement. La localisation de la source (LOCATE) est basée sur l'algorithme mis au point par CANMET (voir chapitre 5).

Outre les coordonnées de l'événement, plusieurs facteurs de qualité associés à la précision et à la fiabilité de la localisation de la source sont également considérés. Ces facteurs comprennent notamment la sensibilité de la résiduelle et le classement de l'événement.

La résiduelle de l'événement dépend totalement de la différence entre les temps d'arrivée observés et calculés; il s'agit là du critère le plus important pour mesurer la précision de la localisation. La sensibilité mesure la stabilité de la solution, définie comme étant la distance entre une source localisée et la position obtenue en supposant une vitesse plus petite de 10 %. Pour les deux paramètres, une valeur plus faible indique une meilleure solution. Le classement de l'événement est une combinaison de ces facteurs de qualité. Il tient également compte de la séquence. Ce facteur de qualité, qui ne peut être affiché sur écran, compare les séquences observées et calculées et détermine l'importance de la différence. Le classement comporte cinq classes (A, B, C, D, Z), A indiquant une très bonne cote alors que Z signifie que l'événement ne peut être localisé.

Le calcul de la magnitude est fondé sur l'intégration de l'énergie sismique enregistrée à l'aide des capteurs triaxiaux. La valeur calculée est corrigée pour tenir compte de la distance puis convertie en une échelle empirique de magnitude de Nuttli. Dans le cas des systèmes qui ne comportent pas de capteurs triaxiaux, l'énergie sismique est corrigée pour tenir compte de la distance.

L'annexe I illustre le schéma du circuit du système macrosismique de CANMET.

4.4 Logiciel d'analyse des ondes

Dans le cadre des deux premières phases du programme de recherche sur les coups de toit, CANMET a entrepris l'élaboration d'un logiciel d'analyse des signaux sismiques. Le logiciel comporte un certain nombre de caractéristiques, notamment la localisation de la source, la détermination de la magnitude et la capacité de calculer les paramètres sismiques après avoir déterminé la localisation de l'événement. Cet outil de recherche peut fonctionner aux sites miniers et est très facile à utiliser. Ce logiciel a été mis au point dans le but d'analyser les données sismiques enregistrées par les unités macrosismiques de CANMET.
Il comporte plusieurs caractéristiques intéressantes, notamment :

- visualiser les signaux sismiques;
- prélever manuellement les temps d'arrivée;
- optimiser la localisation de la source et la détermination des paramètres sismiques;
- calculer la magnitude, l'énergie sismique et la vitesse maximale des particules;
- choisir des menus pour les histogrammes de distribution des événements en fonction du temps ou de la valeur de la magnitude;
- représenter graphiquement l'emplacement de l'événement sismique sur écran, en autant que les plans miniers soient disponibles dans un format de fichiers AutoCAD.

Le logiciel a bien fonctionné dans plusieurs mini-ordinateurs, comme le poste DEC-VAX© qui exploite le système VAX©, le Masscomp 5400, le Concurrent 6350 et un poste SUN, qui tous exploitent le système V de UNIX© WINDOWS. Une version abrégée du logiciel a également été adaptée à des micro-ordinateurs comme les 386 ou 486 qui utilisent le système d'exploitation du système V de SCO UNIX© WINDOWS ou celui de QNX4 WINDOWS. Pour le progiciel d'acquisition de données, le logiciel a été porté sur la plateforme Windows du QNX4. Celui-ci est commandé au moyen de menus de souris et est facile à utiliser.

Le logiciel d'analyse des ondes de CANMET comprend plusieurs programmes exécutables groupés dans les quatre catégories suivantes :

1. **Data Sorting**
2. **Data Conversion**
3. **Waveform Analysis**
4. **Mine Display**

Le programme **Data Sorting** est utilisé pour éliminer rapidement les sautages des fichiers d'événements sismiques enregistrés. On ne peut effectuer qu'une portion restreinte de l'analyse ondes à l'aide de ce programme.

Le programme **Data Conversion** est utilisé pour convertir les fichiers de données binaires brutes enregistrées dans différentes mines en format fichier standard ASCII avant l'analyse.

Le logiciel **Waveform Analysis** offre une capacité d'analyse de l'onde complète. Le menu utilitaire des graphiques est conçu pour fonctionner à l'aide d'une souris.

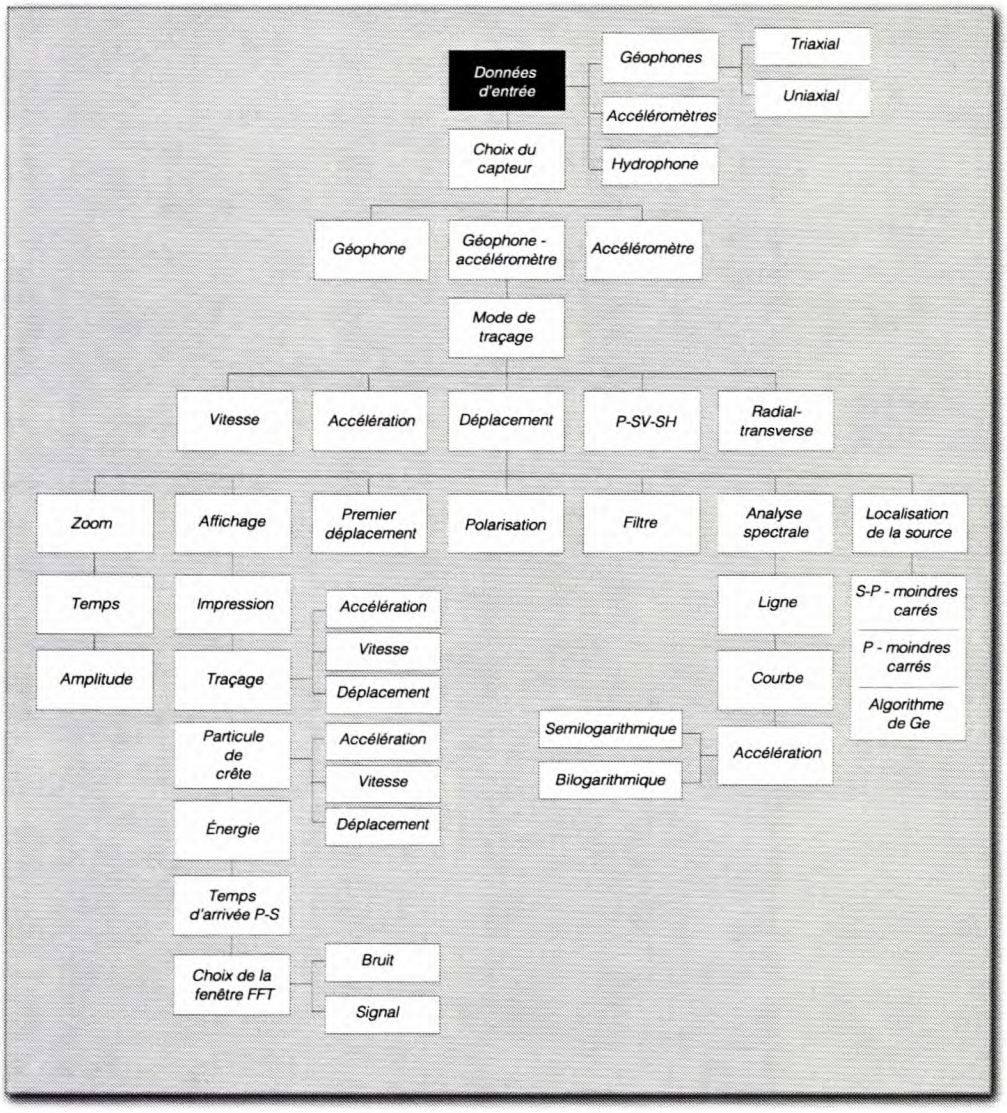
L'une des principales caractéristiques du programme, indépendamment du type d'entrées, du fait qu'elles proviennent de géophones, d'accéléromètres ou des deux, est que les formes d'ondes originales peuvent être affichées en cinq modes : accélération, vitesse, déplacement, radial-transversal et P-SV-SH. De plus, l'énergie est calculée automatiquement et archivée dans le fichier des paramètres. Si l'utilisateur le désire, il peut les afficher à l'écran.

Le programme d'analyse des ondes prévoit également diverses techniques de localisation de la source comme les méthodes des moindres carrés fondées sur les temps d'arrivée des ondes P et S-P ainsi que la méthode de localisation de la source de CANMET. La figure 4.3 illustre les différentes options offertes par ce logiciel.

L'analyse spectrale du signal d'entrée dans le domaine fréquentiel est affichée en mode déplacement dans des échelles bilogarithmiques et en mode accélération dans des échelles semi-logarithmiques et bilogarithmiques. Les paramètres sismiques sont également calculés dans le domaine temporel (Beardwood, 1993, 1994) et les valeurs sont automatiquement archivées dans des fichiers de paramètres du domaine temporel, avec la polarisation des signaux sismiques de manière qu'ils puissent être utilisés pour étudier ceux-ci.

Le logiciel offre deux versions différentes pour la détermination du mécanisme au foyer : l'algorithme *focmec* et l'algorithme *focal.* L'algorithme *focmec,* créé par le Virginia Technical College, cherche dans la sphère focale des solutions acceptables fondées sur les polarités ou sur les rapports d'amplitudes (SV/P) (Snoke et al., 1994). Pour couvrir la sphère focale, l'azimut varie de 0° à 360° et le pendage, de 0° à 90°. Tous les mécanismes au foyer possibles (jusqu'à 50) seront alors inclus si l'axe X d'Herrmann varie de 0° à 180°, ce qui représente la partie inférieure de la sphère focale. Les solutions du second quadrant sont les mêmes que celles du premier sauf que le signe de la direction du glissement diffère (figure 4.4).

Figure 4.3 Diagramme décrivant les options offertes dans le logiciel d'analyse des ondes de CANMET



La version appelée algorithme *focal,* a été élaborée par la Commission géologique du Canada (Ottawa) (Wetmiller, 1984). L'approche théorique suivie est très semblable à celle de l'algorithme *focmec.* Cependant, deux différences importantes caractérisent l'algorithme *focal :* contrairement à *focmec,* seule la meilleure solution pour le mécanisme au foyer est retenue dans le processus de calcul; l'utilisateur a la possibilité d'ajuster ou d'intégrer la solution proposée à l'égard des observations notées *in situ* pour le massif rocheux par le biais d'une série de choix dans un menu.

Le programme **Mine Display** permet à l'utilisateur d'accéder aux plans de niveaux de plusieurs mines. L'utilisateur peut représenter graphiquement un ou plusieurs plans de niveau, les agrandir et peut y ajouter l'activité sismique et l'emplacement des capteurs. Il peut également produire des histogrammes des événements sismiques à partir de n'importe quelle fenêtre de durée et de n'importe quelle échelle de magnitude. Enfin, un imprimé de n'importe quelle figure peut être obtenu (figures 4.5 et 4.6). L'annexe I donne des détails sur le progiciel et sur son mode de fonctionnement.

Figure 4.4 Tracé du mécanisme au foyer pour des données de la mine Creighton, utilisant l'algorithme du Virginia Technical College

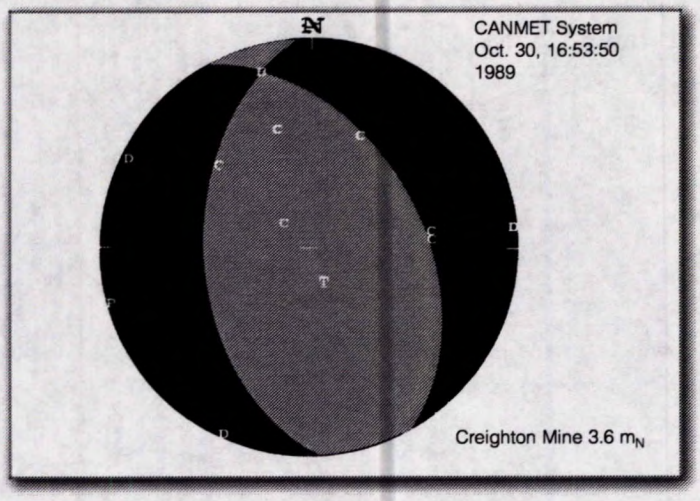


Figure 4.5 Histogramme illustrant la magnitude des événements en fonction du temps, pour des données de la mine Creighton

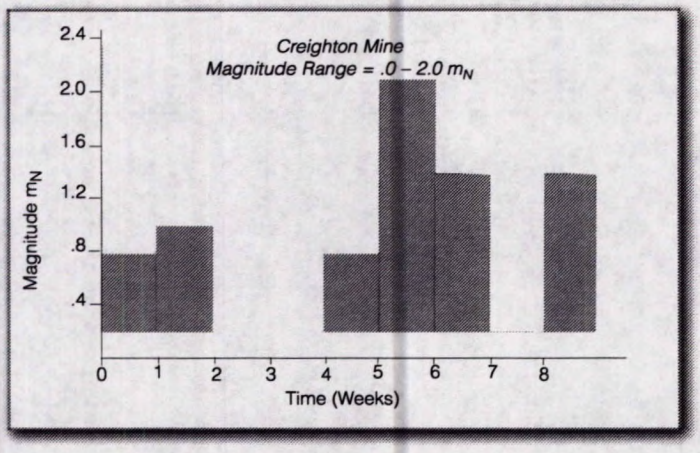
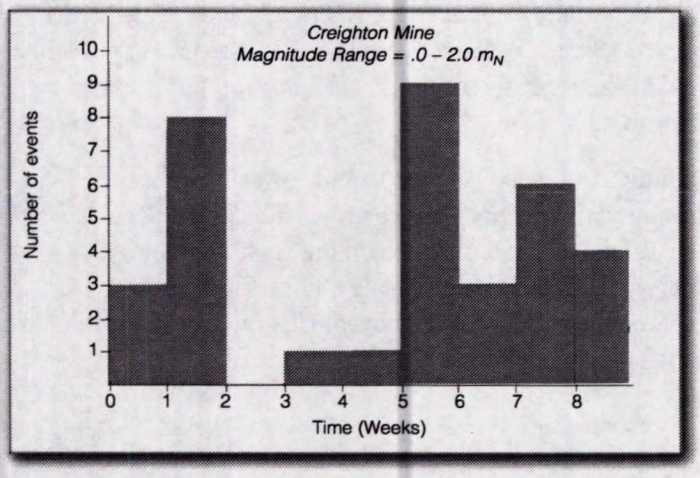


Figure 4.6 Histogramme indiquant le nombre d'événements en fonction du temps pour la mine Creighton



4.5 Références

Beardwood, F. (1993). *A Study of Wave Polarization*. Laboratoire de Sudbury, CANMET, Rapport interne, 33 p.

Beardwood, F. (1994). *A Study of Wave Polarization : Application to Macroseismic Data from Creighton Mine.* Laboratoire de Sudbury, CANMET, Rapport interne, 57 p.

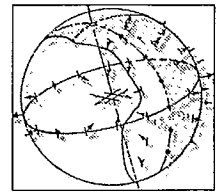
Kestle, A.M. (1983). «A Practical High Resolution Geophone». 53rd Meeting of the Society of Exploration Geophysicists, Las Vegas.

Labuc, V., Bawden, W. et Kitzinger, F. (1987). «Seismic Monitoring System Using Fibre Optic Signal Transmission». *Proceedings of the 6th International Rock Mechanics Congress,* Montréal (Québec)

Snoke, J.A., Munsey, J W., Teague, A.G. et Bollinger G.A. (1994). «A Program for Focal Mechanism Determination by Combined Use of Polarity and SV-P Amplitude Ratio Data». *Earthquake Notes* 55(3), p. 15.

Trifu, C.I., Urbancic, T.I. et Young, R.P. (1993). «Source Parameters of Mining-Induced Seismic Events: An Evaluation of Homogeneous and Inhomogeneous Faulting Models for Assessing Damage Potential». *Pure and Applied Geophysics* 145(1):3-27.

Wetmiller, R.J. Communication personnelle. Mémoire de M.Sc. (1984). University of California, Los Angeles.



Localisation des événements microsismiques

5.1 Introduction

La localisation des événements sismiques est un élément fondamental de la recherche sur les coups de toit. Lorsqu'un coup de toit survient, la première question à se poser est la suivante : «Où s'est-il produit?» L'information obtenue est la clé d'un grand nombre de décisions qui doivent être prises par la suite, comme la mise en oeuvre d'un plan de sauvetage et d'autres mesures d'urgence. Les données relatives à la localisation des événements microsismiques sont également importantes pour la conception et la planification des mines. C'est une pratique courante dans de nombreuses mines sujettes à des coups de toit d'évaluer l'efficacité des mesures de contrôle du terrain en se fondant sur la localisation des événements sismiques. En outre, il importe de connaître l'emplacement précis des sources pour toutes les études approfondies, telles la détermination de la magnitude, les mécanismes au foyer et l'évaluation des paramètres. Cette information, jointe aux connaissances en exploitation minière et en géologie, permet de déterminer les causes probables des coups de toit et de trouver la conception optimale et la planification de l'extraction qui permettront d'atténuer les effets des événements futurs.

En raison de l'importance de localiser avec précision les événements microsismiques, CANMET a lancé un programme complet de recherche visant à améliorer les techniques de localisation de la source lors de la seconde phase du Programme canadien de recherche sur les coups de toit. Le programme comprend de la recherche fondamentale sur les aspects suivants : la théorie de l'analyse automatisée des données et de la localisation de la source, la mise au point d'une technique innovatrice de localisation, et la mise en oeuvre de cette technique dans l'industrie minière. Le programme a connu un grand succès et a fourni à l'industrie minière canadienne une technologie de pointe pour la localisation des événements microsismiques dans la surveillance quotidienne des coups de toit.

Ce chapitre présente un aperçu de la théorie et des méthodes relatives à la technologie microsismique de localisation, y compris la technique automatisée de pointe de localisation mise au point récemment par CANMET.

5.2 Historique

La localisation des événements microsismiques comprend une grande variété de technologies : l'instrumentation, la géométrie du réseau de capteurs, le traitement des données, les méthodes de localisation de la source et l'analyse de fiabilité. Dans ce chapitre, le principe de localisation de la source microsismique sera d'abord illustré par un exemple simple. Ensuite, un certain nombre de notions importantes seront étudiées afin de donner une vue d'ensemble de la technique. Par la suite, plusieurs méthodes de localisation courantes de la source seront présentées. Enfin, les facteurs qui ont une incidence sur la précision de la localisation seront discutés, particulièrement la qualité des données d'entrée et la géométrie du réseau de capteurs.

5.2.1 Principes de localisation de la source

Même s'il existe différentes méthodes en matière de localisation de la source, celle de la différence entre les temps d'arrivée a été privilégiée presque exclusivement dans les études géotechniques (Hardy, 1986). Il convient donc d'utiliser cette méthode représentative pour illustrer les principes de la localisation.

La notion qui sous-tend la méthode de la différence entre les temps d'arrivée est relativement simple. Pour la mettre en application, il faut disposer d'un certain nombre de capteurs uniaxiaux installés à des endroits stratégiques où l'activité microsismique peut être enregistrée efficacement. La localisation de la source peut alors être calculée d'après la différence entre les temps d'arrivée détectés à chaque capteur, le modèle de vitesse et les coordonnées des capteurs.

Mathématiquement, cette démarche est au départ décrite par un ensemble d'équations non linéaires qui ont la forme suivante :

$$((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2)^{1/2} = v(t_i - t) \qquad (1)$$

où les inconnues x, y et z sont les coordonnées de la source; t est le temps d'origine de la source; x_i, y_i, et z_i sont les coordonnées du i^e capteur; t_i est le temps d'arrivée au i^e capteur; et v est la vitesse de propagation de l'onde de contrainte; pour i = 1, 2, ..., N+1, ..., M. Ici, N représente les dimensions géométriques du problème et M, le nombre d'équations. Pour résoudre l'équation afin de trouver la valeur des inconnues, il est clair que la condition $M \geq N+1$ doit être respectée, puisqu'il y a N+1 inconnues (x, y, z, t).

5.2.2 Notions importantes

La discussion de la méthode de localisation de la source comprend un certain nombre de notions générales en plus du schéma mathématique utilisé dans la recherche de la solution finale. Une bonne compréhension de ces notions permet de prendre du recul face aux méthodes et d'éviter la confusion que connaissent les chercheurs et les utilisateurs.

5.2.2.1 Dispositif expérimental et méthode de localisation de la source

Pour bien comprendre une méthode de localisation de la source, il est essentiel de connaître le dispositif expérimental qui y est associé. Dans la technologie de localisation des événements microsismiques, il existe deux grands dispositifs expérimentaux. La méthode la plus courante consiste à utiliser le temps d'arrivée des ondes P ou S enregistrées à l'aide de capteurs uniaxiaux ou de capteurs triaxiaux. Dans cette méthode, chaque temps d'arrivée permet d'établir une équation semblable à l'équation 1. La localisation peut alors être trouvée en résolvant l'ensemble des équations résultantes.

L'autre méthode consiste à utiliser à la fois les temps d'arrivée et les amplitudes obtenues à l'aide des capteurs triaxiaux. La localisation spatiale d'un événement peut être exprimée par la distance et par l'azimut relatif au capteur. La distance peut être calculée à partir de la différence entre les temps d'arrivée des ondes P et S et l'azimut relatif peut être déterminé par l'amplitude des trois composantes orthogonales du capteur. Une description détaillée de la procédure mathématique à suivre est donnée par Ge (1988). Le principal avantage de cette méthode est que la localisation de la source peut être déterminée avec un seul capteur, en dépit d'une ambiguité de 180°. Le problème à l'utiliser dans l'environnement minier est la grande incertitude au sujet des amplitudes étant donné l'extrême complexité des structures géologiques, des ouvertures de mines et du remblai. Il est parfois difficile également de déterminer les temps d'arrivée des ondes S. Son application dans la surveillance quotidienne est, par conséquent, très limitée.

5.2.2.2 Méthodes d'optimisation

Lorsque le nombre d'équations est plus grand que le nombre d'inconnues, la solution peut être définie statistiquement. Pour ce faire, on a généralement recours à une méthode d'optimisation. La méthode d'optimisation est en réalité la définition mathématique de l'erreur totale et la solution comportant l'erreur minimale est considérée comme étant la meilleure ou celle qui est optimale. Il existe

deux grandes méthodes d'optimisation qui sont couramment utilisées. La plus populaire est celle des moindres carrés. L'autre s'appelle la méthode de la valeur absolue; elle est de plus en plus prise en considération depuis quelques années.

La méthode des moindres carrés, connue en statistique comme la méthode de la norme L2 définit l'erreur totale comme étant la somme des carrés des erreurs individuelles. La méthode des moindres carrés est utilisée depuis longtemps en sciences et en génie pour obtenir ce qu'on appelle la solution optimale dans des problèmes surdéterminés où le nombre d'équations est supérieur au nombre de variables. D'après certaines considérations statistiques, la solution optimale est non biaisée seulement dans le cas des approximations linéaires et en supposant que les erreurs associées à chaque variable suivent une distribution de probabilité normale (Hines et Montgomery, 1980; Burden et al., 1981). Il en découle que des observations plus nombreuses mèneront à une meilleure solution étant donné que la probabilité est beaucoup plus faible qu'un plus grand groupe d'observations biaise la distribution normale. C'est pourquoi l'utilisation d'un plus grand nombre de capteurs que le nombre exigé peut conduire à une meilleure précision de la localisation de la source.

La méthode de la valeur absolue, dite de la norme L1, définit l'erreur totale comme étant la somme des valeurs absolues des erreurs individuelles. L'argument en faveur de la méthode de la valeur absolue est que les erreurs peuvent ne pas suivre une distribution normale et, ainsi, une erreur importante peut dominer les calculs lorsque le nombre d'observations est petit et que la méthode des moindres carrés est utilisée.

Il est important de comprendre que la différence fondamentale entre les différentes méthodes d'optimisation réside dans la définition de l'erreur totale. Cette différence est à la source de la différence existant dans l'estimation des erreurs individuelles, dans la procédure de calcul et enfin dans la solution optimale. Un examen théorique détaillé des différences entre la méthode des moindres carrés et la méthode de la valeur absolue est donné par Ge (1995).

Il est également important de comprendre qu'une solution optimale donnée par une méthode d'optimisation est la seule qui convienne à l'ensemble de données et qu'elle peut être non significative si l'ensemble de données est faible. En outre, on ne devrait jamais penser utiliser une méthode d'optimisation pour essayer d'obtenir de l'information qui n'existe pas physiquement dans l'ensemble des données. Par exemple, si un réseau est défini en deux dimensions, il y a une difficulté inhérente à obtenir la précision adéquate de la localisation dans la troisième direction. L'utilisation d'une méthode d'optimisation n'est donc pas nécessairement une garantie de trouver une solution fiable. On aura trouvé la meilleure solution seulement lorsque les données d'entrée seront raisonnablement précises et que le dispositif expérimental (géométrie du réseau) sera compatible avec le problème à résoudre.

5.2.2.3 Solution itérative et solution directe

La solution finale à la localisation d'un événement microsismique peut être trouvée de deux façons : par une méthode itérative ou directe.

La méthode itérative est une méthode de recherche numérique de la solution finale. Habituellement, une solution préliminaire (p. ex. les coordonnées et le temps d'origine) est requise pour amorcer les calculs. À la suite de certains calculs, cette solution approximative est mise à jour dans l'itération suivante. Le processus est répété jusqu'à ce qu'une solution mise à jour pour une itération simple satisfasse aux critères d'erreurs préétablis. Le résultat est alors considéré comme étant la meilleure solution. De façon générale, l'utilisation d'une méthode itérative pour trouver la solution finale offre une plus grande souplesse en raison de la nature non linéaire du problème de localisation de la source. Des exemples types de cette approche sont la méthode de Geiger et la méthode Simplex; les deux seront présentées plus loin.

La méthode de la solution directe est différente de la méthode de la solution itérative en ce que la solution finale est obtenue de manière analytique. Dans cette méthode, il n'existe aucune solution préliminaire ni processus d'itération dans les calculs. Dans la méthode directe de localisation de la source, la première étape consiste à linéariser les équations non linéaires. Les paramètres inconnus sont alors obtenus en résolvant simultanément les équations linéarisées. La méthode du USBM, qui est fréquemment utilisée pour les mines, est représentative de cette démarche.

5.2.2.4 Modèle de vitesse

Dans la localisation des événements microsismiques, le choix d'un modèle de vitesse adéquat est l'un des facteurs ayant une incidence cruciale sur la précision de la localisation. Il n'en demeure pas moins que ce facteur est le plus ardu à déterminer.

Idéalement, le modèle de vitesse devrait permettre de déterminer les principales caractéristiques du champ réel de vitesse. Dans les faits, cependant, il est très difficile d'établir un tel modèle parce que les structures géologiques et les matériaux près de la surface sont très complexes et que, dans un environnement minier, ils le sont davantage en raison de la présence de nombreuses ouvertures et de matériaux de remblai. Déterminer avec précision les diverses zones de vitesse et leurs limites dans de telles conditions est extrêmement difficile. En outre, selon la loi de Snell, le parcours de l'onde dépend d'un certain nombre de facteurs, dont l'orientation des limites des zones de vitesse, le rapport des vitesses pour les deux côtés des limites et l'angle d'incidence. Une petite déviation dans ces facteurs pourrait générer d'importantes erreurs dans les calculs ultérieurs. En raison de ces difficultés, les modèles de vitesse couramment utilisés sont considérablement simplifiés.

Plusieurs modèles de vitesse sont disponibles pour la localisation des sources microsismiques. Ces modèles sont le modèle demi-espace, le modèle multicouches, le modèle de vitesse unique et le modèle demi-espace anisotrope.

Le modèle demi-espace porte également le nom de modèle de vitesse constante. Pour ce modèle, on suppose que le milieu géologique est continu, isotrope et homogène et, par conséquent, le parcours de l'onde est considéré comme étant une ligne droite. C'est le modèle de vitesse de base utilisé pour la localisation des événements microsismiques en raison de sa simplicité et des résultats raisonnables qu'il permet d'obtenir. Toutefois, il est important de savoir dans quelle mesure ce modèle de vitesse simplifié influence la précision de la localisation et comment on peut réduire l'incidence de l'erreur relative à la vitesse initiale produite par ce modèle très simplifié.

Le modèle de vitesse multicouches suppose qu'à chaque couche parfaitement horizontale d'un ensemble superposé est associée une vitesse spécifique. Ce modèle de vitesse est principalement utilisé en géophysique pour simuler la croûte terrestre dans la localisation des tremblements de terre locaux. On ne sait pas très bien dans quelle mesure il peut être utilisé pour un environnement minier. Hardy et Mowrey (1981) ont analysé 26 événements importants enregistrés dans un réservoir de stockage de gaz souterrain à New Haven (Michigan) en se servant d'un modèle à deux couches et d'un modèle demi-espace. L'étude a démontré que les deux modèles de vitesse ont donné des résultats à peu près similaires et que, par conséquent, aucune évaluation critique ne pouvait être faite. Crosson et Peters (1974) ont fait une étude théorique de trois modèles, soit un à quatre couches, un à deux couches et un à une seule couche. Selon leur étude, les trois modèles ont permis d'obtenir des résultats similaires quant à la précision de la localisation des sources se trouvant à l'extérieur des limites du réseau. Pour les événements survenus à l'intérieur du réseau, le modèle à quatre couches ne s'est pas avéré supérieur au modèle à deux couches, mais ces derniers ont donné de meilleurs résultats que le modèle à une seule couche.

Dans le modèle de vitesse unique, qui ne traite pas en particulier des aspects détaillés du champ de vitesse, on suppose qu'il n'existe qu'une seule et même vitesse entre chaque capteur et la source de l'événement. Le modèle de vitesse unique est plus efficace que les autres modèles lorsque la région de l'activité microsismique potentielle peut être déterminée au préalable.

5.2.3 Méthodes de localisation de la source

Dans la présente partie, nous discuterons de quelques méthodes importantes de localisation ainsi que des avantages et inconvénients qu'elles présentent. Même si une méthode de localisation de la source fait appel à un grand nombre de paramètres, comme le traitement des données d'entrée, le calcul de la localisation des événements et l'évaluation de la fiabilité des solutions, elle est généralement conçue comme un algorithme visant à trouver la solution finale fondée sur les contraintes qui résultent du dispositif expérimental. Par conséquent, la discussion relative aux méthodes de localisation dans la présente section se limitera à cet aspect, et le traitement des données ainsi que l'évaluation de la fiabilité seront traités dans d'autres parties.

5.2.3.1 Méthode de Geiger

La méthode de Geiger (Geiger, 1910, 1912), bien connue, est presque universellement utilisée pour localiser les tremblements de terre locaux. Elle est également très populaire dans l'analyse microsismique. Avec la méthode de Geiger, la solution finale est obtenue numériquement par un processus itératif. Dans chaque itération, le vecteur d'ajustement (Δx, Δy, Δz, Δt) est calculé par la méthode des moindres carrés et est ajouté à la solution précédente pour en former une nouvelle. Le processus itératif se poursuit jusqu'à ce que le vecteur d'ajustement satisfasse aux critères d'erreurs préétablis. La méthode de Geiger est un exemple de la méthode d'optimisation de Gauss-Newton (Lee et Stewart, 1981).

Elle permet généralement d'obtenir des résultats très précis si la solution converge en un petit nombre d'étapes itératives. La méthode peut être utilisée pour différents modèles de vitesse comme le modèle de vitesse demi-espace, le modèle de vitesse unique et le modèle discontinu. Le principal problème associé à cette méthode est que la convergence ne peut être garantie. Bien que certaines mesures de correction aient été proposées (Smith, 1976; Buland, 1976; Lee et Stewart, 1981; Anderson, 1982; Lienert et Frazer, 1983), leur application est habituellement très complexe et exige une expérience considérable.

5.2.3.2 Méthode de Thurber

La méthode de Thurber (Thurber, 1984) est une version modifiée de celle de Geiger. Elle utilise des dérivées partielles du premier et du second ordre pour calculer le vecteur d'ajustement, alors que la méthode de Geiger n'utilise que des dérivées partielles du premier ordre. Théoriquement, la méthode de Thurber semble plus appropriée étant donné que la localisation de la source, comme l'indique l'équation 1, est essentiellement un problème non linéaire. Du point de vue des calculs, la méthode de Thurber est identique à la méthode de Newton.

Les méthodes de Thurber et de Geiger présentent des avantages et inconvénients semblables. Bien que la méthode permette de tenir compte de conditions complexes dans la localisation de la source, la divergence peut toujours constituer un problème.

5.2.3.3 Méthode Simplex

La méthode Simplex de localisation de la source a été proposée par Prugger et Gendzwill (Prugger et Gendzwill, 1988; Gendzwill et Prugger, 1989). Les procédés mathématiques et les notions connexes se rapportant à l'estimation de l'erreur pour cette méthode sont discutés par Ge (1995).

La méthode utilise une technique d'ajustement de courbe, connue sous le nom d'algorithme de Simplex (Caceci et Cacheris, 1984) pour trouver une solution. Par définition, elle comporte trois aspects

importants : l'espace d'erreur, le Simplex (figure géométrique) et l'estimation de l'erreur. La méthode découle du principe qu'une erreur peut être calculée en tout point en comparant les temps d'arrivée calculés et observés pour un ensemble donné de temps d'arrivée aux capteurs. Un espace d'erreur est donc celui dans lequel chaque point est défini par une erreur associée. On comprend facilement d'après la définition de cet espace que le point associé à l'erreur minimale est la source de l'événement.

Le processus de recherche du point de l'erreur minimale à l'aide de la méthode Simplex est unique. La solution est trouvée lorsque la figure Simplex se situe dans un creux de l'espace d'erreur. Le Simplex est une figure géométrique qui renferme un sommet de plus que les dimensions de l'espace dans lequel il est utilisé. Son mouvement est contrôlé par un ensemble de règles. Celles adoptées par Prugger et Gendzwill (1988) ont été à l'origine formulées par Caceci et Cacheris (1984).

La recherche de la solution finale dans la méthode Simplex comporte quatre étapes principales :

- détermination d'une figure Simplex initiale;
- calcul des erreurs relatives aux sommets;
- déplacement de la figure Simplex;
- examen de l'état de la convergence.

De façon générale, les trois dernières étapes doivent être répétées plusieurs fois afin d'arriver à la solution finale.

La méthode Simplex est très souple pour ce qui est de l'utilisation de différents modèles de vitesse, ce qui est essentiel pour un modèle de vitesse fondé sur l'événement. La méthode est également souple en ce qui a trait à l'utilisation de la méthode d'optimisation. Ces caractéristiques ne sont pas uniques, elles peuvent également se retrouver dans d'autres méthodes itératives comme les méthodes de Geiger et de Thurber qui sont très populaires auprès des sismologues.

Le principal avantage de la méthode Simplex sur d'autres méthodes itératives est qu'elle est moins vulnérable. Aucun cas de divergence n'a été constaté dans les milliers de localisations calculées par l'ADASLS (Automatic Data Analysis and Source Location System), système d'analyse automatique de données et de localisation des sources mis au point par CANMET, et qui utilise cet algorithme. Une explication possible de cet état de choses est que la figure Simplex conserve le point d'erreur le plus bas qu'elle a trouvé jusqu'à ce qu'elle en localise un plus précis. Par conséquent, la méthode Simplex conserve également la meilleure solution alors que dans d'autres méthodes, cette dernière peut se perdre dans les processus d'itération. La vitesse des calculs par la méthode Simplex est considérablement plus lente que par la méthode de Geiger, de Thurber et du USBM.

5.2.3.4 Méthode du USBM

La méthode du USBM a été élaborée au début des années 70 au United States Bureau of Mines. La mise au point de cette méthode s'inscrit dans les efforts du Bureau of Mines pour faire de la technique d'émission acoustique/microsismique (EA/MS) un outil efficace permettant de déterminer la stabilité des massifs rocheux. La méthode a été publiée pour la première fois en 1970 et a été modifiée par la suite en 1972 (Leighton et al., 1970, 1972). Depuis lors, elle est considérée comme la principale méthode de localisation des sources EA/MS à être employée dans le domaine minier en Amérique du Nord.

La méthode du USBM est une méthode non itérative et les solutions sont trouvées directement. Dans cette méthode, le temps d'origine est d'abord éliminé en soustrayant la première équation du reste. Les équations résultantes sont alors linéarisées et peuvent être résolues soit par la méthode des moindres carrés ou par la méthode de la valeur absolue. Il est important de remarquer que la méthode du USBM nécessite au moins une équation de plus que le nombre d'inconnues.

La méthode du USBM est facile à utiliser et donne la solution la plus rapide parmi toutes les méthodes analytiques de localisation. L'utilisateur n'a pas à choisir de solution approximative ou à établir des critères de convergence et, surtout, il n'a pas à se soucier du problème de divergence. On peut facilement intégrer la méthode des moindres carrés ou celle de la valeur absolue à cette méthode.

Bien que la méthode ne convienne pas aux événements qui comportent un grand nombre de temps d'arrivée des ondes S, on a constaté qu'elle s'avère efficace lorsqu'il s'agit d'événements de grande énergie qui ne comportent qu'un petit nombre de temps d'arrivée. Ces problèmes pourraient être des erreurs évidentes, ou même des arrivées d'ondes S. Pour cette raison, la méthode du USBM a été incluse dans l'ADASLS de CANMET.

5.2.4 Facteurs influant sur la précision de la localisation

La précision de la localisation de la source dépend d'un certain nombre de facteurs : la qualité des paramètres d'entrée (vitesse, temps d'arrivée et coordonnées du capteur), la complexité du champ réel des vitesses, le bruit de fond, la méthode de localisation, la méthode d'optimisation, la taille et la géométrie du réseau. Bien que tous ces facteurs puissent avoir une incidence importante sur la précision de la localisation, les plus importants demeurent la qualité des données d'entrée et la géométrie du réseau de capteurs.

5.2.4.1 Qualité des données d'entrée

Une difficulté importante dans la détermination de la localisation des événements microsismiques est que les paramètres d'entrée (la vitesse, le temps d'arrivée et les coordonnées du capteur), comme l'indique l'équation 1, ne peuvent être tous déterminés avec précision. Parmi ces paramètres, seules les coordonnées du capteur peuvent être déterminées avec précision et, dans certains cas, cela peut être difficile (p. ex. le cas des capteurs enfouis dans des trous profonds). Le modèle de vitesse et le temps d'arrivée comportent généralement un certain nombre d'erreurs. Ces dernières peuvent parfois être très importantes. Par exemple, on rapporte fréquemment que l'écart type de la vitesse de propagation déterminée pour le champ de vitesse peut être de plus de 10 %. De telles erreurs ont incontestablement une incidence sur la précision de la localisation de la source. Par conséquent, la priorité dans tout projet de localisation consiste à améliorer la qualité des données d'entrée.

5.2.4.2 Géométrie du réseau de capteurs

Il importe cependant de remarquer la casi impossibilité d'obtenir un ensemble de données parfaites. Quelques erreurs subsistent toujours. Cela est principalement attribuable au fait qu'il est impossible de modéliser avec précision le champ réel des vitesses.

En quoi les erreurs initiales ont-elles une incidence sur la précision de la localisation? Une étude théorique (Ge, 1988; Ge et Hardy, 1988) indique qu'elles dépendent toutes de la géométrie du réseau de capteurs. Une géométrie inadéquate du réseau rend la solution finale extrêmement vulnérable aux erreurs initiales, alors qu'une bonne géométrie réduit efficacement l'incidence de toute erreur initiale. En raison du caractère inévitable des erreurs associées aux données d'entrée, l'optimisation de la géométrie devient l'un des moyens les plus efficaces d'améliorer la précision de la localisation. Une expérience récente dans la surveillance des coups de toit au Canada a démontré l'impossibilité de localiser avec précision la source d'un événement dans une mine qui n'est pas dotée d'un réseau conçu adéquatement (Ge, 1992, 1993, 1994, 1996). Les mines dans lesquelles les réseaux ont été optimisés ont toutes observé une amélioration notable de la précision de la localisation des événements sismiques.

5.3 Développements théoriques à CANMET

Les programmes de surveillance quotidienne qui ont été mis en oeuvre au début des années 80 dans l'industrie minière canadienne ont véritablement marqué l'histoire de l'application des techniques microsismiques. C'était la première fois que ces techniques étaient utilisées quotidiennement à grande échelle dans le domaine de la géotechnique. De façon générale, la réussite a été remarquable. Du point de vue théorique, l'application des techniques microsismiques a fourni les données scientifiques de base requises pour l'étude du phénomène des coups de toit : les mécanismes de rupture, les relations entre les structures géologiques et l'activité minière ainsi que les conditions requises pour générer de tels phénomènes. Du point de vue pratique, les exploitants miniers disposaient d'un outil unique pour évaluer la stabilité de la mine toute entière en ce qui a trait à la distribution temporelle et spatiale des coups de toit et de l'activité microsismique afin d'identifier les structures sujettes à ces séismes et d'évaluer la pertinence de la séquence d'extraction et de la planification minière.

Comme c'était la première fois que les techniques de surveillance microsismique quotidienne étaient mises en oeuvre à grande échelle dans l'industrie, un certain nombre de problèmes très complexes ont fait surface. De nouvelles théories et méthodes ont été requises pour résoudre ces problèmes intéressants.

5.3.1 Évaluation des problèmes liés à la localisation dans l'industrie minière canadienne

Le principal problème rencontré par l'industrie minière a été le manque de précision dans la localisation des sources, particulièrement dans le cas d'événements de faible magnitude. Le problème était sérieux puisqu'il se traduisait souvent par l'obtention d'un modèle erroné d'activité sismique pour une mine donnée. Par exemple, ce problème survenait presque systématiquement à la mine Creighton; en effet, les événements qui se produisaient dans l'éponte supérieure étaient localisés dans l'éponte inférieure lorsqu'une méthode classique de localisation était utilisée (Ge et Kaiser, 1991; Gee, 1993).

Pour améliorer la précision de la localisation de la source, plusieurs problèmes devaient d'abord être réglés. Le premier était celui de l'origine des temps d'arrivée. Le système microsismique utilisé pour la surveillance quotidienne dans la plupart des mines est le système MP250 d'Electrolab. Ce système n'enregistre pas les trains d'ondes, il n'enregistre que les temps d'arrivée. L'origine des temps d'arrivée enregistrés par les systèmes MP250 est diverse. En plus des temps d'arrivée des ondes P, qui sont presque toujours choisis par l'ordinateur, le système enregistre de nombreuses arrivées d'ondes S ainsi que des valeurs aberrantes (valeurs attribuées à divers bruits ou à des interférences provenant d'un autre événement sismique). Lors de la révision d'un grand nombre de systèmes microsismiques, cette situation reflétait l'un des problèmes clés à l'origine de l'imprécision de la localisation d'une source.

Ensuite, un nombre considérable d'événements microsismiques sont traités automatiquement chaque jour à ces mines et la précision de la localisation varie beaucoup, de bonne à peu significative. Malheureusement, il n'existe aucun processus d'évaluation pouvant être utilisé pour évaluer les résultats sur le plan de la fiabilité. Pour cette raison, toutes les solutions sont acceptées comme telles. Cette procédure a souvent faussé de façon importante l'image finale de l'activité sismique.

La géométrie du réseau de capteurs est également un facteur ayant une grande influence sur la précision de la localisation de la source. Toutefois, cette question n'a été étudiée qu'au niveau théorique et a suscité peu d'intérêt de la part de l'industrie minière dans les années 80. Par après, une enquête réalisée dans un certain nombre de mines de l'Ontario a démontré que la géométrie du réseau était l'un des deux problèmes à l'origine de la localisation imprécise des événements (Ge, 1992, 1993, 1994; Ge et Kaiser, 1989, 1991). Il était donc très important que l'industrie minière comprenne la situation et qu'elle mette au point un plan efficace pour optimiser la configuration des réseaux.

En outre, d'autres problèmes théoriques restent à résoudre, comme l'estimation de l'erreur et l'analyse de la méthode de localisation. L'efficacité de la surveillance quotidienne automatisée dépend beaucoup de la

manière dont ces problèmes seront résolus. Cet aspect est devenu une partie importante des travaux de CANMET. Dans la présente section sont discutés d'importants problèmes de traitement de données qu'ont résolus les chercheurs de CANMET. L'optimisation des réseaux sera abordée plus loin.

5.3.2 Identification de l'origine des temps d'arrivée

L'origine des temps d'arrivée enregistrés par un système microsismique est diverse. En plus des arrivées d'ondes P, on constate également de nombreuses arrivées d'ondes S et de bruit. Pour localiser les sources avec précision, il est essentiel de pouvoir déterminer l'origine de chaque arrivée.

L'identification du type d'arrivée est fondée habituellement sur l'analyse du train d'ondes complet enregistré. Bien que des recherches aient été faites pendant plusieurs années sur la détection automatique basée sur l'analyse des trains d'ondes, il n'existe toujours pas de technique fiable pour l'analyse quotidienne en continu. En outre, la plupart des mines sujettes aux coups de toit utilisent le système MP250 pour la surveillance quotidienne. Ce dernier n'enregistre que les temps d'arrivée, pas les trains d'ondes. Ainsi, en raison de leur incapacité à analyser tous les types de temps d'arrivée, les mines ont dû poser l'hypothèse irréaliste que toutes les arrivées étaient des arrivées d'ondes P. Par conséquent, la précision de la localisation était faible et les données, peu utiles.

Pour résoudre ce problème, on a construit un modèle d'interprétation des temps d'arrivée enregistrés sans tenir compte des ondes (Ge, 1988; Ge et Hardy, 1988; Ge et Kaiser, 1990; Ge et Mottahed, 1994). D'après ce modèle, il est possible de distinguer les arrivées des ondes P et S ainsi que celles des bruits.

Le modèle prévoit aussi l'analyse de la différence entre les temps d'arrivée et l'analyse des résiduelles. Il suppose que l'origine ne peut être déterminée par le seul temps d'arrivée, mais qu'elle apparaîtra si celui-ci est lié à des paramètres connexes. De telles relations peuvent se manifester dans les différences entre les temps d'arrivée observés, lesquels sont fonction des distances entre les capteurs, de la taille et de la densité du réseau. On peut les retrouver également dans l'importance et le signe des résiduelles associées aux types d'arrivée et aux différences observées entre les temps d'arrivée. De là, la possibilité de déterminer le type d'arrivée par une analyse de ces relations. L'annexe III présente quelques études de cas.

5.3.2.1 Analyse de la différence entre les temps d'arrivée

L'analyse de la différence entre les temps d'arrivée est liée à la théorie de l'uniformité des temps d'arrivée. Bien qu'une discussion détaillée du sujet ait été faite précédemment (Ge, 1988; Ge et Hardy, 1988), nous jugeons utile de compléter cette information dans la présente section.

La localisation d'un événement sismique dans un espace à trois dimensions implique la présence de quatre inconnues, soit x, y, z et t, où x, y et z sont les coordonnées de la source et t est le temps d'origine de l'événement. Le temps d'origine exact n'est pas donné dans la solution finale, du fait qu'il est peu pratique dans la plupart des applications. Dans certains cas, la vitesse est aussi considérée comme une inconnue. Cette pratique n'est pas recommandée lorsque les temps d'arrivée détectés ne sont pas clairs. Dans la présente section, les inconnues se rapportant à la localisation d'un événement sismique sont les trois coordonnées et le temps d'origine de l'événement.

L'équation principale de la localisation de la source est basée sur un modèle de vitesse demi-espace, comme nous l'avons mentionné plus tôt :

$$((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2)^{1/2} = v(t_i - t) \qquad (1)$$

Dans cette équation, x, y et z sont les coordonnées de la source où t est le temps d'origine de l'événement; x_i, y_i et z_i sont les coordonnées du i^e capteur, t_i est le temps d'arrivée au i^e capteur et v est la vitesse de propagation de l'onde de contrainte.

L'équation 1 peut être modifiée de la manière suivante afin d'obtenir une partie de l'information nécessaire à l'étude. Si l'on soustrait l'équation du j^e capteur de l'équation du i^e capteur, on obtient l'équation suivante :

$$((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2)^{1/2} - ((x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2)^{1/2} = v(t_i - t_j) \qquad (2)$$

Cette équation est celle d'un hyperboloïde. Par conséquent, la localisation de la source dans un modèle de vitesse demi-espace revient à trouver l'intersection commune à plusieurs hyperboloïdes. Une hyperbole, trace d'un hyperboloïde dans le plan x-y, est illustrée à la figure 5.1.

Fait à noter qui résulte de l'équation 2 : une fois que les positions de deux capteurs sont connues, la forme et la position d'un hyperboloïde dépendent seulement de la différence entre les temps d'arrivée. Si la distance entre deux capteurs est 2c, la différence entre les temps d'arrivée peut varier dans l'intervalle suivant :

$$0 \leq | t_i - t_j | \leq 2c/v \qquad (3)$$

Les implications de cette équation sont les suivantes :

- Si la différence entre les temps d'arrivée est nulle, la source se trouve dans le plan central. Celui-ci est défini comme le plan dans lequel les distances entre chaque point du plan et les deux capteurs sont égales.
- Plus la valeur de la différence entre les temps d'arrivée est faible, plus la source se trouve près du plan central. On peut vérifier cette affirmation dans le réseau d'hyperboles illustré à la figure 5.2. La différence entre les temps d'arrivée des ondes qui partent de chaque hyperbole et qui arrivent aux deux capteurs est égale à dD/v, où dD est la distance le long de l'axe transversal entre cette hyperbole et son image symétrique par rapport au plan central. À la figure 5.2, ce plan est représenté par la ligne centrale. Les hyperboles qui représentent des différences plus élevées entre des temps d'arrivée sont davantage éloignées de la ligne centrale.
- La limite théorique de la différence entre les temps d'arrivée pour un modèle de vitesse demi-espace est de 2c/v, où 2c est la distance entre deux capteurs et v est la vitesse. Mathématiquement,

$$2c/v \geq t_i - t_j \qquad (4)$$

Figure 5.1 Hyperbole déterminée par la différence entre les temps d'arrivée à deux capteurs

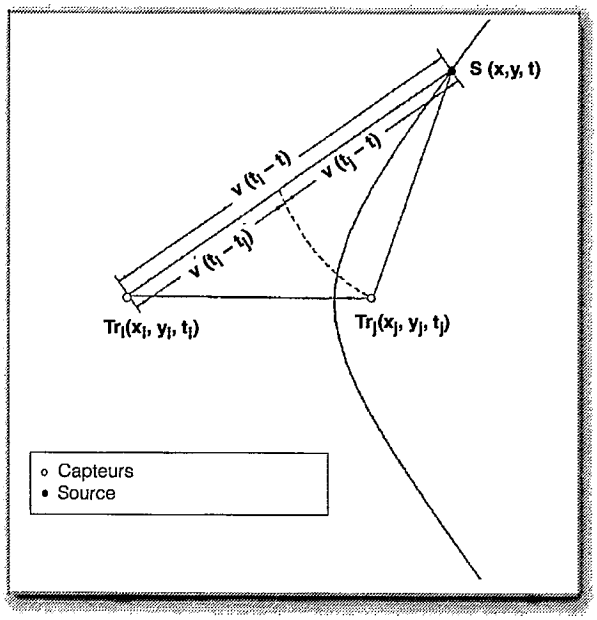
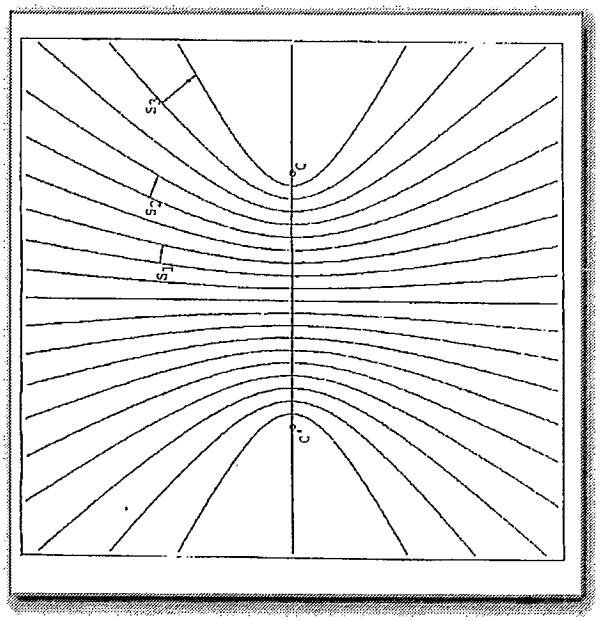


Figure 5.2 Champ hyperbolique associé à deux capteurs



- Une des conclusions qui découlent de l'équation 4 est qu'aucune solution ne peut être trouvée dans le domaine réel pour satisfaire une différence entre des temps d'arrivée qui est plus grande que la limite théorique de leur différence lorsqu'on suppose un modèle de vitesse demi-espace.
- Toute source doit être située au premier capteur ou sur le prolongement de la droite qui relie deux capteurs (axe transversal) lorsque la limite théorique de 2c/v est atteinte. De façon générale, la limite ne devrait pas être atteinte car il est rare qu'une source se trouve à la même position qu'un capteur ou sur le prolongement de la droite qui relie deux capteurs.

Une des notions importantes de cette méthode est la limite théorique de la différence entre les temps d'arrivée aux deux capteurs. Dans le cas d'un modèle de vitesse demi-espace, on peut facilement trouver cette limite en substituant une vitesse appropriée dans l'équation 4. Lorsque les phases des ondes de déclenchement sont différentes pour les deux capteurs, la limite peut également être déterminée si l'on peut supposer que le massif rocheux est un milieu homogène et isotrope. Quatre limites théoriques importantes pour la localisation des sources microsismiques sont résumées au tableau 5.1.

Le tableau 5.1 constitue un guide théorique pour l'examen des types d'arrivée enregistrés. Par exemple, si la différence entre les temps d'arrivée observés à deux capteurs dépasse la limite théorique de la différence entre les temps d'arrivée d'ondes P associées, la deuxième arrivée ou les deux doivent donc être déclenchées par une arrivée d'onde S. Une analyse exhaustive des données relatives aux temps d'arrivée originaux basée sur la théorie de la différence entre les temps d'arrivée peut permettre d'identifier dans la plupart des cas les arrivées d'ondes P et S ainsi que les observations aberrantes. Le lecteur peut consulter Ge et Kaiser (1990, 1992) pour un examen plus approfondi du problème.

Tableau 5.1 Limites théoriques se rapportant aux différences entre les temps d'arrivée à deux capteurs pour quatre combinaisons de types d'ondes

Première arrivée	Deuxième arrivée	Limite théorique
P	P	$2c/v_p$
S	S	$2c/v_s$
S	P	$2c/v_p$
P	S	∞

5.3.2.2 Analyse des résiduelles

L'analyse des résiduelles est la théorie de la constitution des résiduelles des canaux d'enregistrement et de l'interprétation de ces dernières à titre de phénomène physique connexe. Elle débute par l'analyse de la constitution de la résiduelle des canaux. D'après la théorie de la solution par les moindres carrés (Ge, 1994), la résiduelle de canal peut être exprimée comme suit :

$$\gamma_i = t_i - tt_i - \Sigma\, t_i /n + \Sigma\, tt_i /n \qquad (5)$$

où γ_i est la résiduelle de canal, t_i est le temps d'arrivée observé, tt_i est le temps de propagation calculé, n est le nombre d'observations, $\Sigma\, t_i /n$ est le temps d'arrivée moyen observé et $\Sigma\, tt_i /n$ est le temps de propagation moyen calculé.

Comme l'analyse des résiduelles est effectuée après l'analyse du temps d'arrivée et que, par conséquent, les canaux des ondes S bien définis et les valeurs aberrantes ont été détectés, il convient de supposer que les deux derniers termes de l'équation 5 ne seront pas modifiés de façon considérable si seuls quelques canaux problématiques subsistent. La résiduelle de canal devient alors essentiellement fonction du temps de propagation puisque le temps d'arrivée observé, t_i , n'est pas touché par les calculs. Si la résiduelle de canal est de signe positif, le temps de propagation est trop court ou la vitesse de l'onde attribuée à ce canal est trop élevée. Si elle est négative, c'est que la vitesse attribuée est trop petite. Si nous examinons davantage la classe du canal, la cause physique de la résiduelle de canal peut être découverte. Par exemple, si on a assigné à un canal un état de vitesse d'onde P et que sa résiduelle de canal est de signe positif, le canal pourrait être un canal d'onde S puisque le signe positif indique que la vitesse est trop élevée.

Le tableau 5.2 présente un résumé de l'interprétation des résiduelles de canaux. Il existe cinq cas possibles, dont seul le premier a été discuté. Le second cas est celui où la vitesse est encore trop faible même si une vitesse d'onde P a été utilisée. Ce cas est physiquement impossible à moins que le canal ait été déclenché par une autre source au début de la fenêtre d'enregistrement de l'événement. Le troisième cas est celui pour lequel on a assigné une vitesse d'onde S peu élevée. Cela peut être causé par une détection différée de l'arrivée d'ondes S. Comme il serait arbitraire d'assigner une autre vitesse à ce canal, ce dernier doit être enlevé des calculs. Dans le quatrième cas, la vitesse d'onde S assignée est trop faible et peut être corrigée en assignant une vitesse d'onde P. Le dernier cas est celui où la magnitude de la résiduelle demeure presque inchangée mais où le signe change lorsque la vitesse passe d'une vitesse d'onde P à une vitesse d'onde S ou de son inverse. Les détections intermédiaires sont clairement erronées.

Tableau 5.2 Interprétation de la résiduelle de canal

Vitesse originale pour le canal	Signe de la résiduelle du canal	Évaluation de la vitesse originale	Mesures correctrices et observations
P	+	Trop élevée	Utiliser la vitesse d'onde S
P	–	Trop faible	Enlever le canal; valeur aberrante possible
S	+	Trop élevée	Enlever le canal; enregistrement différé ou valeur aberrante
S	–	Trop faible	Utiliser la vitesse d'onde P
P	+	Trop élevée ou trop faible	Enregistrements intermédiaires si les magnitudes des résiduelles de canal sont rapprochées
S	–		

L'analyse des résiduelles complète l'analyse des temps d'arrivée et permet de détecter les canaux d'ondes S et les valeurs aberrantes qui ont été manqués lors de la première étape de l'analyse des différences entre les temps d'arrivée.

5.3.2.3 Modèle de vitesse basé sur l'événement

D'après l'analyse des différences entre les temps d'arrivée et l'analyse des résiduelles, il est possible d'établir un modèle de vitesse basé sur l'événement qui précise l'identification des ondes enregistrées par chaque canal. Des vitesses d'ondes P et S seront associées aux canaux d'ondes P et S respectivement et on ne tiendra pas compte des canaux aberrants. Comparativement au modèle de vitesse classique de l'onde P, le modèle de vitesse basé sur l'événement présente deux caractéristiques particulières. D'abord, il ne s'agit pas d'un modèle hypothétique, mais d'un modèle bâti sur l'analyse des arrivées enregistrées. Ensuite, ce modèle de vitesse tient compte des variations des types d'arrivée et, pour cette raison, il dépend de l'événement. Le modèle de vitesse basé sur l'événement permet de localiser les sources de manière réaliste.

La théorie de l'interprétation des types d'arrivée sans train d'ondes connaît un grand succès dans l'analyse des événements microsismiques quotidiens. Elle constitue la base théorique du logiciel ADASLS mis au point par CANMET pour l'analyse des données et la localisation des sources. Le logiciel est couramment utilisé par l'industrie minière canadienne. Les utilisateurs peuvent consulter les annexes IV et V pour obtenir plus de renseignements sur les études de cas.

5.3.3 Évaluation de l'erreur

L'un des aspects importants de la théorie de la localisation d'une source microsismique est l'évaluation de l'erreur. Auparavant, on utilisait presque exclusivement la méthode des moindres carrés (méthode L2). Depuis les années 80, la méthode de la valeur absolue, ou méthode L1, a été élaborée pour évaluer l'erreur. Toutefois, il règne une certaine confusion au sujet des concepts et de l'intégration de cette méthode aux procédés de localisation. Par exemple, Gendzwill et Prugger (1989) ont proposé l'utilisation d'une résiduelle de station obtenue par la méthode L2 à titre de résiduelle de station pour la méthode L1 lorsqu'ils ont introduit le Simplex.

Pour résoudre ce problème, une étude théorique a été réalisée par CANMET. On a déduit des formules pour l'évaluation du temps d'origine et de la résiduelle de station à partir de la méthode Simplex. Ces formules sont fondées sur la méthode des moindres carrés et sur la méthode de la valeur absolue. L'étude a démontré que la

résiduelle de station définie par les deux méthodes prend des formes tout à fait différentes. On a déduit que la résiduelle de station n'était pas une notion indépendante des normes d'erreur, mais qu'elle était définie par la norme d'erreur utilisée. L'étude a également démontré que la méthode Simplex ne peut permettre d'éviter les problèmes associés aux matrices mal conditionnées même si aucune information dérivée n'est requise. Les résultats de cette étude ont été publiés dans le *Bulletin of the Seismological Society of America* (Ge, 1995).

5.3.4 Analyse de fiabilité

La précision de la localisation d'une source microsismique dépend d'un grand nombre de facteurs. Pour le grand nombre de données recueillies chaque jour, la précision peut varier considérablement. Une des tâches importantes de la localisation consiste donc à évaluer la fiabilité de la localisation calculée.

Le critère le plus fréquemment utilisé pour mesurer la précision de la localisation est la résiduelle, qui est l'effet total des différences entre les temps d'arrivée calculés et observés. Comme l'objectif principal de la plupart des méthodes est la recherche de la localisation pour laquelle les temps d'arrivée calculés correspondent le mieux aux temps d'arrivée observés, on doit accorder une attention toute particulière à la résiduelle de l'événement, qui est une mesure d'erreur.

Toutefois, certains problèmes surviennent lorsque la résiduelle est utilisée seule pour mesurer la précision de la localisation de la source. Ces problèmes s'expliquent du fait que l'erreur réelle dans la localisation peut varier beaucoup pour la même résiduelle, selon la géométrie du réseau et la position relative de la source par rapport aux capteurs. Lorsque la source se trouve loin du réseau, la résiduelle peut ne pas constituer une mesure très fiable de la localisation de la source. En outre, ce fait pourrait mener à considérer les événements de faible magnitude puisqu'il est plus probable qu'un événement dont le nombre de canaux est moins élevé possède une résiduelle moindre. L'expérience pratique montre que la localisation des événements de grande énergie est généralement plus fiable.

Pour évaluer la fiabilité de la localisation de la source, CANMET a mis au point un procédé d'analyse complet réalisé en deux étapes. La première s'occupe des données brutes, qui sont analysées systématiquement. On ne tient plus compte dans les calculs ultérieurs des canaux qui comportent des erreurs importantes ou qui sont jugés aberrants. Si un événement est bruyant au point où le nombre de canaux qui restent n'est pas suffisant pour obtenir une solution analytique, il sera éliminé. Ces événements sont des événements de très faible magnitude et ne comptent habituellement que cinq canaux. Ils fausseraient fortement l'image de l'activité sismique s'ils n'étaient pas détectés puis éliminés.

La deuxième étape est une analyse des solutions obtenues. Cette analyse comporte un certain nombre d'éléments, dont les principaux sont la résiduelle de l'événement, la sensibilité et la séquence des capteurs. En outre, la résiduelle principale, le niveau d'énergie et le nombre de canaux sont considérés pour certaines applications spéciales.

L'indice de sensibilité est une mesure de la stabilité d'une solution. Il est défini comme étant la distance entre une source qui a été localisée et la position qu'elle aurait si elle avait été obtenue en supposant des vitesses moindres de 10 %. L'indice de sensibilité tient compte de l'effet de la géométrie du réseau. Une solution dont l'indice de sensibilité est grand est mathématiquement instable et ne devrait pas être retenue dans l'analyse ultérieure.

L'analyse de la séquence des capteurs permet d'évaluer la fiabilité de la localisation pour ce qui est de son emplacement possible. Cette séquence ainsi que le modèle de vitesse et la disposition des éléments du réseau définissent la région où l'événement aurait pu se produire. Une différence entre les séquences observées et calculées signifie simplement que la source ne se trouve pas à l'intérieur de cette région. L'importance de cette erreur est jugée selon la différence entre les temps d'arrivée s'y rapportant. L'un des principaux avantages de l'analyse de cette séquence est qu'elle permet de procéder à une évaluation intuitive. Elle permet aussi d'évaluer le modèle de vitesse.

Par suite de cette procédure complète d'analyse, un système de classement des événements a été mis au point. Les événements y sont placés dans les catégories A à E (ou 1 à 5) selon la fiabilité. Ce système de classement constitue un moyen commode qui permet aux exploitants miniers d'utiliser les données de localisation aux fins de contrôle du terrain.

5.3.5 Méthode hybride de localisation de la source

La méthode Simplex est efficace pour la manipulation du modèle de vitesse basé sur l'événement. Elle apporte presque toujours une meilleure solution que la méthode du USBM lorsqu'il y a un certain nombre de canaux d'ondes S. Par ailleurs, on a déterminé à l'aide des données relatives à la calibration (coups de toit ou sautages pour lesquels la source a été localisée avec précision) que la méthode du USBM donne une précision comparable pour les événements importants dont tous ou presque tous les canaux ont été déclenchés par une onde P. Parfois, les solutions offertes par la méthode du USBM sont supérieures. Un avantage important de la méthode du USBM, observé dans l'étude de calibration, est qu'elle peut manipuler efficacement les canaux erronés lorsque ceux-ci sont en nombre très limité. La méthode Simplex, par contre, peut être très sensible à ces derniers.

La méthode hybride conserve les avantages de ces deux méthodes sans en retenir les inconvénients. Elle détermine la solution la plus fiable à partir de considérations théoriques et empiriques. L'analyse est effectuée en deux étapes. La première établit la pertinence des données originales pour la méthode de localisation de la source. La deuxième est une analyse de fiabilité qui est fondée principalement sur trois critères : l'indice de sensibilité, la résiduelle de l'événement et la résiduelle principale. La sensibilité mesure la stabilité d'une solution. La résiduelle de l'événement mesure l'effet global de la différence entre les temps d'arrivée observés et calculés. La résiduelle principale, par ailleurs, examine la concordance entre les temps d'arrivée observés et les temps d'arrivée calculés pour les premiers canaux.

La résiduelle principale est une notion importante de la méthode hybride. L'importance accordée aux résiduelles associées aux premiers canaux est basée sur le fait que les erreurs dans les temps d'arrivée ne sont pas distribuées au hasard parmi les canaux. De façon générale, les canaux déclenchés le plus tôt devraient comporter les erreurs les plus faibles. Cela se comprend aisément pour des raisons pratiques, notamment la distance. Les capteurs déclenchés les premiers se trouvent plus près de la source, ce qui réduit efficacement les incertitudes associées au modèle de vitesse. Une distance plus courte dénote aussi un niveau d'énergie plus élevé et, par conséquent, des arrivées plus précises, ce qui réduit les erreurs de temps d'arrivée. L'étude de calibration indique que les solutions associées aux résiduelles principales plus petites sont plus fiables. Le lecteur trouvera à l'annexe V des exemples illustrant l'efficacité de la méthode hybride.

5.4 Le progiciel ADASLS

Par suite de développements théoriques, un progiciel perfectionné appelé ADASLS a été élaboré à CANMET. Le programme a été conçu pour être appliqué de façon générale dans l'industrie minière où il est nécessaire de disposer d'une analyse rapide, scientifique et exhaustive des données pour localiser les événements microsismiques. Un exposé général sur le programme a été fait par Ge et Mottahed (1993, 1994).

5.4.1 Généralités

L'ADASLS offre une analyse perfectionnée des données ainsi que la technologie nécessaire pour localiser la source d'un événement. La caractéristique la plus intéressante du progiciel est sa capacité de déterminer le type de signal capté (p. ex. onde P, onde S et valeurs aberrantes) sans enregistrer les ondes. Cette caractéristique, qui n'appartient à aucune autre méthode classique, permet de réaliser une analyse scientifique des données MP250. L'algorithme de localisation utilisé dans le progiciel est unique lui aussi. Il analyse les résultats de la méthode Simplex et de la méthode du USBM, et identifie les résultats les plus fiables. L'algorithme porte le nom de méthode hybride.

Un autre trait distinctif du progiciel est l'analyse de fiabilité qui permet à l'utilisateur d'obtenir non seulement la localisation de la source mais aussi le niveau de confiance associé à cette localisation. Le progiciel, élaboré en vue d'un usage général, comporte d'importantes caractéristiques :

- Il est convivial, manuel et tient compte de plus de 130 paramètres. Ces derniers évaluent les conditions locales et déterminent le procédé optimal d'analyse. Les paramètres sont contenus dans trois fichiers de données et sont ajustables.
- Toutes les techniques d'analyse des données sont rédigées sous forme de filtres numériques (c'est-à-dire que chaque technique d'analyse de données agit comme un filtre numérique particulier). Par conséquent, ces derniers peuvent être utilisés sans inconvénient et avec souplesse pour un usage général.
- Le progiciel utilise une méthode unique de localisation des sources, mise au point à CANMET. On l'appelle la méthode hybride. Grâce à elle, le programme inclura automatiquement les avantages du Simplex et l'algorithme du USBM.
- Le progiciel offre un vaste choix de techniques d'analyse des données et de localisation des sources. Pour cette dernière, l'utilisateur peut avoir recours à trois méthodes : Simplex, USBM ou hybride. Pour chaque méthode, il peut suivre l'une ou l'autre des démarches d'optimisation, c'est-à-dire la méthode des moindres carrés ou la méthode de la valeur absolue. En outre, il dispose de l'option de rétroanalyse pour déterminer la vitesse dans chaque méthode.
- Le progiciel a été rédigé à partir d'une vaste expérience directe de localisation de données acquises aux mines Campbell (Placer Dome), North (Inco), Kidd Creek (Falconbridge), Homestake et dans les deux réseaux de la mine Creighton (Inco). Il s'agit d'une technique qui a fait ses preuves.

Le tableau 5.3 indique les grandes caractéristiques techniques du programme.

5.4.2 Application

L'ADASLS a fait l'objet de nombreuses mises à l'essai et sa performance est supérieure à celle des autres méthodes. Aujourd'hui, le progiciel est utilisé non seulement par CANMET comme principal programme de localisation des sources, mais aussi pour le traitement quotidien des données dans plusieurs mines sujettes aux coups de toit. En 1993, l'ADASLS a été enregistré à titre de propriété intellectuelle du gouvernement canadien.

Un exemple illustrant la performance de l'ADASLS est présenté à la figure 5.3. Un coup de toit et 20 répliques sismiques ont été localisés par l'ADASLS et par la méthode classique utilisée par la mine. Les sources des répliques sismiques calculées par le progiciel ADASLS se trouvent toutes, à l'exception d'une seule, dans le voisinage immédiat de l'événement principal. Par contre, les répliques déterminées par la méthode classique étaient dispersées dans une zone plus vaste. Treize d'entre elles s'étaient déplacées considérablement vers l'est, alors que huit avaient basculé de l'éponte supérieure vers l'éponte inférieure.

On peut voir la cause des grandes erreurs associées à la méthode classique au tableau 4. Ce dernier contient des renseignements plus détaillés sur le coup de toit et les répliques sismiques qu'il a engendrées. Les nombres qui figurent dans la première colonne correspondent à la séquence des événements, telle que présentée dans le fichier de données original. Le numéro 36 correspond à l'événement principal. Dans la deuxième colonne est indiqué le classement des solutions ADASLS. Les nombres indiqués dans la troisième colonne correspondent au nombre de canaux par lesquels les événements ont été détectés. La quatrième colonne présente les modèles de vitesse tels que déterminés par l'ADASLS où P, S et D correspondent aux canaux P, S et aux canaux éliminés respectivement.

Les localisations déterminées par l'ADASLS figurent dans les trois colonnes qui suivent. Les solutions déterminées à l'aide de la méthode employée par la mine sont indiquées dans les trois dernières colonnes. La localisation réelle de l'événement principal est indiquée en haut du tableau, au-dessus de l'événement n° 36. Les solutions qui comportent des erreurs importantes sont indiquées en gras afin de bien les distinguer des autres. Fait intéressant à noter dans le tableau : les piètres solutions données par la méthode classique sont toujours associées aux

Tableau 5.3 Caractéristiques techniques de l'ADASLS

GÉNÉRALITÉS	
Taille du progiciel (lignes)	5 200
Nombre d'essais	78
Contrôle manuel *	
Mode d'analyse continue	
Mode d'analyse détaillée	
Mode de commande de l'utilisateur	
ANALYSE DES DONNÉES BRUTES	
Techniques d'analyse des données rédigées sous forme de filtres numériques	
Nombre de techniques d'analyse des données	33
LOCALISATION DE LA SOURCE	
Méthode de localisation hybride	
Méthode de localisation Simplex	
Méthode de localisation du USBM	
Optimisation par les moindres carrés	
Optimisation par la valeur absolue	
Rétroanalyse de la vitesse	
ANALYSE DE FIABILITÉ	
Analyse des résiduelles	
Analyse de la sensibilité	
Analyse de la séquence des capteurs	
Analyse des résiduelles principales	
Analyse des événements de peu d'ampleur	
Analyse des événements de grande ampleur	
OPTIONS DE SORTIE	
Archivage des résultats détaillés	
Impression des résultats détaillés	
Archivage des résultats concis	
Archivage des résultats et impression	

** Caractéristique essentielle pour usage général. L'ADASLS peut s'adapter facilement aux conditions locales.*

événements qui comportent un certain nombre de canaux déclenchés par des ondes S. Cela explique pourquoi la méthode classique échoue en supposant que tous les temps d'arrivée représentent des ondes P.

5.5 Optimisation de la géométrie du réseau de capteurs

L'importance de la géométrie du réseau réside dans le fait qu'elle détermine l'incidence des erreurs associées aux données d'entrée, comme l'erreur temporelle et l'erreur causée par le modèle de vitesse simplifié dans la localisation de la source. Une bonne géométrie du réseau réduira efficacement au minimum l'effet des erreurs initiales, alors qu'une mauvaise géométrie maximisera leur effet. Comme les erreurs initiales sont inévitables, une bonne géométrie est essentielle.

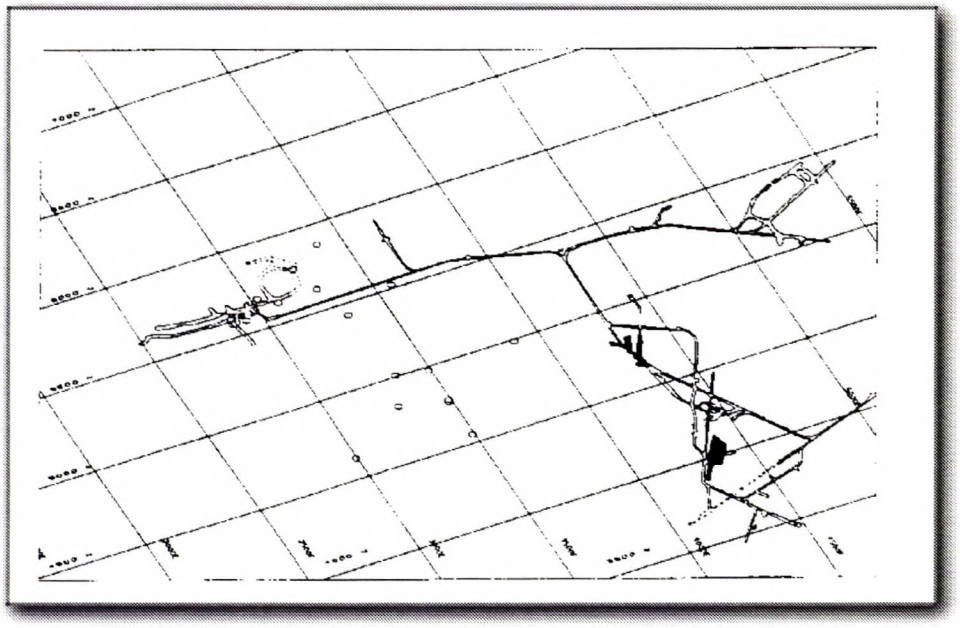
Cependant, avant la deuxième phase du Programme canadien de recherche sur les coups de toit, l'importance de la géométrie du réseau de capteurs était mal comprise par l'industrie minière. Dans de nombreux cas, la géométrie des réseaux en place dans l'industrie ne permettait pas d'atteindre les objectifs de surveillance. Par conséquent, l'une des principales tâches en vue d'améliorer la précision de la localisation consistait à aider l'industrie à comprendre l'importance de la géométrie des réseaux et à aider les mines à optimiser ceux-ci. Plusieurs mesures ont été prises par CANMET à cet égard.

Une vaste étude portant sur les effets de la géométrie du réseau sur la précision de la localisation a d'abord été réalisée. Cette étude était basée sur des données microsismiques réelles recueillies dans les mines. Les cas types qui démontraient avec évidence les effets de la géométrie du réseau sur la précision ont été documentés (Ge, 1992, 1993, 1994) et par la suite communiqués et expliqués aux exploitants. Comme les données avaient été fournies par les exploitants eux-mêmes, ces derniers ont accepté d'emblée de considérer les résultats.

Un coup de toit important s'est produit le 7 janvier 1994 à la mine Onaping de la Falconbridge Ltd. Comme le système sismique de la mine n'avait pas réussi à le localiser, la capacité de l'exploitant à évaluer les conditions du massif était considérablement réduite. On a donc fait appel à CANMET. Après avoir étudié quelque 340 événements, CANMET a été en mesure de localiser approximativement le coup de toit. Au même moment, on concluait que la géométrie du réseau avait rendu difficile la localisation des événements. Le réseau utilisé à

Figure 5.3 Comparaison de la localisation du coup de toit RB1097 et de ses répliques sismiques : méthode classique et progiciel ADASLS

(a) Localisation au moyen d'une méthode classique



(b) Localisation calculée par le progiciel ADASLS

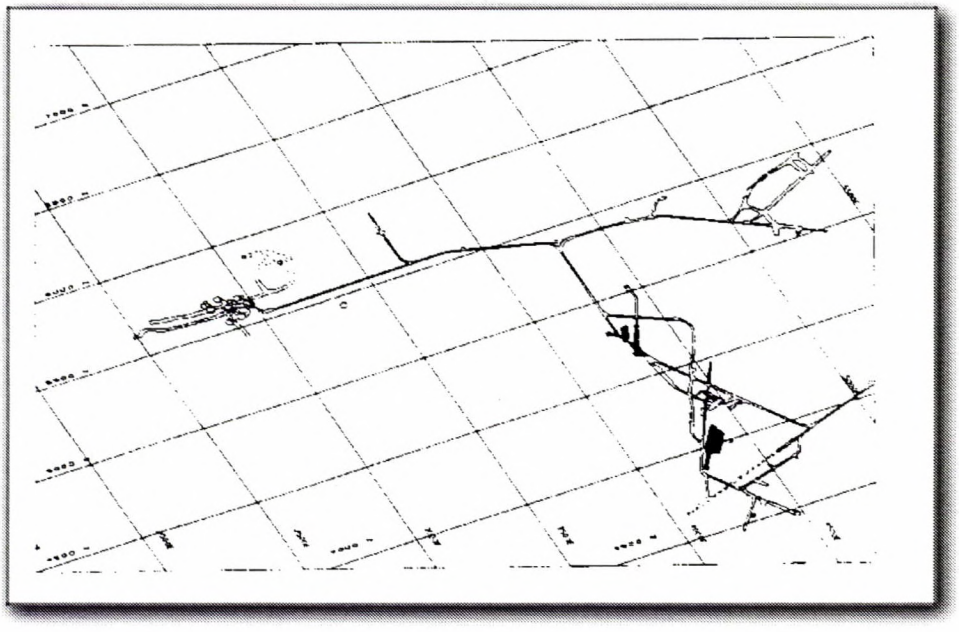


Tableau 5.4 Comparaison des localisations du coup de toit RB1097 et de ses répliques sismiques par ADASLS et par une méthode classique

N° de l'événement	Classement	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS			Méthode classique		
				X	Y	Z	X	Y	Z
			Localisation réelle	2 907	5 615	5 253	2 907	5 615	5 252
36	A	16	PPPPPPPPPPPPPPP	2 886	5 635	5 293	2 879	5 624	5 307
37	C	8	PSSSPSSS	2 929	5 650	5 273	**3 319**	**5 426**	5 250
38	A	16	PPPPPPPDPPPDPPPD	2 884	5 632	5 309	2 868	5 608	5 309
39	A	11	PSSPSPSSPDS	2 928	5 566	5 320	**3 469**	**4 759**	5 318
40	B	13	PSSSPPPSPSDSS	2 920	5 604	5 297	**3 476**	**4 771**	5 330
41	B	13	PPPPSSPPSPSDS	2 854	5 550	5 417	**3 475**	**4 532**	5 318
46	A	16	PPPSPPPPSSPSPPSS	2 869	5 700	5 287	3 081	5 624	5 337
48	C	11	DPPPSPSPPPP	**3 325**	**5 441**	**5 439**	**3 270**	**4 822**	**5 629**
49	A	13	PSSSPPPSPSSDS	2 945	5 649	5 299	**3 264**	5 630	5 428
50	A	16	PPPPPPPPDPPPPPP	2 819	5 652	5 399	2 875	5 584	5 376
52	B	11	PPSSPPSPDSS	2 978	5 614	5 304	**3 338**	**5 003**	5 172
53	A	16	PPPPPPPPPSPSPSPS	2 880	5 570	5 314	2 859	5 577	5 322
54	A	9	PPSSPSPSD	2 943	5 672	5 279	**3 379**	**5 880**	**5 027**
55	C	16	PPPPPPPPPPPPPPP	2 975	5 626	5 278	3 015	5 679	5 236
56	A	7	PSPSPSS	2 965	5 625	5 283	**3 222**	5 784	5 288
57	A	12	PPPSSPSDSPDS	2 941	5 578	5 299	**3 560**	5 519	**5 632**
58	B	7	PPSSPSPDS	2 869	5 624	5 303	**3 875**	**4 985**	5 268
59	B	16	PPPPPPPPPPPPPPP	2 935	5 595	5 284	2 920	5 577	5 306
60	B	13	PPPSSPPSPPSSS	2 910	5 560	5 352	2 976	**4 605**	5 276
61	A	13	PPPPSSPSPDSSD	2 808	5 687	5 361	**3 478**	**4 972**	5 267
62	C	16	PPPPPPPPPDPPPPP	2 909	5 660	5 324	2 976	5 623	5 284

l'époque par la mine se trouvait dans un plan presque congru à l'éponte inférieure. Ce type de réseau permettait difficilement de localiser un événement dans une direction perpendiculaire. La conclusion a été confirmée dans ce cas par le fait que les 340 événements localisés étaient considérablement dispersés dans cette direction (figure 5.4). Les solutions beaucoup moins exactes obtenues par la mine découlaient en outre de la supposition non réaliste que seules des arrivées d'ondes P étaient captées.

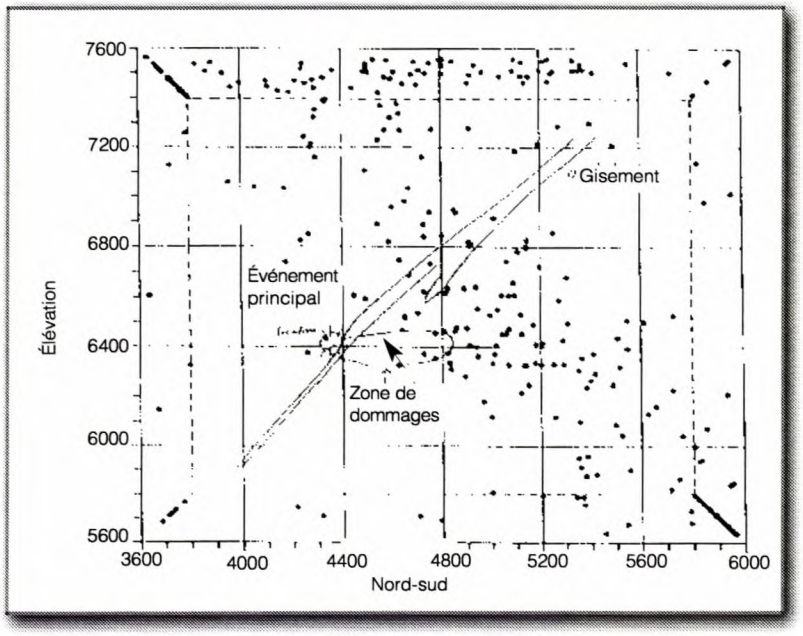
Par suite des résultats de l'étude, plusieurs mines ont demandé à CANMET de concevoir ou de refaire leurs réseaux de surveillance dans le but d'améliorer la précision de la localisation. À la mine Kidd Creek, le réseau a été refait, ce qui a permis une plus grande précision.

Pour faciliter la surveillance quotidienne, des directives se rapportant à l'optimisation des réseaux ont été élaborées à l'intention des exploitants miniers. Voici ces directives :

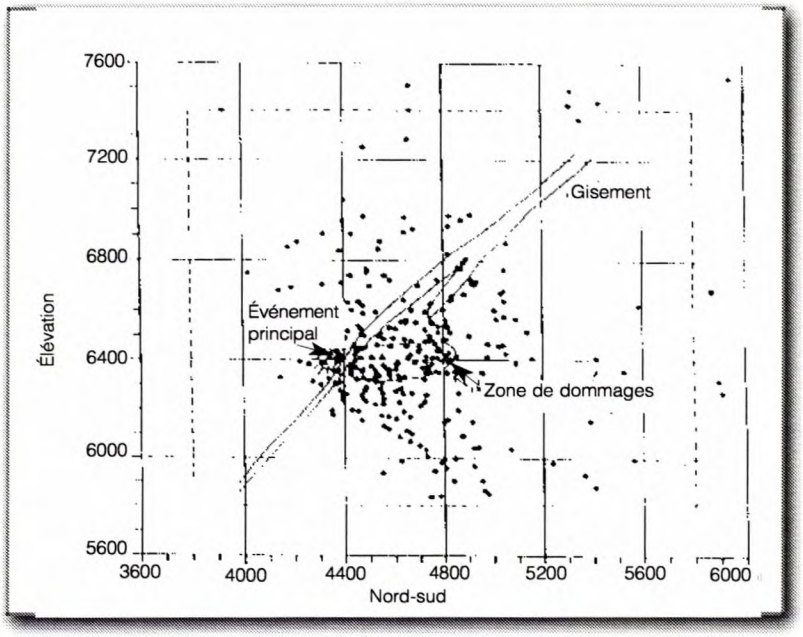
- Les zones doivent être surveillées selon trois dimensions. Les capteurs doivent être placés à l'intérieur et à l'extérieur des zones pour en assurer la surveillance.
- Les capteurs environnants doivent se trouver à une certaine distance de la zone cible parce que des zones instables sont souvent présentes à proximité de ces capteurs. Il est donc préférable de ne pas placer tous les capteurs à l'intérieur de la zone à surveiller.
- Le réseau doit être équilibré. Les localisations seront surpondérées si les capteurs sont trop rapprochés.
- Il faut éviter les réseaux à deux dimensions. Ce type de réseau donne une très faible précision dans les directions perpendiculaires au plan.

Figure 5.4 Localisation du coup de toit du 7 janvier 1994 et des événements connexes à la mine Onaping

(a) Localisations déterminées initialement par la mine



(b) Localisations déterminées par ADASLS



- Des capteurs spéciaux disposés par paires peuvent être conçus pour renforcer la couverture dans certaines directions.

Les directives comprennent également plusieurs critères de surveillance du site. Ce sont :

- L'accessibilité.
- Le fait que les capteurs ne doivent pas se trouver près de grandes ouvertures, de discontinuités importantes ou de matériaux libres, comme le remblai.
- La roche doit être compétente et permettre un bon effet de couplage.

Grâce aux efforts de CANMET, l'industrie minière comprend beaucoup mieux aujourd'hui le rôle de la géométrie des réseaux dans la surveillance microsismique. De nombreuses mines tirent profit des réseaux perfectionnés qui existent aujourd'hui. Mieux encore, elles commencent à s'occuper d'elles-mêmes des problèmes liés aux réseaux. Grâce à la formation donnée par CANMET, certains exploitants sont en mesure d'ajuster l'emplacement des capteurs pour faciliter les activités quotidiennes.

5.6 Références

Allen, R.V. (1989). Lettre à S. G. Wesnousdy, directeur adjoint du *Bull. Seism. Soc. Am.*, Menlo Park, Californie.

Anderson, K.R. (1982). «Robust Earthquake Location Using M-Estimates». *Phys. Earth Planet Interiors* 30, pp.119-130.

Bharti Engineering Associates Inc. (1993). *A Technological Review of the Seismic and Microseismic Monitoring Systems in Ontario Mines.* Rapport final présenté à la Mining Research Directorate, Ontario.

Buland, R. (1976). «The Mechanics of Locating Earthquakes». *Bull. Seism. Soc. Am.* 66:173- 187.

Burden, R.L., Faires, J. D. et Reynolds, A. C. (1978). *Numerical Analysis.* Prindle, Weber & Schmidt, Boston, Massachusetts.

Caceci, M.S. et Cacheris, W.P. (1984). «Fitting Curves to Data (the Simplex Algorithm is the Answer)». *Byte* 9:340-362.

Crosson, R.S. et Peters, D.C. (1974). «Estimates of Miner Location Accuracy: Error analysis in Seismic Location Procedures for Trapped Miners». *Seismic Detection and Location of Isolated Miners*, vol. 2, A. D. Little Inc., Cambridge, Massachusetts.

Ge, M. (1988). *Optimization of Transducer Array Geometry for Acoustic Emission/Microseismic Source Location.* Thèse de doctorat. Pennsylvania State University, Département de génie minier, 237 p.

Ge, M. (1992). *Analysis of Mine-Wide Array Microseismic Data.* CANMET, Rapport final présenté à Inco Limitée, 116 p.

Ge, M. (1993). *Analysis of Kidd Creek Source Location Data.* CANMET, Rapport final présenté à la mine Kidd Creek, Falconbridge Limitée, 150 p.

Ge, M. (1994). *Analysis of Locations of January 7 Rockburst and Associated Events.* CANMET, Rapport final présenté à la mine Onaping, Falconbridge Limitée., 17 p.

Ge, M. (1995). Commentaire sur «Microearthquake Location: A Nonlinear Approach that Makes Use of a Simplex Stepping Procedure». *Bull. Seism. Soc. Am.* 85:375-377.

Ge, M. (1996). *Use of ADASLS at Homestake Mine.* CANMET, Rapport final présenté à Homestake Inc., 142 p.

Ge, M. et Hardy, H.R. Jr. (1988). «The Mechanism of Array Geometry in the Control of AE/MS Source Location Accuracy». *Proceedings of the 29th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Minneapolis, Minnesota, pp. 597-605.

Ge, M. et Kaiser, P.K. (1989). *Use of Campbell Red Lake Microseismic Data in Mine Design: Part I – Seismic Data Validation.* Rapport final présenté à la mine Campbell, 158 p.

Ge, M. et Kaiser, P.K. (1990). «Interpretation of Physical Status of Arrival Picks for Microseismic Source Location». *Bull. Seism. Soc. Am.* 80:1643-1660.

Ge, M. et Kaiser, P.K. (1991). *Microseismic Source Location Study at Creighton and North Mine.* CANMET, Rapport final présenté à Inco Limitée, 66 p.

Ge, M. et Kaiser, P.K. (1992). «Practical Application of an Innovative Microseismic Source Location Procedure». *Geotechnical and Geological Engineering* 10:63-184.

Ge, M. et Mottahed, P. (1993). «An Automatic Data Analysis and Source Location System». *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* Kingston, Ontario. pp. 343-348.

Ge, M. et Mottahed, P. (1994). « Automated AE/MS Source Location Technique Used by Canadian Mining Industry». *Proceedings of the 12th International Acoustic Emission Symposium,* Sapporo, Japon. pp. 417-424.

Geiger, L. (1910). «Herbsetimmung bei Erdbeben aus den Ankunfzeiten». *K. Gessell. Wis. Goett.* 4:331-349.

Geiger, L. (1912). «Probability Method for the Determination of Earthquake Epicenters from the Arrival Time Only» (traduit de l'article de Geiger publié en 1910). *Bulletin of St. Louis University* 8 (1):56-71.

Gendzwill, D. et Prugger, A. (1989). «Algorithms for Micro-Earthquake Location». *Proceedings of the Fourth Conference on Acoustic Emission/Microseismic Activity in Geologic Structures,* Pennsylvania State University, 1985, pp. 601-616.

Hardy, H.R. Jr. et Mowrey, G.L. (1981). «A Microseismic Study of an Underground Natural Gas Storage Reservoir». *Volume II – Field Data Analysis and Results.* American Gas Association, Inc., Arlington, Virginia, A.G.A Cat. No. L51396, 343 p.

Hines, W. et Montgomery, W. (1980). *Probability and Statistics in Engineering and Management Science.* John Wiley & Sons, Inc., New York.

Kijko, A. (1995). Lettre à M. Ge, chercheur à CANMET. Western Levels, République d'Afrique du Sud.

Lee, W.H.K. et Stewart, S.W. (1981). «Principles and Applications of Microearthquake Networks». *Adv. Geophys.* Suppl. 2.

Leighton, F. et Blake, W. (1970). *Rock Noise Source Location Techniques.* USBM RI 7432, 14 p.

Leighton, F. et Duvall, W.I. (1972). *A Least Squares Method for Improving Rock Noise Source Location Techniques.* USBM RI 7626, 19 p.

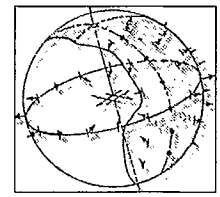
Lienert, B.R. et Frazer, L.N. (1983). «An Improved Earthquake Location Algorithm». *EOS,* Trans. Am. Geophys. Union 64, 267 pages.

Mori, Y. (1994). Lettre adressée à M. Ge, chercheur à CANMET, au nom du comité organisateur et du comité du programme et des présentations. The 12th International Acoustic Emission Symposium. Chiab, Japon.

Prugger, A. et Gendzwill, D. (1988). «Microearthquake Location: A Non-Linear Approach that Makes Use of a Simplex Stepping Procedure». *Bull. Seism. Soc. Am.* 78:799-815.

Smith, E.G.C. (1976). «Scaling the equations of Condition to Improve Conditioning». *Bull. Seism. Soc. Am.* 66:2075-2076.

Thurber, C.H. (1985). «Nonlinear Earthquake Location: Theory and Examples». *Bull. Seism. Soc. Am.* 75:779-790.



Étude d'événements pour un grand intervalle de magnitudes

6.1 Introduction

Le présent chapitre résume les résultats du projet de recherche intitulé Étude portant sur les sources d'événements sismiques induits par l'exploitation minière pour un grand intervalle de magnitudes ($-4 < M < 4$). Le projet a été commandité par la Mining Research Directorate de l'Ontario dans le cadre du Programme canadien de recherche sur les coups de toit (PCRCT). Il porte sur l'analyse des propriétés des sources d'événements sismiques induits qui ont été enregistrés pour un grand éventail de magnitudes couvert par l'équipement d'enregistrement des trains d'ondes complets. Les données ont été enregistrées par le réseau de sismographes, le système macrosismique et le système microsismique de la mine Creighton d'Inco. Le projet a débuté en 1992 et représentait l'un des trois volets du projet d'analyse des mécanismes de la source des événements sismiques induits. Un rapport préliminaire est consacré au traitement des données recueillies dans le cadre du projet (Talebi, 1993). Le rapport final a été présenté au PCRCT en décembre 1994 (Talebi, 1994).

La section suivante comporte une description du projet, c'est-à-dire les objectifs, le site minier étudié, l'équipement d'enregistrement disponible et les relations d'échelle. Les définitions des notions reliées à la recherche sur les coups de toit sont présentées à la fin du rapport et ne sont donc pas répétées dans ce chapitre. Les données disponibles et les résultats du traitement des données (c'est-à-dire la correction des données pour tenir compte de l'atténuation, la détermination des paramètres de la source, leurs relations de proportionnalité) seront présentés dans la prochaine partie. Des conclusions suivront.

6.2 Description du projet

6.2.1 Objectifs

Le principal objectif du projet consiste à clarifier la nature des relations de proportionnalité, à savoir si les événements sismiques qui surviennent dans un grand intervalle de magnitudes ont ou non le même comportement, indépendamment de leur intensité. En réalité, un comportement semblable observé pour des événements sismiques induits de forte et de faible magnitude permettrait de faire une approximation de certains paramètres, comme la vitesse maximale des particules, en se fondant sur celle des événements de faible magnitude pour prévoir celle des événements de grande magnitude et vice-versa. La démarche visant à déterminer la proportionnalité a une incidence pratique réelle sur l'étude des coups de toit et l'estimation du risque. Les techniques employées dans cette démarche sont purement sismologiques et les résultats revêtent une importance du point de vue scientifique et technique pour les estimations du mouvement des massifs dans les mines de roche dure.

6.2.2 Site minier

Le site choisi pour la présente étude devait répondre à deux exigences fondamentales : il devait permettre d'enregistrer de nombreux événements sismiques dans un grand intervalle de magnitudes, et il devait permettre d'enregistrer l'intervalle complet de magnitudes des événements considéré dans le projet. Des régions minières de Sudbury et d'Elliot Lake, qui ont été les plus actives en Ontario au cours de la dernière

décennie, on a retenu le Bassin de Sudbury, qui répondait aux exigences de la présente étude (aucune mine sauf une à Elliot Lake n'était exploitée), et plus particulièrement la mine Creighton (la plus active sur le plan sismique dans le Bassin de Sudbury).

6.2.3 Systèmes d'enregistrement

Au Canada, trois types de systèmes d'enregistrement des trains d'ondes complets sont largement utilisés et couvrent trois intervalles de magnitudes (section 2.2.4). On les appelle couramment systèmes sismographiques, macrosismiques et microsismiques; ces systèmes sont conçus pour enregistrer les événements sismiques de forte, de moyenne et de faible magnitude respectivement. Les systèmes sismographiques, en particulier le Réseau sismographique numérique de CANMET (RSNC) sont décrits de façon détaillée au chapitre 3 (voir également Talebi et al., 1994). Dans la présente section, nous décrivons les systèmes macrosismiques et microsismiques utilisés pour réaliser l'étude.

6.2.3.1 Système macrosismique

CANMET se consacre depuis plusieurs années à l'élaboration d'un système macrosismique destiné à être utilisé dans des mines canadiennes (chapitre 4). Le système original comportait cinq capteurs triaxiaux installés dans des trous en surface ou souterrains, ou dans les deux. Pour éviter la saturation des capteurs par le bruit, les systèmes sont habituellement installés à une distance variant entre 0,5 et 1,0 km des zones actives d'exploitation minière. Habituellement, les systèmes macrosismiques enregistrent les signaux sismiques se situant dans la gamme de fréquences de 1 à 2 000 Hz et peuvent détecter des événements sismiques de magnitude supérieure à 0. Ils peuvent aussi enregistrer des signaux complets générés par des événements sismiques pendant une période allant jusqu'à 2 secondes.

Le système macrosismique installé à la mine Creighton compte cinq capteurs triaxiaux installés autour des zones actives d'exploitation minière. Les différents signaux captés sont amplifiés et transmis à un multiplexeur souterrain où ils sont multiplexés et envoyés à la surface par le biais d'un câble de fibre optique unique. Un dispositif de démultiplexage à la surface reconstitue les signaux avant de les envoyer aux systèmes de conditionnement et d'enregistrement. Le filtre anti-aliasing est réglé à 1 500 Hz et 72 dB/octave. Le taux d'échantillonnage est de 4 500 points par seconde et par canal, et les amplificateurs des capteurs sont à gain double avec sortie des signaux faibles et des signaux forts pour chaque axe. Il est ainsi possible d'obtenir une plage dynamique plus grande, donc d'enregistrer les événements sismiques de faible et de forte magnitude. Les sorties sélectionnées sont alors acheminées vers un dispositif de commande de la détection du déclenchement et vers une carte d'acquisition de données installée dans un ordinateur central. L'alimentation en courant continu requise pour faire fonctionner les capteurs et les amplificateurs souterrains est fournie par le multiplexeur qui se trouve sous terre. Le système d'exploitation employé est le système QNX, un système multi-utilisateur et multi-tâches : son exécution est rapide, il est efficace, accessible à distance et compatible avec le PC (section 4.2.6). Le logiciel d'acquisition est constitué de trois modules principaux : un module d'acquisition principal et secondaire ainsi qu'une application de démultiplexage, qui fonctionnent tous en même temps selon une priorité prédéfinie. Un module de configuration et un module d'affichage de base sont également fournis pour configurer l'exploitation du système et pour afficher les signaux. En outre, une tâche de communication est incluse dans le but de gérer l'accès à distance par modem. Les mines Macassa et Campbell utilisent un système semblable à celui de la mine Creighton.

La calibration des capteurs triaxiaux du système a été réalisée pour tous les sites en générant une onde sinusoïdale d'amplitude et de fréquence connues à chaque échelon d'entrée des préamplificateurs et en l'enregistrant comme s'il s'agissait d'un événement. Trois à quatre fréquences parmi les suivantes sont utilisées : 300, 600, 900 et 1 200 Hz. L'amplitude du signal enregistré est

ensuite mesurée et comparée aux mesures du signal original, et le facteur de calibration est calculé. Les facteurs d'amplification mesurés de cette manière pour les 15 composants de l'enregistrement sont représentés graphiquement en fonction de la fréquence, et la courbe d'ajustement optimal des résultats est tracée pour chaque composant aux fins de la calibration.

6.2.3.2 Système microsismique

Plusieurs systèmes microsismiques d'enregistrement complet mis au point à l'Engineering Seismology Laboratory de la Queen's University sont également utilisés à l'heure actuelle dans les mines de l'Ontario. Le premier système de ce type a été installé à la mine Strathcona de la Falconbridge en 1987 pour compléter le système ElectroLab MP250. Ce système comportait deux ordinateurs destinés à l'acquisition de données et enregistrait des signaux provenant des différents types de capteurs. Le premier ordinateur enregistrait des signaux provenant des 5 accéléromètres triaxiaux installés autour de la zone active d'exploitation minière, alors que le second ordinateur enregistrait les signaux des 15 accéléromètres uniaxiaux du système ElectroLab MP250. L'ensemble des données enregistrées de cette manière a été utilisé pour une analyse considérant plusieurs aspects de la sismicité induite, y compris la détermination de la localisation, les mécanismes et les paramètres de la source de l'événement (Talebi et Young, 1990).

En 1990, des systèmes microsismiques devaient être installés à la mine Creighton dans le cadre de projets sur les mécanismes de la source et la configuration des mines. Le plan initial consistait à ajouter six capteurs triaxiaux : trois en profondeur, un près de l'observatoire de neutrinos proposé et deux dans les niveaux supérieurs. Cependant, les exigences relatives au forage des trous ont empêché jusqu'en 1992 l'installation d'un système entièrement opérationnel (Urbancic et al., 1993). Le plan original a été modifié pour inclure d'autres projets de surveillance sismique. Une description détaillée du matériel microsismique de l'installation à la mine Creighton a été faite par Urbancic et al. (1993 et 1994).

6.2.4 Relations de proportionnalité

Les relations de proportionnalité des sources sismiques sont les relations qui existent entre les deux premiers types de paramètres de la source, c'est-à-dire les relations entre l'intensité de la source et ses dimensions. Plus précisément, une relation de proportionnalité décrit de quelle manière la durée de la source ou ses dimensions augmentent en fonction du moment sismique. Dans les études sur les paramètres de la source et ce, pour un grand nombre d'événements sismiques et dans un large éventail de magnitudes, on a observé que la chute de contrainte est sensiblement indépendante de la magnitude et qu'elle se situe généralement entre 0,1 et 10 MPa (Gibowicz, 1990b). Ce modèle a été confirmé par de nombreuses études sur les événements sismiques et volcaniques, les répliques sismiques, les secousses induites par l'exploitation minière en Afrique du Sud, en Pologne, etc. Un modèle de chute de contrainte constante fait intervenir un processus de rupture auto-similaire

Figure 6.1 Différence de chute de contrainte entre des tremblements de terre importants intraplaques et interplaques

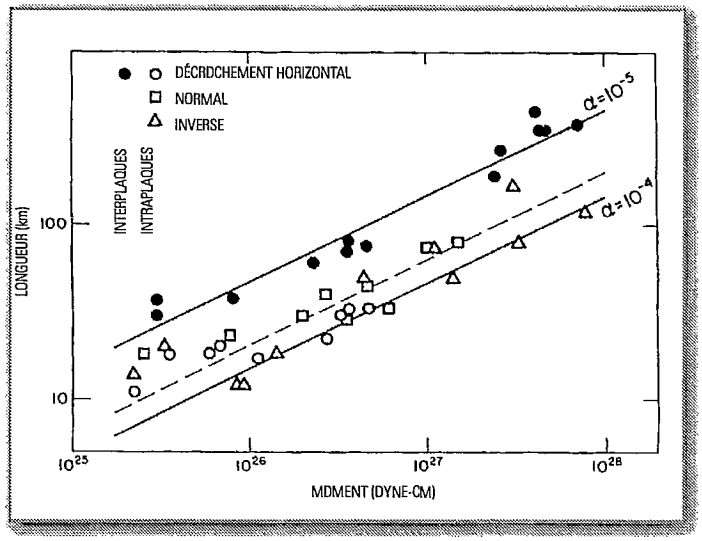
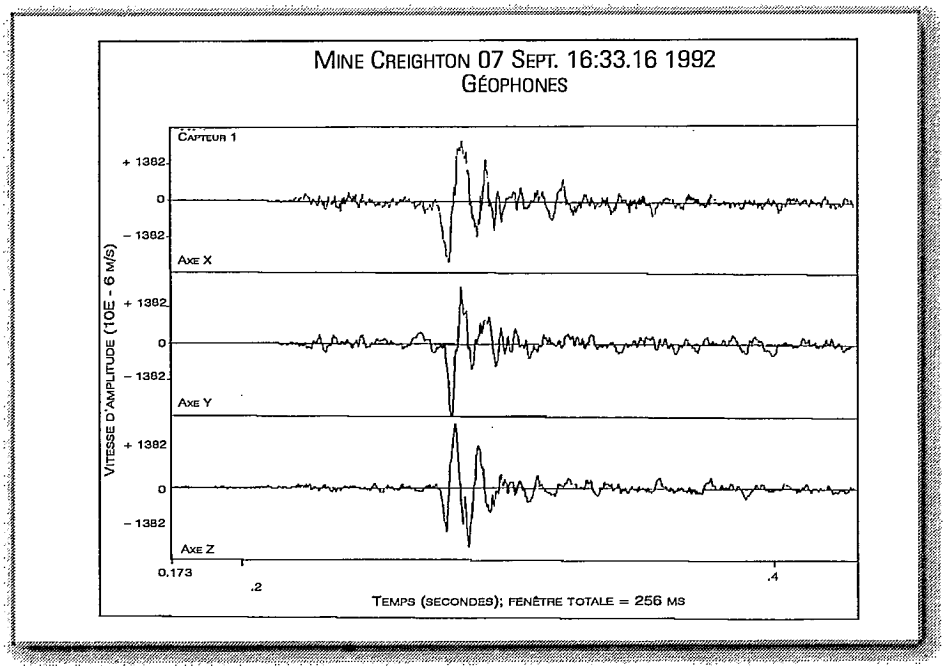


Figure 6.2 Exemple de signaux enregistrés par le système macrosismique de CANMET à la mine Creighton



indépendamment de l'ampleur des événements sismiques. Cela indique, en termes simples, que les tremblements de terre, les secousses induites par l'exploitation minière et les événements microsismiques sont générés d'une manière semblable, mais le long de zones de rupture de grandeurs différentes. Scholz et al. (1986) ont observé des niveaux plus élevés de chute de contrainte lors de grands tremblements de terre interplaques et intraplaques (figure 6.1).

Contrairement à l'observation générale selon laquelle le processus de rupture est similaire pour un large éventail de magnitudes, les recherches tendent à montrer une divergence de similarité pour les événements de très faible magnitude. On observe une telle divergence par une chute de contrainte marquée lorsque le moment sismique diminue. Cela pourrait s'expliquer par n'importe quel phénomène à la source, dans le sol, ou par le système d'enregistrement, qui réduit l'incidence des hautes fréquences des signaux enregistrés. Les sismologues proposent deux explications différentes en supposant que l'incidence du système d'enregistrement puisse être négligée. Hanks (1982) attribue le phénomène à un effet de propagation et affirme qu'il existe une limite de fréquence maximale f_{max} pouvant être détectée en raison de l'atténuation élevée près de la surface de la Terre. Aki (1984), par ailleurs, estime que ce phénomène est un effet réel de la source et que la source doit avoir des dimensions minimales (Scholz, 1990). Une description plus détaillée du sujet est présentée au chapitre 2.

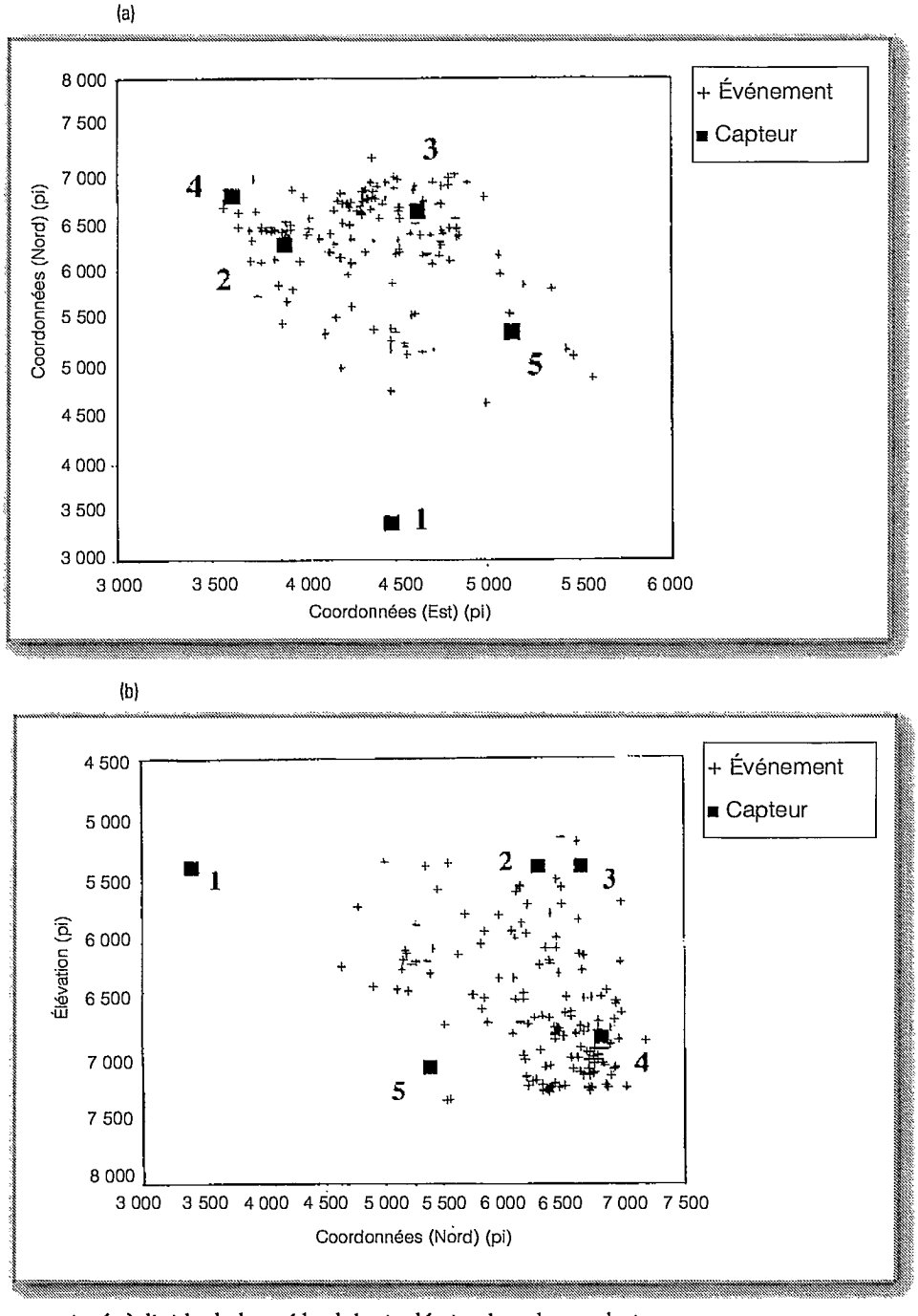
6.3 Traitement des données

Cette section présente les résultats du traitement des données. Une description des données disponibles sera d'abord effectuée, puis suivra la procédure employée pour l'analyse spectrale et la mise en oeuvre de la correction qui tient compte de l'atténuation pour l'ensemble de données macrosismiques. Viendront ensuite les résultats de la détermination des paramètres de la source et leurs relations de proportionnalité.

6.3.1 Données disponibles

Dans la présente étude, les données recueillies par les systèmes microsismiques et macrosismiques ont été examinées. L'ensemble de données macrosismiques compte plus de 150 événements enregistrés pendant la période de décembre 1992 à juin 1993 et un exemple de ce type de signaux à la mine Creighton est illustré à la figure 6.2. La figure 6.3 illustre les projections en plan et en coupe des 5 capteurs triaxiaux et des localisations des événements pour les données enregistrées par le système macrosismique. L'ensemble de données microsismiques utilisé était constitué de 91 événements enregistrés à la suite d'un dynamitage de post-production. Les résultats du traitement des données ont été étudiés par Urbancic et al. (1994).

Figure 6.3 Vue en plan (a) et coupe verticale (b) indiquant l'emplacement des capteurs et la localisation de la source des événements à la mine Creighton



6.3.2 Analyse spectrale

L'analyse spectrale a été réalisée à l'aide d'un système d'infographie interactive qui permettait de choisir les fenêtres de signal et de bruit pour tout canal sismique. Les séries temporelles ont été modifiées à l'aide d'une fonction cosinusoïdale avant de calculer le spectre au moyen d'un algorithme FFT (Fast Fourier Transform/transformée de rapide de Fourier). Les spectres ont été corrigés pour tenir compte de la réponse des instruments avant les calculs des paramètres spectraux. Les effets de l'atténuation sur chaque spectre ont été approximés à l'aide de la méthodologie décrite dans la prochaine section et les spectres corrigés ont été utilisés pour déterminer les paramètres de la source. Les spectres du bruit observé avant chaque signal ont été calculés et représentés dans le même graphique. La figure 6.4 montre des exemples de spectres de déplacement observés. Les traces sur ces figures (de bas en haut) sont respectivement les traces du bruit avant l'arrivée du signal, le signal original de l'onde S et le signal corrigé de l'onde S qui tient compte des effets de l'atténuation. Les calculs détaillés s'y rapportant sont présentés dans les parties suivantes.

6.3.2.1 Correction des données pour tenir compte de l'atténuation

Les spectres sismiques doivent être corrigés pour tenir compte de l'atténuation causée par la propagation de l'onde le long du parcours source-capteur. Ces corrections sont de la plus haute

importance pour la détermination adéquate des paramètres des sources d'événements de faible magnitude, même si ces derniers sont enregistrés à de courtes distances (Gibowicz, 1990b). Les effets de l'atténuation sur les signaux sismiques et microsismiques et la nécessité d'effectuer une correction appropriée ont été signalés par plusieurs auteurs (Talebi et Cornet, 1987; Cranswick et Sembera, 1989). Pour corriger les données afin de tenir compte de l'atténuation le long du parcours, les spectres doivent être multipliés par le terme exponentiel $\exp(\pi f R / C Q)$ où

f est la fréquence considérée

R est la distance source-capteur

C est la vitesse de l'onde

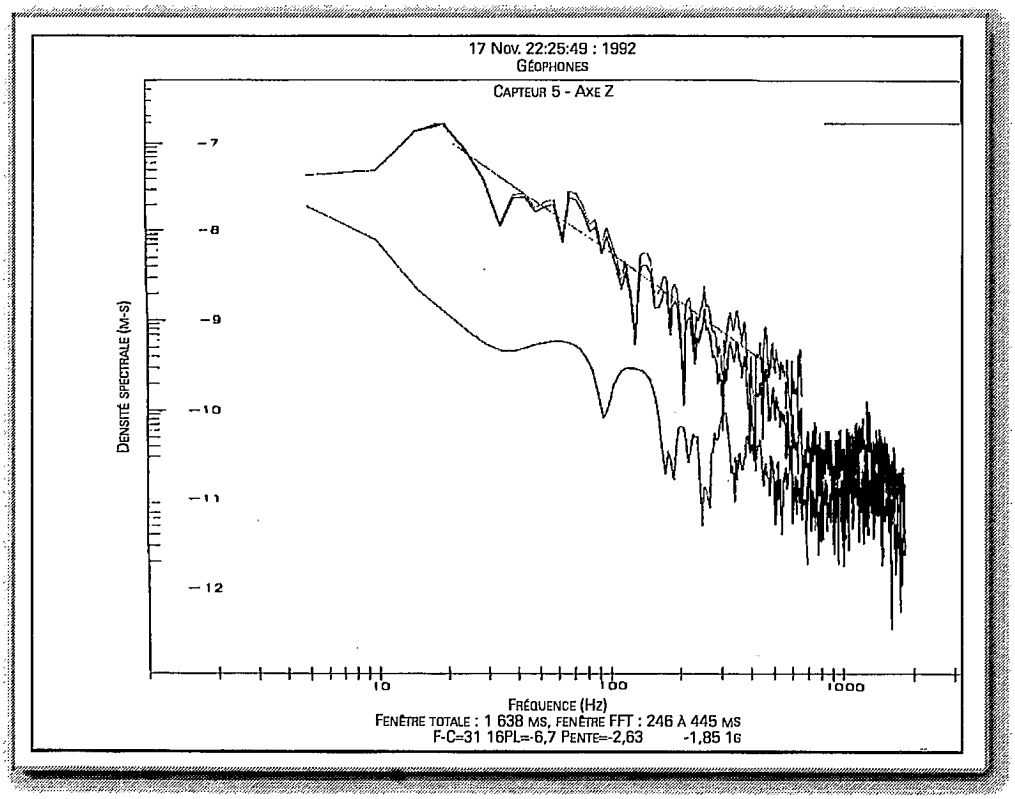
Q est le facteur de qualité de l'onde.

Ce dernier paramètre est l'un des plus couramment utilisés dans les mesures relatives à l'atténuation. Un autre paramètre, également utilisé dans cette étude, est le Kappa (K). En l'absence d'effets locaux du site ou lorsque ces effets peuvent être négligés, (K) est défini comme suit :

$$K = \pi R / C Q \qquad (1)$$

Comme mentionné auparavant, la tendance décroissante des hautes fréquences dans le spectre de déplacement, selon le modèle de Brune, mène à une pente décroissante de -2. Plusieurs auteurs confirment cette observation (Hanks et McGuire, 1981). La pente observée dans les spectres de déplacement des événements sismiques est habituellement égale ou inférieure à -2. La différence entre la valeur de la pente observée et -2 est habituellement attribuée à l'atténuation et plusieurs auteurs ont utilisé cette propriété dans les mesures d'atténuation (Feustel et al., 1993; Spottiswoode, 1993).

Figure 6.4 Exemple de spectre de déplacement observé pour un événement macrosismique



La démarche suivie dans la présente étude est compatible avec cette méthodologie. La procédure consiste, dans un premier cas, à mesurer la pente observée de la tendance décroissante des hautes fréquences des spectres de déplacement. La présence de f_{max} dans certains cas, ainsi que d'autres effets aux fréquences supérieures à 1 kHz dans d'autres cas ont entraîné certaines irrégularités dans les spectres aux très hautes fréquences (figure 6.4). Cela a posé quelques problèmes dans l'utilisation de la bande de fréquences allant jusqu'à 1 500 Hz, étant donné que des estimations non réalistes seraient alors obtenues. Une fenêtre sur les spectres de déplacement a été définie pour les mesures de l'atténuation; elle était limitée par une fréquence faible et une fréquence élevée (f_L et f_H), habituellement d'environ quelques Hz et de quelques centaines de Hz respectivement. La fréquence-coin (f_0), où le spectre commence à décliner, a alors été estimée et la droite d'ajustement optimal entre cette fréquence et f_H a été calculée. Le facteur Q est calculé à l'aide de la relation suivante :

$$Q = \frac{\pi \log_e R\,(f_H - f_0)}{C[2\log(f_0/f_H) + \log(U(f_0)/U(f_H))]} \qquad (2)$$

où $\log_e$ est un facteur de conversion logarithmique

$U(f_0)$ et $U(f_H)$ sont les amplitudes du spectre de déplacement à f_0 et à f_H

C est la vitesse de l'onde S, qui est de 3 658 m/s.

Des estimations raisonnables du facteur Q ont été obtenues dans la majorité des cas où des mesures de l'atténuation avaient été faites, bien que le choix de la limite de haute fréquence (f_H) ait semblé avoir une certaine incidence sur les résultats finaux. On a tenté d'obtenir des mesures de Q_S pour plus de 150 événements macrosismiques captés à chaque canal où l'enregistrement s'est fait avec un rapport signal/bruit raisonnable. La figure 6.5 présente un histogramme des résultats. On peut constater que la concentration maximale dans Q_S se produit dans la gamme de 50 à 150. Il semble de plus y avoir une limite supérieure d'environ 500.

Les résultats des mesures d'atténuation pour les cinq capteurs sont présentés à la figure 6.6. Dans cette figure, le facteur Kappa a été représenté graphiquement en fonction de la distance source-capteur dans une échelle bilogarithmique, avec des droites de Q_S constant et où chaque point est la valeur moyenne de mesures pouvant aller jusqu'à 3. Les limites inférieure et supérieure de Q_S sont clairement de 20 et de 500. Les résultats de Q_S pour des sites individuels sont présentés par Talebi (1993). La comparaison entre ces deux ensembles de résultats semble confirmer la limite supérieure de 500 pour tous les capteurs, bien que l'intervalle des distances à l'hypocentre étudiées varie d'un capteur à l'autre. Habituellement, la distance varie entre 80 m et 800 m, à l'exception du capteur 1 pour lequel les distances sont d'environ 1 km. Ce résultat explique en partie le nombre moins élevé de mesures obtenues pour le premier capteur, comparativement aux

Figure 6.5 Histogramme illustrant les résultats des mesures du facteur de qualité des ondes S (Q_S)

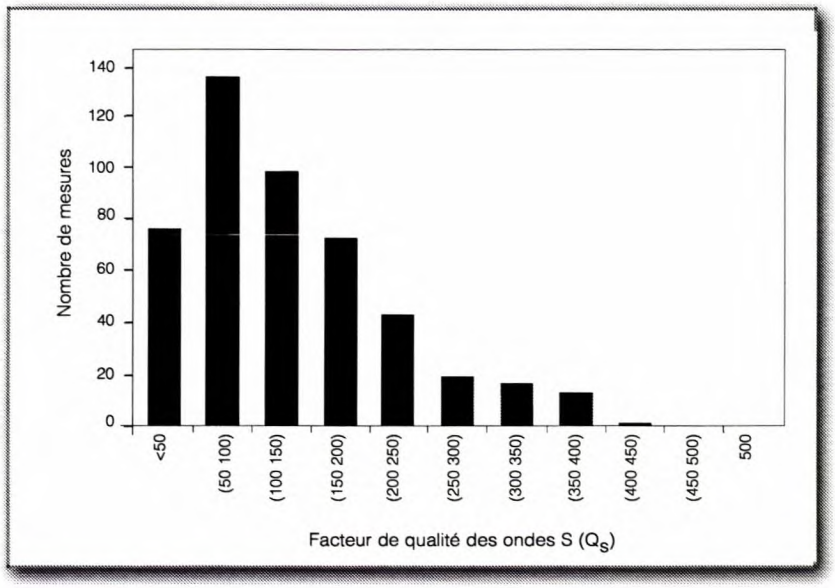
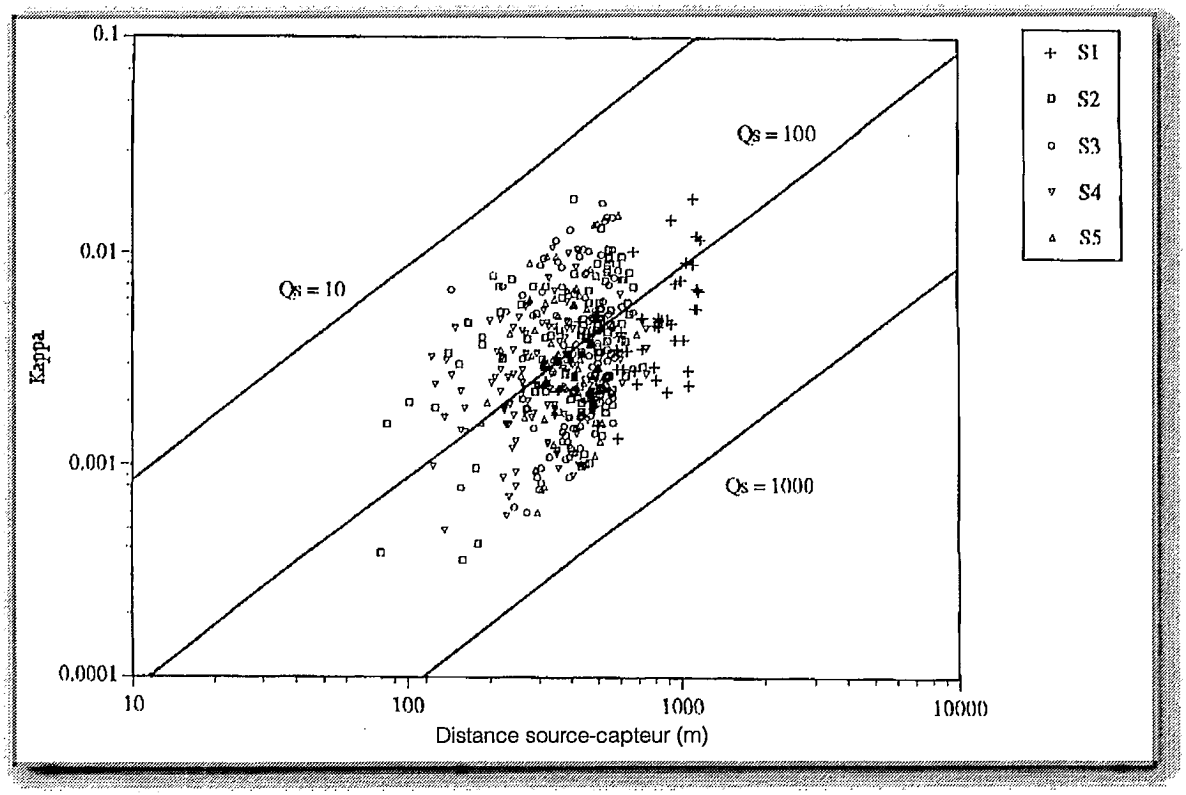


Figure 6.6 Facteur d'atténuation des ondes S (Kappa) en fonction de la distance source-capteur sur une échelle bilogarithmique pour les cinq capteurs (S1 à S5)



autres. Ainsi, la limite inférieure des résultats du capteur 1 est plus élevée que la limite de 20 des autres capteurs. Les plus grands intervalles de distances sont observés aux capteurs 2 et 4, mais les mêmes tendances générales y sont observées. La valeur de Kappa se situe dans l'intervalle défini par 0,0004 et par 0,02 pour toutes les unités.

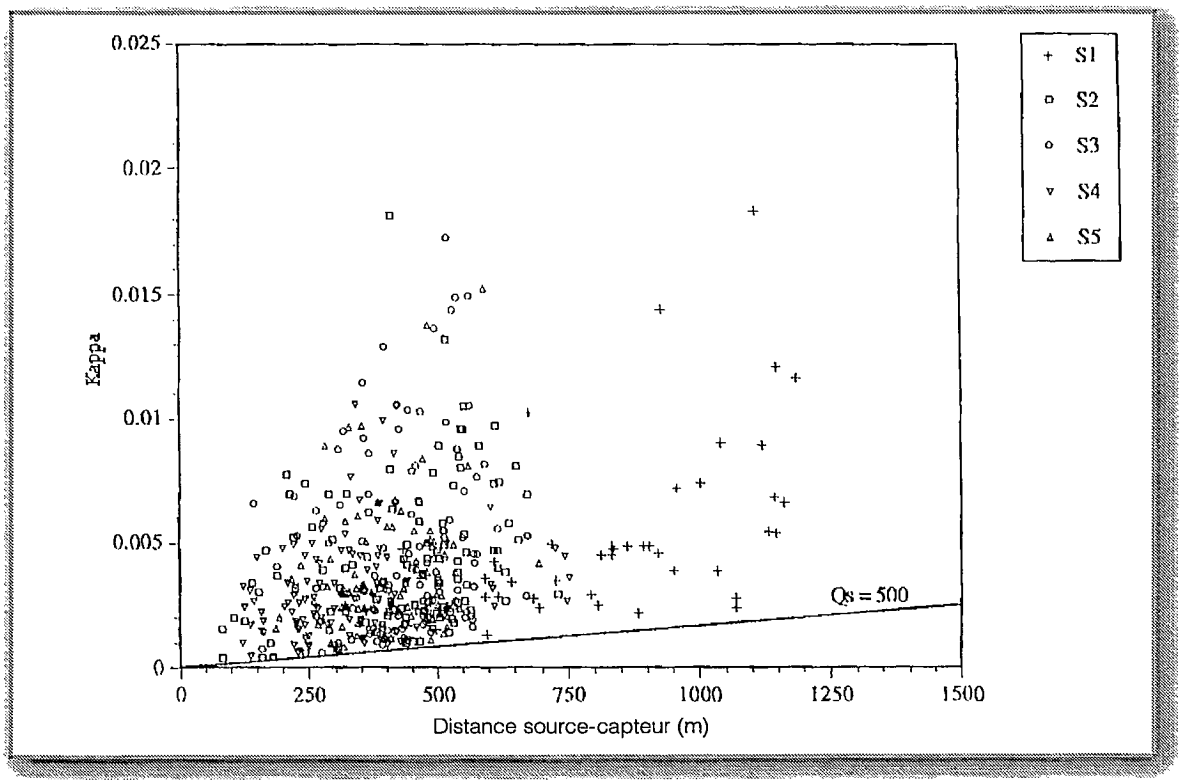
Anderson et Hough (1984) ont effectué une analyse semblable des ondes S générées lors d'un tremblement de terre survenu en Californie. Leurs observations ainsi que celles d'autres auteurs semblent indiquer qu'au moins une partie de l'atténuation observée en utilisant le paramètre Kappa (K) peut être attribuée aux effets du capteur le plus près, particulièrement lorsque les capteurs se trouvent près de la surface. L'équation 1 peut être réécrite comme suit :

$$K = K_0 + \pi R / C Q \qquad (3)$$

Dans l'étude d'Anderson et Hough (1984), la détermination de la valeur de K_0 pour les stations placées sur différents types de milieux rocheux indiquait des valeurs distinctes de 0,066, de 0,065 et de 0,04 respectivement pour des alluvions, des sédiments consolidés et de la roche, bien qu'un facteur K légèrement différent ait été utilisé. De même, lorsque les résultats des mesures de Kappa ont été représentés graphiquement en fonction de la distance, on a déterminé que la pente était plus fortement inclinée pour les stations installées sur des affleurements rocheux que pour celles installées sur des alluvions.

Afin d'étudier ces effets dans le cas qui nous occupe, les mesures de Kappa ont été représentées graphiquement en fonction de la distance sur une échelle linéaire pour tous les capteurs (figure 6.7). La limite supérieure des résultats à une valeur de 500 a été montrée et il existe une limite inférieure évidente à environ 20. Deux autres observations peuvent être faites à partir de cette figure. Les données sont plutôt dispersées en raison du fait que les ondes doivent traverser des zones de roche fissurée, de remblai, etc. et qu'elles sont fortement influencées par ces zones.

Figure 6.7 Facteur d'atténuation des ondes S (Kappa) en fonction de la distance source-capteur sur une échelle linéaire pour les cinq capteurs (S1 à S5).



De plus, les résultats seront bien décrits si aucun effet local ou près du site ne s'est produit dans la fenêtre Q_S = 20 à 500. Cette observation a été renforcée par l'examen des résultats obtenus pour les différents capteurs. Le degré de dispersion des données est manifeste lorsqu'on observe les résultats. Il est intéressant de noter que la dispersion est minimale au capteur 1, qui est le plus éloigné de l'activité, ce qui signifie que les ondes traversent en majeure partie le massif rocheux non perturbé. Dans ce cas, les effets locaux sur le site sont évidemment négligeables. La dispersion des données fait qu'il est difficile de quantifier les effets locaux sur le site pour les autres capteurs; en outre, comme ces effets semblent négligeables, ils ne seront pas considérés aux fins de la présente étude.

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, la dispersion des résultats peut s'expliquer par la présence de roche fissurée et de remblai dans la mine. Ces zones contribuent fortement à atténuer l'onde, même si les distances sont plutôt réduites, comme nous l'observons dans le cas qui nous occupe. Ces résultats indiquent également que l'utilisation d'une valeur moyenne donnée au paramètre d'atténuation pour l'ensemble de la mine, telle que supposée dans certaines études, aura une sérieuse incidence sur la détermination des paramètres de la source sismique, étant donné que de telles estimations ne sont pas fiables à moins que des corrections ne soient faites dans chaque cas pour tenir compte de l'atténuation.

6.3.2.2 Détermination des paramètres de la source

Deux paramètres indépendants ont été calculés directement d'après les spectres de déplacement des ondes S corrigés pour tenir compte de l'atténuation :

Ω_0, le plateau basses fréquences des spectres de déplacement,

J_C, le flux d'énergie, soit l'intégrale du carré de la vitesse de l'onde S.

La méthode de Snoke (1987) a été utilisée avec succès par Gibowicz et al. (1991). Deux fréquences (f_1 et f_2) sont définies dans cette démarche comme étant les limites de la largeur de bande spectrale pour laquelle on calcule le flux d'énergie. Dans cette méthode, on suppose une amplitude spectrale constante pour le spectre de déplacement aux fréquences inférieures à f_1 et une décroissance de f^{-2} aux fréquences supérieures à f_2. Les détails de cette procédure sont exposés dans Gibowicz (1990a et b).

Les fréquences-coins peuvent alors être calculées à l'aide de l'équation suivante :

$$f_0 = (J_c / 2 \pi^3 \Omega_0^2)^{1/3} \qquad (4)$$

Lorsque les estimations de Ω_0 et de J_c étaient disponibles, les fréquences-coins ont été déterminées pour chaque capteur. Les plateaux basses fréquences ont été calculés pour chaque capteur sous forme de somme vectorielle de leurs trois composants d'enregistrement, le flux d'énergie pour chacun d'eux étant la somme des mesures des trois composants. Les résultats de la détermination de la fréquence-coin obtenus par la démarche automatique ont indiqué une surestimation des fréquences-coins dans un certain nombre de cas. DiBona et Rovelli (1988) rapportent que les effets de la largeur de la bande sur les estimations des paramètres de la source pourraient être très importants lorsque les fréquences-coins ne se trouvent pas au milieu de la bande de fréquences choisie. D'après cette hypothèse, les données qui se trouvent dans cette catégorie ont dû être exclues de l'ensemble des données et des déterminations manuelles ont été utilisées dans les cas où les fréquences-coins étaient plus élevées que le milieu de la bande de fréquences. Les paramètres qui caractérisent la source sont calculés à l'aide de la méthodologie et des équations décrites par Talebi (1993 et 1994).

Le tableau 6.1 résume les résultats moyens de la détermination des paramètres de la source pour tous les événements analysés dans le cadre de la présente étude. Voici les intervalles de quelques paramètres de la source tirés du tableau :

Magnitude du moment :	de 0,4 à 2,6
Moment sismique :	de 3,6 à 7 470 GNm
Rayon de la source :	de 8,8 à 152,9 m
Chute de contrainte :	de 0,03 à 10,6 MPa

Tableau 6.1 Résultats de la détermination des paramètres de la source.
m_N est la magnitude de Nuttli, M est la magnitude du moment, R_V est le paramètre de la vitesse maximale, M_0 est le moment sismique, r_0 est le rayon de la source et $\Delta\sigma$ est la chute de contrainte. Tous les résultats ont été corrigés pour tenir compte de l'atténuation le long du parcours de l'onde.

Événement	m_N	M	R_V(m²/S)	M_0(GNm)	r_0(m)	Δσ(MPa)	Événement	m_N	M	R_V(m²/S)	M_0(GNm)	r_0(m)	Δσ(MPa)
1	2,1	2,0	4,17	980,0	49,7	6,48	47		1,1	0,58	48,5	19,8	3,57
2		1,3	0,51	82,0	24,5	2,24	48		0,9	1,21	22,5	11,3	6,38
3		1,4	0,55	146,1	26,5	2,08	49		1,6	0,58	238,0	34,6	4,19
4	2,8	2,4	7,43	4606,0	88,1	3,67	50		1,7	1,08	382,0	36,6	4,06
5		1,4	2,16	144,2	21,7	4,32	51		1,2	0,60	70,6	21,4	5,63
6		1,4	1,21	115,6	18,9	6,29	52		1,4	0,63	119,0	21,6	7,15
7		1,8	0,70	426,5	58,6	1,65	53		1,1	0,61	40,2	17,5	4,34
8		0,9	1,13	20,0	24,8	0,56	54	1,6	1,7	1,18	359,0	32,3	6,27
9		1,2	0,91	62,2	12,0	1,92	55		1,1	1,35	49,0	12,1	6,55
10		1,2	1,83	66,1	17,0	6,00	56		0,8	0,56	18,7	32,5	0,24
11		1,3	0,36	79,3	18,4	5,66	57		0,9	0,69	25,7	14,7	3,97
12		0,9	0,40	19,6	12,0	5,67	58		1,3	0,80	91,2	22,2	3,87
13		1,4	0,49	113,0	21,5	3,99	59		0,9	0,91	23,7	15,3	4,87
14		1,4	0,63	146,0	24,1	4,07	60		1,5	1,17	169,0	38,7	1,38
15		0,8	0,91	13,6	13,9	4,30	61		1,0	1,16	33,1	17,4	3,85
16		1,2	0,96	73,5	22,7	4,26	62		1,0	0,87	31,3	27,3	1,27
17		1,0	0,97	28,0	13,3	6,14	63		1,0	0,36	30,9	18,0	2,40
18	2,2	1,7	0,75	356,0	35,1	3,79	64		1,1	0,50	48,7	21,4	5,37
19		1,4	1,02	136,0	15,0	9,55	65		1,5	0,34	169,0	44,0	1,30
20		1,6	3,02	295,0	31,5	3,93	66		1,3	0,65	98,9	23,6	4,55
21		1,3	1,05	89,8	23,4	3,97	67		1,4	0,91	115,0	26,6	4,10
22	2,0	1,9	2,90	675,0	44,9	3,90	68		1,3	0,33	95,2	29,2	4,33
23	2,8	2,6	6,72	7470,0	128,4	1,81	69		1,2	0,26	62,3	17,4	5,58
24		1,0	0,47	26,7	24,0	1,09	70		1,5	0,77	207,0	30,1	4,79
25		1,0	0,64	34,9	27,0	0,93	71		1,0	0,33	37,0	15,1	5,45
26		1,1	0,74	40,1	82,8	0,03	72		1,6	0,72	285,0	47,2	1,59
27		1,4	0,89	135,0	35,4	2,88	73		1,3	0,88	105,0	25,2	3,50
28		0,8	0,27	16,7	24,8	2,62	74		1,3	1,51	99,4	15,1	9,52
29		1,4	0,74	121,0	26,0	3,47	75		0,7	0,36	11,8	16,9	1,09
30		1,5	0,95	205,0	35,3	2,96	76		0,7	0,55	12,3	13,2	3,10
31		1,3	0,84	85,8	66,7	0,39	77		1,1	1,01	42,3	14,9	7,20
32		1,7	0,73	393,0	27,9	1,05	78		1,8	0,86	540,0	58,3	0,99
33	2,2	1,9	3,14	754,0	60,4	4,81	79		1,1	0,41	45,3	17,4	4,92
34	1,5	1,7	0,75	319,0	152,9	0,05	80		1,6	1,20	293,0	57,0	3,90
35		1,9	1,11	692,0	61,4	2,3	81		1,7	0,63	306,0	51,5	1,33
36	2,6	2,2	2,60	1810,0	87,9	1,66	82		1,5	1,11	202,0	24,6	5,18
37		1,1	1,01	46,4	56,8	0,51	83		1,0	0,32	31,5	13,5	7,80
38		1,3	2,08	90,8	30,5	1,54	84		1,3	0,87	79,7	19,3	5,54
39		0,7	0,33	11,2	35,5	0,47	85		0,9	0,60	21,8	13,0	5,86
40		0,4	0,33	3,6	26,1	1,70	86		1,2	0,52	56,5	30,1	0,73
41		0,8	0,59	18,5	33,2	0,82	87		1,5	0,60	194,0	30,8	3,95
42		0,7	1,08	12,1	27,0	1,81	88	2,7	2,3	4,41	2550,0	80,5	2,73
43		1,0	0,48	28,6	21,2	2,26	89		1,3	0,87	91,3	19,2	6,77
44	1,8	1,9	1,55	757,0	62,4	2,57	90		1,5	0,90	192,0	46,2	1,73
45	1,9	1,9	0,74	609,0	51,1	5,05	91		1,3	0,55	99,2	35,8	1,52
46		1,2	0,41	72,6	28,0	2,93	92		1,5	0,82	165,0	15,1	9,34

Tableau 6.1 (suite)

Événement	m_N	M	R_V(m²/S)	M_0(GNm)	r_0(m)	Δσ(MPa)	Événement	m_N	M	R_V(m²/S)	M_0(GNm)	r_0(m)	Δσ(MPa)
93		1,4	0,75	137,0	24,8	4,19	121		0,7	0,81	9,8	9,3	7,08
94		1,2	0,50	72,7	18,8	3,21	122		1,3	0,83	90,1	33,6	0,41
95		1,4	0,75	119,0	24,4	4,40	123		1,1	1,10	52,5	11,3	8,89
96		1,1	1,10	52,4	16,5	4,66	124		0,9	0,52	25,0	14,0	5,16
97		0,7	0,79	13,1	10,6	5,23	125		1,2	0,53	56,0	29,5	2
98	2,2	2,1	2,17	1310,0	41,4	6,48	126		1,1	0,77	47,6	46,7	0,04
99		1,5	1,21	209,0	21,9	5,93	127		1,6	2,24	214,0	29,0	3,82
100		1,4	0,56	108,0	19,4	6,48	128		0,8	0,45	16,9	11,6	5,6
101		1,3	1,11	102,0	21,1	4,16	129		1,1	0,56	43,7	55,7	0,34
102		1,2	0,87	68,6	16,4	6,78	130	2,0	1,9	3,03	771,0	81,3	0,64
103		1,5	1,63	178,0	23,2	4,85	131		1,5	0,74	172,0	37,4	2,39
104		1,3	0,67	89,3	26,8	2,13	132		1,5	1,76	165,0	25,1	2,97
105		1,4	1,35	143,0	22,2	5,54	133		1,5	1,76	190,0	24,1	6,05
106		1,2	0,74	71,1	29,6	3,39	134		1,0	0,52	27,4	10,3	10,64
107		1,3	0,63	77,4	22,7	4,9	135		1,2	0,55	59,9	16,3	5,93
108		1,4	1,13	127,0	21,3	7,51	136		1,5	1,21	161,0	28,4	3,81
109		0,9	0,49	23,8	10,6	9,15	137		1,7	0,40	341,0	42,0	4,6
110		1,2	1,25	72,3	15,9	7,57	138		1,0	0,41	26,7	21,9	1,68
111		1,9	2,62	674,0	58,6	1,16	139		0,8	0,80	18,3	31,0	0,27
112		1,5	1,43	197,0	29,3	5,08	140		0,7	0,34	12,7	27,8	0,54
113	2,5	2,1	8,01	1250,0	57,7	1,04	141		0,7	0,32	13,2	14,8	4,75
114		1,5	0,82	186,0	33,4	3,34	142		0,4	0,32	4,0	28,6	0,88
115		1,1	0,82	37,8	18,6	3,6	143		0,7	0,53	10,0	10,8	3,43
116		1,1	0,55	48,7	17,0	6,5	144		1,7	1,13	397,0	64,3	1,28
117		1,5	3,78	202,0	24,8	9,3	145		1,3	0,92	94,9	25,6	4,27
118		1,2	1,03	60,8	20,0	1,66	146		0,6	0,99	9,4	28,8	0,31
119		0,9	0,34	23,0	12,0	4,33	147		1,2	0,44	53,3	40,2	1,22
120		0,8	0,36	13,7	8,8	5,06	148		1,3	0,75	98,1	28,6	1,54

6.3.3 Relations de proportionnalité

Une fois que les paramètres de la source ont été déterminés en considérant toutes les données dans les calculs, on peut poursuivre en analysant la relation de proportionnalité à l'aide de ces données. L'exercice le plus intéressant consiste à comparer les résultats de la présente étude à ceux d'autres auteurs en ce qui concerne la dépendance de la chute de contrainte par rapport aux dimensions de la source. La figure 6.8 présente le graphique du moment sismique en fonction du rayon de la source pour ce qui concerne la présente étude. Une grande partie des résultats indique une chute de contrainte qui se situe dans l'intervalle de 0,1 à 10,0 MPa, telle que décrite dans la partie précédente, ce qui confirme les observations antérieures rapportées dans la littérature. Toutefois, on observe que les chutes de contrainte tendent à se trouver du côté le plus élevé de la fenêtre susmentionnée. L'examen attentif du graphique ne permet de tirer aucune conclusion claire pour ce qui est d'une relation de dépendance de la chute de contrainte par rapport au moment. Bien qu'on observe une certaine diminution du moment sismique à l'extrémité la plus faible du spectre, la grande majorité des points suivent une dépendance type qui est prévue pour des comportements semblables de la source.

La figure 6.9 présente le graphique du paramètre de la vitesse maximale R_V en fonction du moment sismique pour la présente étude. McGarr (1984) a analysé un grand nombre de tremblements de terre et d'événements induits par l'exploitation minière enregistrés dans un large éventail de magnitudes et fait état d'une pente de 0,44 pour la droite d'ajustement optimal (figure 6.9); cependant, la plupart des modèles (Brune, 1970 et 1971;

McGarr, 1981) ont une pente de 0,33 pour cette échelle, ce qui laisse supposer une dépendance par rapport au modèle. McGarr (1984) indique dans son étude des échelles de Rv se rapportant à $M_0^{1/3}$, comme prévu, et attribue les écarts à plusieurs facteurs comme les contraintes dans la croûte terrestre et la profondeur focale ou les conditions locales du site. Fait intéressant, la droite d'ajustement optimal pour l'ensemble de données de la présente étude indique une pente de 0,33, ce qui est compatible avec un processus de rupture autosimilaire. Ainsi, on peut conclure sans hésitation que, dans la présente étude sur les résultats macrosismiques, les sources sismiques présentent un comportement autosimilaire.

Afin d'examiner la validité de ces observations pour des magnitudes plus faibles, deux autres ensembles de données ont été considérés. La figure 6.10 est la représentation graphique du moment sismique en fonction du rayon de la source se rapportant à la présente étude, ainsi qu'aux résultats de Gibowicz et al. (1991) et Urbancic et al. (1994). Les derniers résultats sont issus de l'analyse d'une séquence d'événements microsismiques enregistrés à la mine Creighton à la suite d'un dynamitage de post-production survenu en octobre 1992. Les résultats d'Urbancic et al. sont comparables aux résultats dont il est question ici sous plusieurs rapports. Le mécanisme principal de perte d'énergie est l'atténuation intrinsèque pour un facteur de qualité dominant d'environ 100, bien qu'une méthode de mesure différente ait été utilisée. En outre, les résultats indiquent clairement un comportement autosimilaire de la source, tel que précisé dans le rapport.

Les résultats de Gibowicz et al. (1991) sont tirés de l'analyse d'événements microsismiques enregistrés au Laboratoire de recherche souterraine (LRS) d'EACL pendant la période d'extension du puits du niveau 300 au niveau 420 (Talebi et Young, 1992). Le massif rocheux à l'étude au LRS est une roche granitique homogène où des éléments complexes associés à la géologie locale et la présence de zones de remblai qu'on trouve fréquemment dans un environnement minier courant peuvent être négligés sans problèmes.

Les données traitées par Gibowicz et al. (1991) étaient de deux types : pour l'un des ensembles de données, les déterminations du mécanisme au foyer étaient connues; pour l'autre ensemble, les mécanismes au foyer étaient inconnus et c'est pourquoi des valeurs moyennes ont été utilisées. Pour être compatibles avec les résultats présents, les estimations du moment sismique et du rayon de la source ont dû être modifiées à l'aide de valeurs moyennes des coefficients de rayonnement utilisés dans le modèle de Brune (1970). Fait intéressant à noter, les principales conclusions de Gibowicz et al. (1991) sont demeurées valides après ces modifications, comme le démontrent deux observations à la figure 6.10.

Figure 6.8 Moment sismique en fonction du rayon de la source pour les résultats de l'étude. Les lignes droites représentent les valeurs constantes de chute de contrainte.

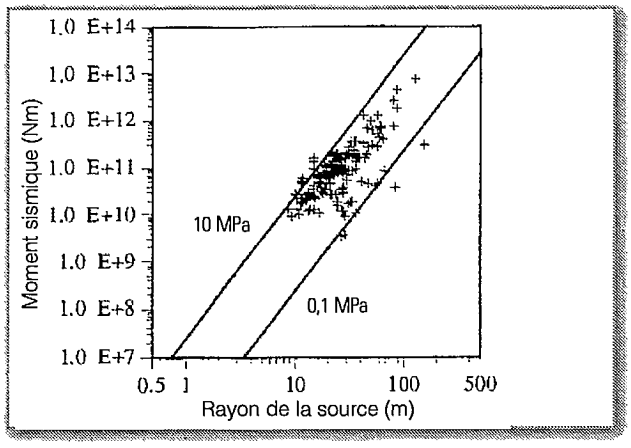


Figure 6.9 Paramètre de la vitesse maximale (R_v) en fonction du moment sismique (M_0)

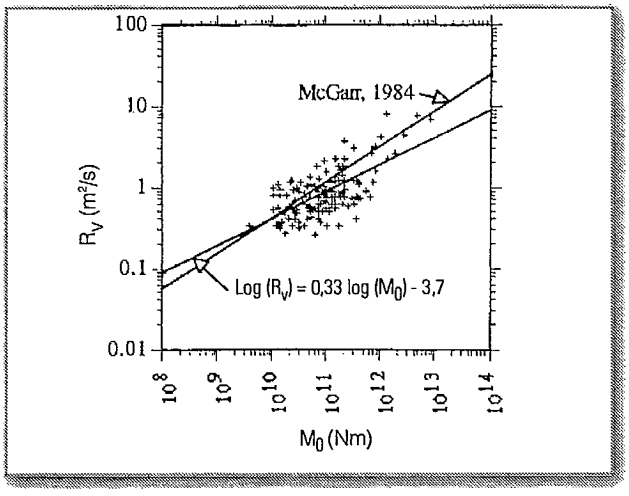
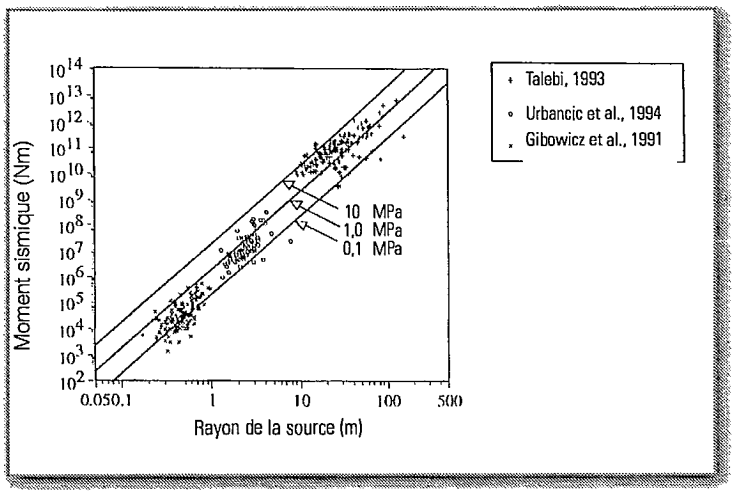


Figure 6.10 Moment sismique en fonction du rayon de la source



Les estimations de la chute de contrainte sont quelque peu inférieures à celles rapportées et dépendent généralement du moment sismique, ce qui est compatible avec un comportement non similaire observé pour des événements induits de faible magnitude. L'examen de la figure 6.10 laisse supposer que la majorité des résultats indiquent une chute de contrainte qui se situe dans l'intervalle de 0,1 à 100 MPa, intervalle prévu pour les sources autosimilaires. Toutefois, les résultats de Gibowicz et al. (1991), à l'extrémité plus faible du spectre, semblent être légèrement différents des deux autres cas. Il est important de noter que les données de cet ensemble ont été enregistrées dans des milieux d'extraction minière différents et à des fréquences beaucoup plus élevées que pour les deux autres ensembles de données. En outre, une proportion importante de ces événements semble présenter un mécanisme au foyer qui n'est pas un mécanisme au foyer à double-couple, c'est-à-dire une rupture en cisaillement accompagnée d'une composante de rupture causée par la tension.

6.4 Conclusion

L'atténuation le long du parcours source-capteur a des effets importants sur les signaux enregistrés et sur les estimations des paramètres de la source des événements induits par l'exploitation minière. De telles estimations devraient être faites après correction des spectres pour tenir compte de la réponse du système et des effets de l'atténuation.

Le paramètre d'atténuation Kappa varie considérablement pour chaque capteur alors que les effets locaux sur le site sont négligeables ou inexistants. L'importance de la dispersion observée a été attribuée à la présence de zones de roche fissurée, de remblai, etc. dans la mine. Les résultats indiquent que l'utilisation d'une valeur moyenne pour le paramètre d'atténuation se rapportant à l'ensemble d'une mine aura des conséquences importantes sur les déterminations des paramètres de la source et sur les corrections faites pour tenir compte de l'atténuation dans chaque cas.

Le facteur d'atténuation des ondes S, Q_S, varie dans l'intervalle de 20 à 500 dans le présent cas, la majorité des valeurs se situant entre 50 et 150.

Une analyse spectrale des données macrosismiques a permis de déterminer les intervalles suivants pour les paramètres de la source :

Magnitude du moment :	de 0,4 à 2,6
Moment sismique :	de 3,6 à 7 470 GNm
Rayon de la source :	de 8,8 à 152,9 m
Chute de contrainte :	de 0,03 à 10,6 MPa

Les résultats de la présente étude indiquent que la grande majorité des estimations des chutes de contrainte se situent dans l'intervalle de 0,1 à 10,0 MPa, intervalle compatible avec les résultats qui ont été rapportés par d'autres auteurs dans la littérature. Une dépendance type des paramètres de la source, telle que prévue dans les modèles théoriques de cisaillement a été observée entre le moment sismique et le rayon de la source, d'une part, et entre le paramètre de la vitesse maximale et le moment sismique d'autre part. Cela indique clairement un comportement autosimilaire de la source, ce qui est aussi compatible avec les résultats présentés dans la littérature.

6.5 Références

Aki K. (1984). «Asperities, Barriers and Characteristics of Earthquakes». *J. Geophys. Res.* 89:5867-5872.

Anderson, J.G. et Hough, S. (1984). «A Model for the Shape of the Fourier Amplitude Spectrum of Acceleration at High Frequencies». *Bull. Seism. Soc. Am.* 74(5):1969-1993.

Brune, J.N. (1970). «Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes». *J. Geophys. Res,* 75:4997-5009.

Brune, J.N. (1971). «Correction». *J. Geophys. Res.* 76:5002.

Cranswick, E. et Sembera E. (1989). «Earthquake Site/Source Studies in the AE/MS Domain». *Proceedings of the 4th Conference on AE/MS Activity in Geological Structures and Materials,* Trans-Tech Publications, pp. 375-402.

DiBona, M. et Rovelli, A. (1988). «Effects of the Bandwidth Limitation on Stress Drops Estimated from Integrals of the Ground Motion». *Bull. Seism. So. Am.* 78(5):1818-1825.

Feustel, A.J., Urbancic, T.I. et Young, R.P. (1993). «Estimates of Q Using the Spectral Decay Technique for Seismic Events with M < 1.0». *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* Balkema, pp. 337-342.

Gibowicz, S.J. (1990a). «Keynote Lecture: The Mechanism of Seismic Events Induced by Mining: A Review». *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* University of Minnesota, pp. 3-27.

Gibowicz, S.J. (1990b). *Determination of Source Parameters of Small Seismic Events: Report on Methods and Applications to Seismicity Induced by Mining.* Rapport interne RP001Q, Queen's University, 33 p.

Gibowicz, S.J., Young, R.P., Talebi, S. et Rawlence, D.J. (1991). «Source Parameters of Seismic Events at the Underground Research Laboratory in Manitoba, Canada: Scaling Relations for Events with Moment Magnitude Smaller than -2». *Bull. Seism. Soc. Am.* 81(4):1157-1182.

Hanks, T.C. (1982). «f_{max}». *Bull. Seism. Soc. Am.* 72:1867-1880.

Hanks, T.C. et McGuire R.R. (1981). «The Character of High-Frequency Strong Ground Motion». *Bull. Seism. Soc. Am.* 71:2071-2096.

McGarr, A. (1981). «Analysis of Peak Ground Motion in Terms of a Model of Inhomogeneous Faulting». *J. Geophys. Res.* 86:3901-3912.

McGarr, A. (1984). «Scaling of Ground Motion Parameters, State of Stress, and Focal Depth». *J. Geophys. Res.* 89(B8):6969-6979.

Scholz, C.H. (1990). *The Mechanics of Earthquakes and Faulting.* Cambridge University Press, p. 439.

Scholz, C.H., Aviles, C. et Wesmousky S. (1986). «Scaling Differences between Large Intraplate and Interplate Earthquakes». *Bull. Seism. Soc. Am.* 76:65-70.

Spottiswoode, S.M. (1993). «Seismic Attenuation in Deep-Level Mines». *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* Balkema, pp. 409-414.

Snoke, J.A. (1987). «Stable Determination of (Brune) Stress Drop». *Bull. Seism. Soc. Am.* 77(2):530-538.

Talebi, S. (1993). *Source Studies of Mine-Induced Seismic Events over a Broad Magnitude Range (- 4 < m_N < 4).* CANMET, Rapport commercial MRL 93-046(CL), 72 p.

Talebi, S. (1994). *Source Studies of Mine-Induced Seismic Events over a Broad Magnitude Range (- 4 < m_N < 4).* CANMET, Rapport commercial MRL 94-030(CL), 55 p.

Talebi, S. et Cornet, F.H. (1987). «Analysis of the Microseismicity Induced by a Fluid Injection in a Granitic Rock Mass». *Geophys. Res. Lett.* 14(3):227-230.

Talebi, S., Pritchard, C.J. et Mottahed, P. (1994). *Rockburst Activity in Northern Ontario: September 1992-December 1994.* CANMET, Rapport de division MRL94-071(TR).

Talebi, S. et Young, R.P. (1990). «Characterizing Microseismicity Associated with Stope Development». *Proceedings of the 2nd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* Balkema, pp. 189-194.

Talebi, S. et Young, R.P. (1992). «Microseismic Monitoring in Highly Stressed Granite: Relation between Shaft-Wall Cracking and In Situ Stress». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 29(1):25-34.

Urbancic, T.I., Bowes, R. et Young, R.P. (1993). *Monitoring of Seismicity with QMS Systems at Creighton Mine, Sudbury, Ontario.* Rapport MRD005, 34 p.

Urbancic, T.I., Feustel, A.J. et Marisett, S. (1994). *Source Studies of Mining-Induced Seismicity at Creighton Mine, Sudbury, Canada: Analysis of Seismicity Related to the m_N 2.1 Rockburst Sequence of October 29, 1992.* Rapport présenté par ESG au CGP-PCRCT, 71 p.

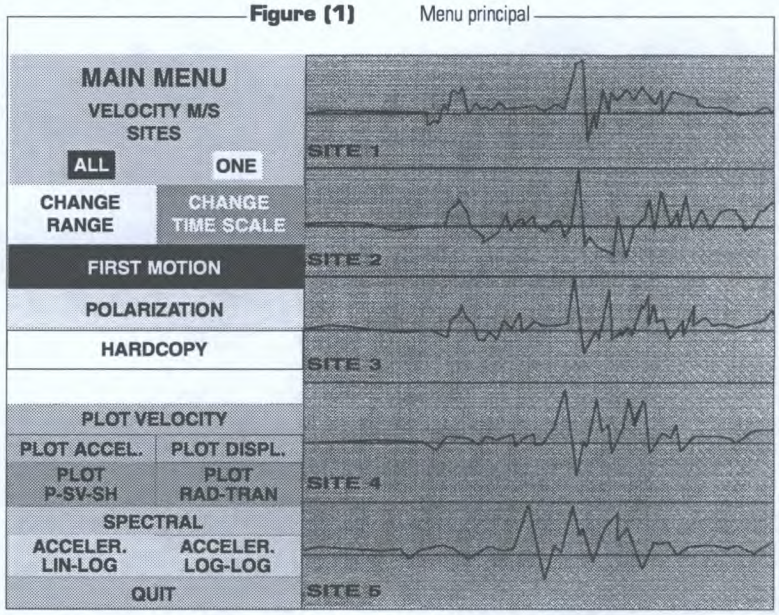
Logiciel d'analyse macrosismique de CANMET – Présentation et description

Au chapitre 4, nous avons discuté du système macrosismique de CANMET et des logiciels s'y rapportant. Dans la présente annexe, nous examinerons le programme graphique d'analyse des ondes qui lui est associé.

(I) Programme graphique

Une fois que le nom du fichier à analyser a été lu, le programme affiche d'abord la sélection du MAIN MENU (menu principal) (figure 1) sur le côté gauche de l'écran. Pour poursuivre, l'utilisateur doit choisir le menu approprié en se servant de la souris lorsque le message *locator input required* apparaît à l'écran, ou du clavier si le message *keyboard input required* apparaît à l'écran en haut à gauche.

Figure (1) Menu principal



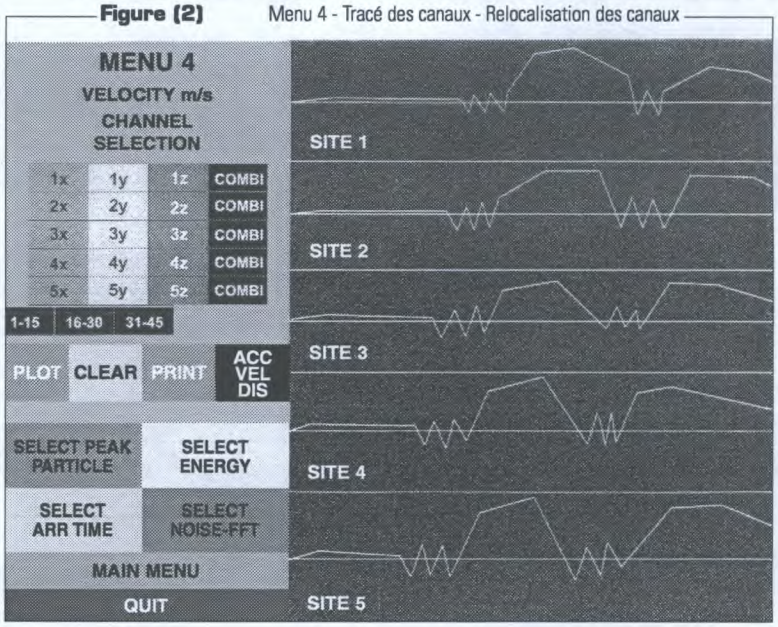
(II) Description des menus

(i) Menu principal – PLOT CHANNELS (MENU 4)

On choisit le menu 4 (figure 2) pour afficher (PLOT) et pour imprimer (PRINT) l'onde; pour nettoyer l'écran (CLEAR) et pour représenter graphiquement sur le même écran l'accélération, la vitesse et le déplacement d'un canal particulier, ACC/VEL/DIS. On peut utiliser ou sélectionner jusqu'à 5 fenêtres. L'utilisateur peut sélectionner le mode triaxial, uniaxial ou les deux. Les capteurs triaxiaux sont identifiés par 2 caractères, soit un nombre pour l'identification du site et une lettre pour l'axe. Les capteurs uniaxiaux sont identifiés par un nombre seulement. Dans le cas des capteurs triaxiaux, l'onde peut être affichée en mode axe unique ou multiaxes si le menu COMBI est sélectionné; jusqu'à 3 ondes peuvent être affichées dans une même fenêtre. Le menu PRINT transfère les graphiques affichés à l'écran vers l'imprimante.

Le logiciel d'analyse des signaux sismiques peut traiter jusqu'à 60 canaux par bloc de 15 canaux à la fois, c'est-à-dire *1-15, 16-30, 31-45* et *46-60*. Si le fichier de données renferme plus de15 canaux, le menu du bloc de canaux sera affiché, ce qui permettra à l'utilisateur de choisir tous les canaux disponibles.

Figure (2) Menu 4 - Tracé des canaux - Relocalisation des canaux



(ii) Menu principal – CHANGE RANGE (MENU 3)

Pour changer l'amplitude de l'axe vertical, il faut choisir le carré de menus intitulé CHANGE RANGE. Le menu 3 (figure 3) affichera alors plusieurs options relatives au choix d'une amplitude. L'amplitude de la fourchette de pourcentage choisie apparaît au bas du menu 3 juste en-dessous du carré REPLOT. L'intervalle par défaut est établi à 25 %. Les limites supérieure et inférieure pour chaque projection sont égales à la fourchette de pourcentage choisie multipliée par la valeur la plus élevée lue dans le fichier d'entrée. Cette valeur figure au menu 3 sous le titre *Amplitude-Range*.

L'échelle de l'intervalle peut être modifiée aussi souvent que nécessaire par l'utilisateur. L'intervalle en pourcentage augmentera ou diminuera selon que le menu *+ 10 %, + 1 %, -10 %, / 10,* ou **10* est choisi. Pour représenter graphiquement l'onde dans le nouvel intervalle, l'utilisateur doit choisir le carré de menus REPLOT. Si un nouvel intervalle a été choisi et que l'utilisateur choisit un menu avant de procéder de nouveau à la représentation graphique, les ondes seront représentées graphiquement automatiquement avant l'affichage du nouveau menu.

Figure (3) Menu 3 - Modification de la plage

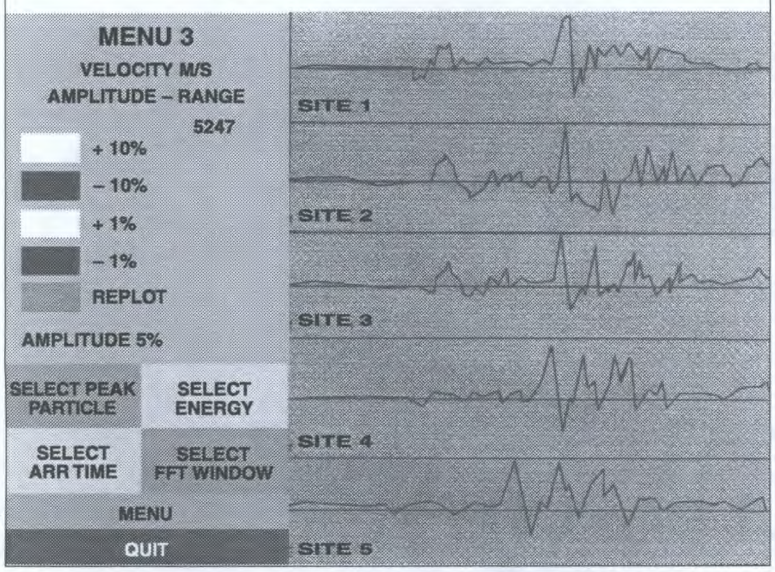
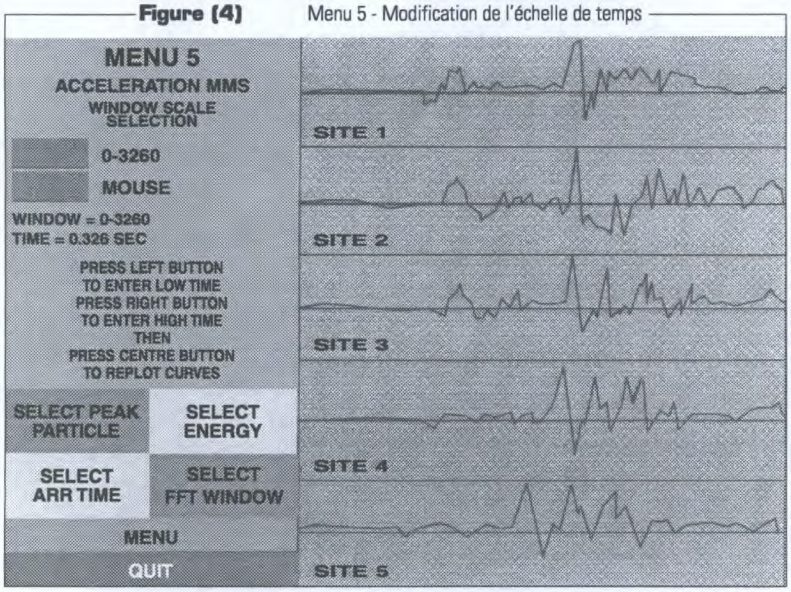


Figure (4) Menu 5 - Modification de l'échelle de temps



(iii) Menu principal – CHANGE TIME SCALE (MENU 5)

L'échelle temporelle, ou l'axe horizontal du graphique, peut être modifiée en choisissant le carré de menus CHANGE TIME SCALE (figure 4). Le menu 5 affichera deux carrés de menus étiquetés *0-xxxx* et MOUSE où *xxxx* est le nombre total de points par canal lu dans le fichier de données d'entrée.

Lorsque le *0-xxxx* est choisi, l'onde entière est représentée graphiquement à nouveau. Pour agrandir la projection, l'utilisateur doit choisir le carré de menu MOUSE puis positionner la souris pour redéfinir les nouvelles limites inférieure et supérieure de l'échelle temporelle. Lorsque les nouvelles limites sont choisies, la nouvelle fenêtre est alors redessinée.

Les nouvelles limites seront écrites sur le menu de l'écran à la fois en secondes et en nombre de points numérisés. Un court menu d'aide est rédigé sur le menu de l'écran pour guider l'utilisateur dans sa façon de procéder avec la souris pour définir une nouvelle fenêtre.

(iv) Menu principal – POLARIZATION

Le signal produit par un événement sismique montre souvent deux ondes distinctes : les ondes primaires ou ondes P et les ondes de cisaillement ou ondes S. L'onde P imprime aux particules un mouvement parallèle à la direction de propagation de l'onde alors que l'onde S leur imprime un mouvement perpendiculaire. L'onde de cisaillement est souvent redivisée en

deux composantes appelées ondes SV et SH où V et H signifient vertical et horizontal respectivement. Ces deux composantes sont habituellement mélangées lorsque les signaux sont enregistrées par un capteur.

Comme les ondes P et S se déplacent dans des directions qui sont perpendiculaires, il est possible d'imprimer une rotation à la forme du signal de manière que toute l'énergie de l'onde P soit placée sur l'axe des x et que toute l'énergie de l'onde S soit placée sur les axes y et z.

L'option POLARIZATION du menu permet de représenter graphiquement le mouvement des particules de l'onde dans les plans P-SV, P-SH et SV-SH et peut être utilisée pour analyser la polarisation des ondes P et S.

(v) Menu principal – SOURCE LOCATION (MENU 8)

Une fois que les temps d'arrivée ont été déterminés, l'utilisateur peut localiser l'épicentre de l'événement enregistré en choisissant l'option SOURCE LOCATION du menu (figure 5). Trois techniques de localisation de la source sont offertes : la méthode des moindres carrés basée sur les temps d'arrivée des ondes P, la méthode des moindres carrés basée sur la différence des temps d'arrivée S-P et finalement la méthode de l'algorithme de CANMET (section 5.4).

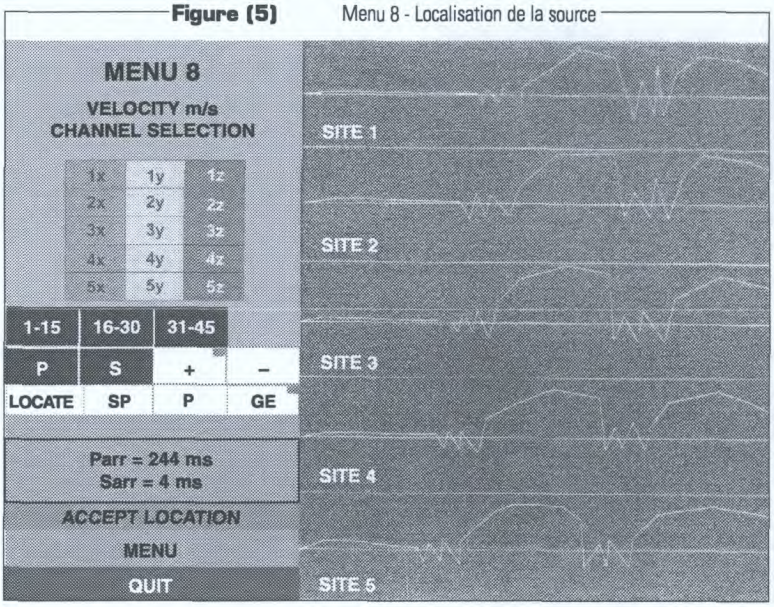
L'utilisateur doit d'abord choisir la technique de localisation, c'est-à-dire *SP, P* ou *GE*, puis les canaux doivent être utilisés pour localiser la source. Le menu LOCATE calculera les coordonnées de la source et affichera les résultats à l'écran. Si les temps d'arrivée requis n'ont pas été déterminés, l'utilisateur sera sollicité à cet effet et le canal choisi fera partie de la solution. Un avertissement sera également affiché si le nombre minimal de canaux ou de temps d'arrivée n'est pas atteint.

Les vitesses des ondes P et S peuvent être modifiées en choisissant *P, S,* + ou -. Pour toute modification de la vitesse, de nouvelles valeurs sont affichées à l'écran. Le menu ACCEPT LOCATION archivera les coordonnées de la source dans un fichier de paramètres.

En plus des coordonnées de l'événement, plusieurs facteurs de qualité associés à la précision et à la fiabilité de la localisation de la source donnée sont également fournis. Ces facteurs comprennent notamment la résiduelle, la sensibilité et la classe de l'événement (section 5.3.4).

La résiduelle de l'événement est essentiellement la différence entre les temps d'arrivée observés et calculés. Elle est le critère le plus important pour déterminer la précision de la localisation de la source. La sensibilité mesure la stabilité de la solution qui est définie comme étant la distance entre une source localisée et sa position associée en supposant une vitesse inférieure de 10 %. Pour les deux paramètres, une valeur plus faible indique une meilleure solution. La classe, qui est une combinaison des facteurs de qualité, tient également compte de la séquence. Le facteur de qualité, qui ne peut être affiché à l'écran, compare les séquences observées et calculées et détermine la qualité de la concordance. Il existe cinq classes (A, B, C, D, Z) où A est une très bonne cote et où Z signifie que l'événement est impossible à localiser.

Figure (5) Menu 8 - Localisation de la source



(vi) Menu principal – FIRST MOTION (MENU 11)

Afin de procéder à l'analyse des mécanismes au foyer des événements sismiques, le premier mouvement de chaque onde P doit être défini. Le premier mouvement de chaque onde est dirigé soit vers le

haut, soit vers le bas. Le carré de menu + est utilisé pour définir un mouvement vers le haut alors que le – définit un mouvement vers le bas. Suite à une calibration adéquate, la polarité d'un mouvement vers le haut est reliée à un mode de compression alors qu'un mouvement vers le bas est relié à un mode de dilatation ou vice-versa. Le choix du premier mouvement est stocké dans un fichier de paramètres externes qui est utilisé comme entrée pour l'analyse des mécanismes au foyer.

(vii) Menu principal – SPECTRAL LINE

L'analyse spectrale des signaux sismiques dans le domaine fréquentiel sert à obtenir des renseignements sur les mécanismes de la source. Le signal sismique, sous forme d'une onde de déplacement, est transformé en une distribution fréquentielle à l'aide d'une transformée rapide de Fourier. La densité spectrale est tracée en fonction de la fréquence dans un format logarithmique. Le plateau et la fréquence-coin, obtenus à partir du graphique, servent à calculer les paramètres sismologiques comme le moment sismique, la chute de contrainte, le rayon de la source, etc.

Lorsque le carré de menus SPECTRAL a été sélectionné, l'écran affiche un menu des signaux sur la gauche et une zone de représentation graphique sur la droite. Dans le menu, l'utilisateur peut choisir n'importe quel canal, obtenir la pente et la fréquence-coin puis les stocker dans un fichier de paramètres (STORE), afficher la transformée rapide de Fourier du bruit de fond (NOISE), corriger la courbe pour tenir compte de l'atténuation (ATTENUATION), appliquer le filtre Fl et le filtre F2, tracer la courbe des moindres carrés (LEAST SQUARE) sur la courbe originale (courbe noire) ou la courbe corrigée pour tenir compte de l'atténuation (courbe rouge), tracer à nouveau le graphique (REPLOT), imprimer (PRINT), retourner aux ondes ou sortir du programme (EXIT).

(viii) Menu principal – SPECTRAL CURVE

Cette option du menu permet à l'utilisateur de réaliser une étude approfondie de la polarisation de l'onde sismique. Les divers choix de menus ainsi que la théorie et les procédures à suivre pour utiliser le logiciel ont été largement documentés dans les rapports de Beardwood (1993 et 1994)[1].

(ix) Menu principal – ACCELERATION LIN-LOG

Ce choix du menu affiche la transformée rapide de Fourier de l'onde enregistrée en mode accélération. La courbe est affichée sur un graphique semi-logarithmique pour obtenir divers paramètres sismologiques comme le Kappa et la pente. Cette caractéristique particulière du programme a été utilisée, jusqu'à présent, à titre d'outil de recherche. Aucune disposition n'a été prise pour sauvegarder les résultats calculés.

(x) Menu principal – ACCELERATION LOG-LOG

La sélection du menu affiche la transformée rapide de Fourier de l'onde enregistrée en mode accélération. La courbe est affichée dans une échelle bilogarithmique pour obtenir divers paramètres comme la pente, le plateau et la fréquence-coin. Comme dans le cas du menu linéaire-logarithmique d'accélération, cette caractéristique particulière a également été utilisée comme outil de recherche. Aucune disposition n'a été prise pour sauvegarder les résultats calculés.

(xi) Menu secondaire – SELECT PEAK PARTICLE (MENU 6)

Le logiciel utilitaire SELECT PEAK PARTICLE (figure 6) permet à l'utilisateur de calculer l'accélération, la vitesse et/ou le déplacement maximal des particules d'après le mode affichage sélectionné dans le menu principal (accélération, vitesse ou déplacement). Lorsque sélectionné, le menu 6 affiche la somme vectorielle la plus élevée pour chaque capteur ou canal affiché à l'écran. Si désiré, la valeur maximale de la vitesse des

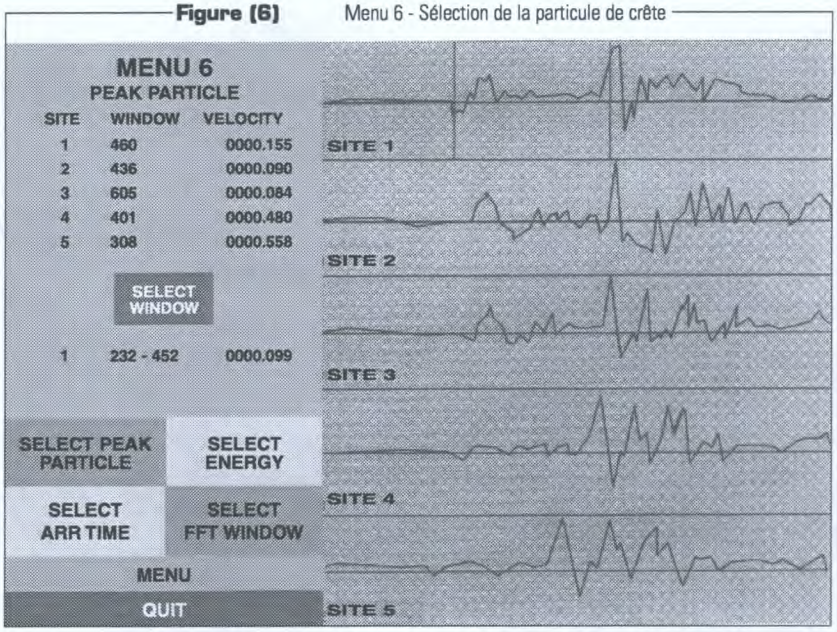
[1] Beardwood, F. (1993). *A Study of Wave Polarization.* CANMET, Laboratoire de Sudbury, Rapport interne, 33 p.

Beardwood, F. (1994). *A Study of Wave Polarization: Application to Macroseismic Data from Creighton Mine.* CANMET, Laboratoire de Sudbury, Rapport interne, 57 p.

particules peut également être calculée pour n'importe quelle fenêtre particulière. Pour poursuivre, l'utilisateur doit d'abord sélectionner le menu SELECT WINDOW qui se trouve au milieu de l'écran du menu puis définir la fenêtre. Les limites temporelles de la fenêtre ainsi que la valeur calculée seront affichées à l'écran.

Les valeurs maximales des particules sont automatiquement stockées dans un fichier de paramètres. Elles représentent la somme vectorielle la plus élevée à être calculée pour chaque capteur et pour chaque fenêtre entière. Toutes les autres valeurs calculées par le biais du menu SELECT WINDOW ne sont pas stockées.

Figure (6) Menu 6 - Sélection de la particule de crête



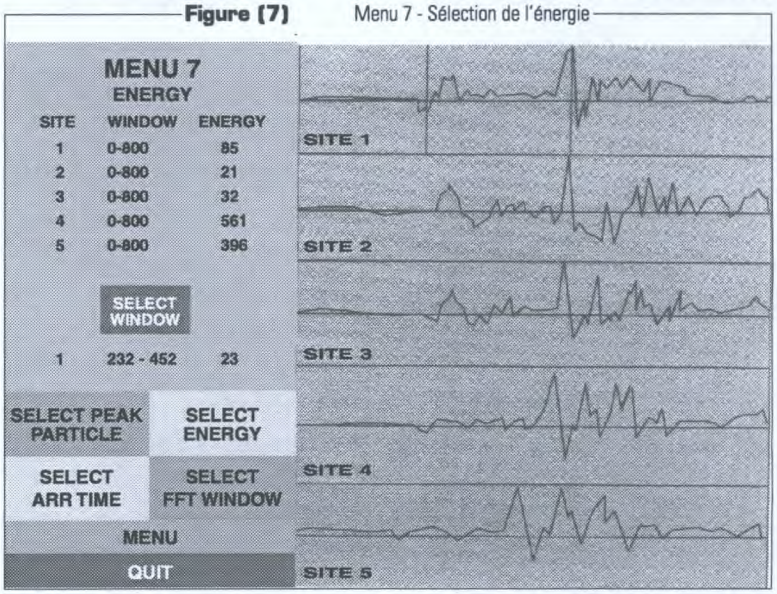
(xii) Menu secondaire – SELECT ENERGY (MENU 7)

Le calcul de l'énergie suppose que la localisation de l'événement soit connue. Si elle ne l'est pas, l'utilisateur sera sollicité par un message l'invitant à localiser l'événement avant de poursuivre.

Ce menu (SELECT ENERGY) (figure 7) est très semblable au menu 6. L'écran en haut du menu 7 affiche l'énergie totale du signal complet en kilojoules pour les canaux choisis affichés à l'écran. Si l'utilisateur le souhaite, la valeur de l'énergie peut également être calculée pour toute fenêtre particulière. Pour poursuivre, l'utilisateur doit d'abord sélectionner le menu SELECT WINDOW qui se trouve au milieu de l'écran du menu puis définir le temps de la fenêtre. Les limites temporelles de la fenêtre ainsi que la valeur calculée seront affichées à l'écran.

Les valeurs d'énergie sont automatiquement stockées dans un fichier de paramètres. On les calcule pour chaque capteur et pour la fenêtre entière. Toutes les autres valeurs calculées par le biais du menu SELECT WINDOW ne sont pas stockées.

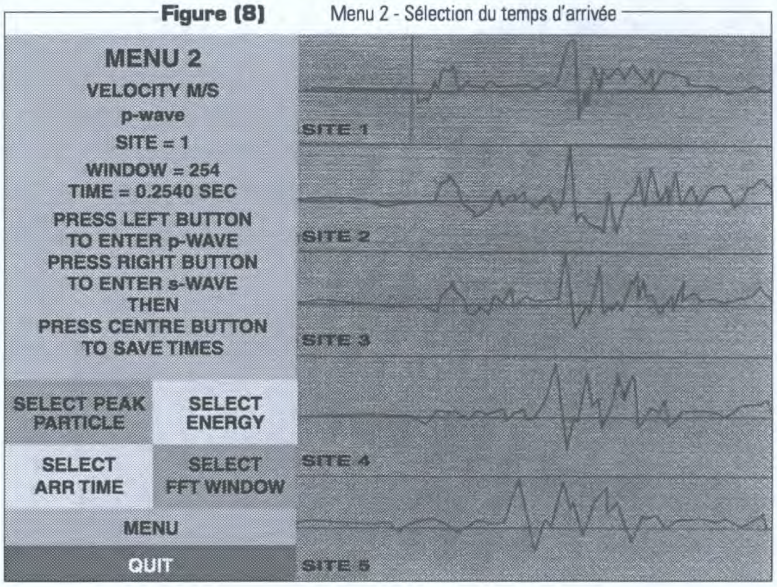
Figure (7) Menu 7 - Sélection de l'énergie



(xiii) Menu secondaire – SELECT ARRIVAL TIME (MENU 2)

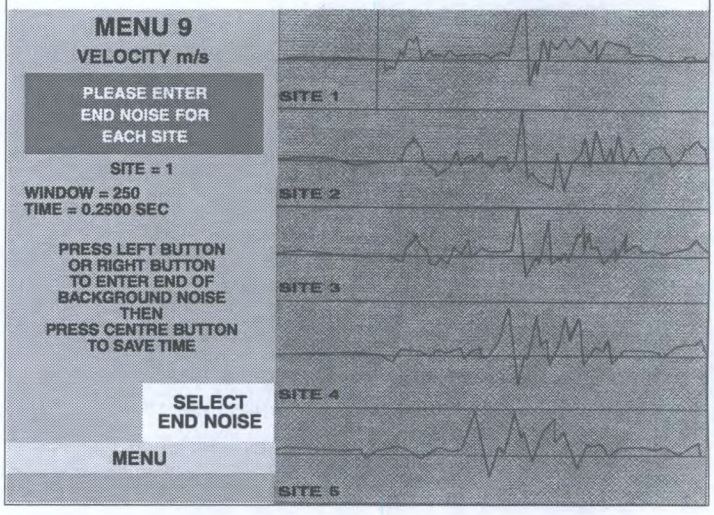
Le menu SELECT ARRIVAL TIME (figure 8) permet à l'utilisateur de déterminer manuellement, de vérifier ou d'ajuster le temps d'arrivée des ondes P ou S générées par un événement spécifié aux fins de localisation de la source. Une fois dans le menu 2, un menu d'aide donnant des instructions sur la façon de procéder apparaît à l'écran.

Figure (8) Menu 2 - Sélection du temps d'arrivée



D'après la sélection faite à l'aide de la souris, le temps d'arrivée ainsi que l'identification du capteur ou du canal seront affichés à l'écran. Si l'utilisateur le demande, les temps d'arrivée peuvent être stockés dans un fichier de paramètres.

Figure (9) Menu 9 - Sélection de la FFT pour éliminer le bruit



(xiv) Menu secondaire – SELECT NOISE-FFT (MENU 9)

Le logiciel utilitaire sert à définir une fenêtre temporelle en vue de l'analyse spectrale (figure 9). Deux types de fenêtres peuvent être définis : une pour l'analyse spectrale du signal enregistré (c'est-à-dire l'onde P, l'onde S ou le signal complet) et, si nécessaire, une deuxième fenêtre en vue de l'analyse spectrale du bruit de fond.

Lorsque le menu 9 est sélectionné, un menu d'aide à l'intention de l'utilisateur apparaît à l'écran et lui indique comment se servir de la souris pour poursuivre. La fenêtre temporelle peut être modifiée aussi souvent que l'utilisateur le souhaite.

(xv) Menu secondaire – MENU

L'option MENU dans le menu secondaire permet de rappeler le menu principal.

(III) PARAMETER FILE p

Le fichier *p,* appelé fichier de paramètres (MmmDD:HH:SSp), contient le résumé des divers paramètres calculés et stockés, obtenus dans l'option STORE des menus si ces paramètres ne sont pas automatiquement stockés par le logiciel (tableau (i)). Ces paramètres comprennent : l'identification du fichier et son temps d'occurence, la date de l'analyse mise à jour, les temps d'arrivée d'ondes P et S pour chaque capteur tels que choisis par l'opérateur, la fenêtre temporelle utilisée pour l'analyse spectrale du bruit de fond, l'azimut et l'émergence de chaque capteur, la localisation de la source de l'événement d'après le système de coordonnées de la mine, la vitesse utilisée pour calculer les paramètres sismiques, la fenêtre temporelle de la transformée rapide de Fourier, l'énergie, l'accélération maximale des particules, la vitesse et le déplacement ainsi que la distance qui sépare la source de chaque capteur. Les accélérations maximales des particules sont calculées seulement si les données d'entrée sont enregistrées par des accéléromètres.

Pour chaque axe, les paramètres sismiques sont calculés au capteur et comprennent l'identification de l'axe du capteur, le premier mouvement, la fréquence-coin, le plateau, la pente, le rayon de la source, le moment sismique et la chute de contrainte. Pour le capteur triaxial seulement, le rayon de la source, le moment sismique et la chute de contrainte sont également calculés d'après la moyenne de la fréquence-coin et la somme vectorielle du plateau. La moyenne de la pente est également calculée.

(IV) FAX FILE f

Le fichier *f* (MmmDD:HH:SSf) appelé fichier fax, contient les données envoyées aux exploitants miniers (voir tableau (ii)). Le fichier, qui est présenté dans un format plus officiel, est simplement une réorganisation des valeurs du fichier *p*. En outre, le fichier f offre l'option d'identification de l'utilisateur et donne la magnitude estimée d'après les valeurs d'énergie et la magnitude de l'événement enregistré par le Réseau sismographique numérique de CANMET (RSNC).

Tableau (i) Exemple d'un fichier p

Oct2018:37:28 92
Updated on Wed Oct 21 08:44:34 1992

Arrival Times (p, s)		NOISE (msec)	AZ (deg)	EM (deg)
Site 1				
288	401	266	182	61
Site 2				
219	278	185	275	24
Site 3				
209	264	188	5	15
Site 4				
189	227	171	300	82
Site 5				
179	213	161	147	85

p - Direct Solution :- (x, y, z) VELOCITY (ft/sec)
4581.00 6228.00 6934.00 12000.00

SITE	1	2	3	4	5
FFT WINDOW	1890-4668	1358-6298	1295-3476	1124-4726	1059-3261
ENERGY (KJ)	27240.	5686.	8328.	12512.	8353.
PPV (mm/s)	3.662	2.120	3.295	5.009	10.149
PPD (mm)	0.026	0.020	0.020	0.053	0.024
DISTANCE (m)	985	520	491	351	308

Site Parameters

SITE Nbr	CORNER Freq. (Hz)	PLATEAU (10-9) (m-sec)	SLOPE		SOURCE Radius (m)	SEISMIC Moment (GN.m)	STRESS Drop (KPa)
1 x	17.2	633.88	-2.142	0.	79.2	1954.9	1723.5
1 y	17.7	1272.41	-2.149	0.	77.0	3924.1	3762.9
1 z	15.8	482.01	-2.101	0.	86.5	1486.5	1006.2
	16.9	1501.05	-2.131	0.	80.7	4629.2	3857.4
2 x	15.6	782.31	-2.327	0.	87.3	1274.6	838.1
2 y	16.2	729.78	-2.370	0.	84.3	1189.0	868.1
2 z	15.6	715.18	-2.328	0.	87.6	1165.2	758.6
	15.8	1286.88	-2.342	0.	86.4	2096.7	1423.5
3 x	19.9	664.42	-2.173	0.	68.5	1021.9	1391.9
3 y	17.4	962.82	-2.247	0.	78.4	1480.9	1346.8
3 z	20.5	371.38	-2.194	0.	66.4	571.2	854.6
	19.3	1227.36	-2.205	0.	70.7	1887.8	2336.6
4 x	15.8	2366.20	-2.592	0.	86.3	2598.1	1766.3
4 y	16.3	4967.18	-2.560	0.	83.6	5453.9	4077.3
4 z	17.3	611.01	-2.529	0.	78.6	670.9	603.5
	16.5	5535.80	-2.561	0.	82.7	6078.2	4693.0
5 x	18.8	466.06	-1.981	0.	72.3	449.9	520.0
5 y	21.7	292.41	-2.079	0.	62.8	282.3	497.9
5 z	20.9	790.50	-1.969	0.	65.2	763.2	1203.6
	20.5	963.12	-2.010	0.	66.6	929.8	1379.5

Tableau (ii) Exemple d'un fichier fax

WAVEFORM ANALYSIS DONE BY:
SEISMIC EVENT Oct2018:37:28 .92 MAGNITUDE ESTIMATED FROM ENERGY: 2.3 Mn
MAGNITUDE FROM OTTAWA/CDSN : 2.6 Mn

Arrival Times (p, s)		(msec)		NOISE (msec)	AZ (deg)	EM (deg)
SITE	1	288	401	268	182	-61
SITE	2	219	278	268	5	-15
SITE	3	209	264	268	275	-24
SITE	4	189	227	268	300	-82
SITE	5	179	213	268	147	85

SOURCE LOCATION FROM CREIGHTON MINE : 4581.E 6228.N 6934.ELEV.
VELOCITY 12000. (ft/sec); WAVEFORM ANALYSIS DONE ON "SHEAR" WAVES

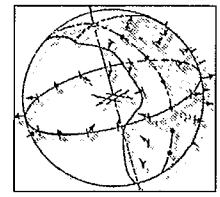
SITE	1	2	3	4	5
FFT WINDOW	1890-4668	1358-6298	1295-3476	1124-4726	1059-3261
ENERGY (KJ)	27240.	5068.	9345.	12512.	23790.
PPV (mm/s)	3.662	2.120	3.295	5.009	12.562
PPD (mm)	0.026	0.019	0.025	0.063	0.046
DISTANCE (m)	985	491	520	351	308

Site Parameters

SITE Nbr	CORNER Freq. (Hz)	PLATEAU (10-9) (m-sec)	SLOPE		SOURCE Radius (m)	SEISMIC Moment (GN.m)	STRESS Drop (KPa)
1 x	17.2	633.9	-2.14	0.	79.2	1954.9	1721.8
1 y	20.6	1930.6	-2.15	0.	66.1	5954.0	9009.3
1 z	15.8	482.0	-2.10	0.	86.2	1486.5	1014.9
	17.9(1)	2088.4(2)	-2.13(3)	0.	76.2(4)	6440.6(4)	6358.3(4)
2 x	15.6	782.3	-2.33	0.	87.3	1203.3	790.7
2 y	16.2	729.8	-2.37	0.	84.1	1122.5	826.0
2 z	15.6	715.2	-2.33	0.	87.3	1100.0	722.9
	15.8(1)	1286.9(2)	-2.34(3)	0.	86.2(4)	1979.4(4)	1351.4(4)
3 x	19.9	664.4	-2.17	0.	68.5	1082.5	1476.7
3 y	17.4	962.8	-2.25	0.	78.3	1568.7	1430.4
3 z	20.5	371.4	-2.19	0.	66.4	605.1	902.3
	19.3(1)	1227.4(2)	-2.20(3)	0.	70.7(4)	1999.7(4)	2475.5(4)
4 x	15.8	2366.2	-2.59	0.	86.2	2598.1	1773.8
4 y	16.3	4967.2	-2.56	0.	83.6	5453.9	4088.4
4 z	17.3	611.0	-2.53	0.	78.7	670.9	601.3
	16.5(1)	5535.8(2)	-2.56(3)	0.	82.7(4)	6078.2(4)	4697.6(4)
5 x	18.8	466.1	-1.98	0.	72.5	449.9	517.5
5 y	21.7	292.4	-2.08	0.	62.8	282.3	499.3
5 z	20.9	790.5	-1.97	0.	65.2	763.2	1206.0
	20.5(1)	963.1(2)	-2.01(3)	0.	66.6(4)	929.8(4)	1379.8(4)

(1): AVERAGE FROM X,Y,Z (2): VECTOR SUM FROM X,Y,Z
(3): AVERAGE FROM X,Y,Z (4): CALCULATED FROM (1) and (2)

Annexe II



Liste des coups de toit enregistrés dans les mines de l'Ontario par les systèmes macrosismiques de CANMET

TABLEAU (i) Événements sismiques enregistrés dans les mines de l'Ontario — mine Campbell.
Du 1/01/92 au 12/31/95 (mise à jour : 12/31/95)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
1	7/03/92	13:15:22	0,6	Campbell	40	10/26/94	23:45:03	1,5	Campbell
2	7/13/92	15:45:48	0,6	Campbell	41	10/26/94	23:45:10	0,7	Campbell
3	7/13/92	20:28:35	0,6	Campbell	42	10/31/94	15:42:52	2,8	Campbell
4	8/14/92	19:02:34	1,3	Campbell	43	11/04/94	15:23:37	1,0	Campbell
5	9/01/92	19:46:30	0,7	Campbell	44	12/10/94	06:36:57	1,3	Campbell
6	9/29/92	06:03:17	0,7	Campbell	45	12/21/94	17:46:53	0,9	Campbell
7	10/17/92	02:05:26	0,7	Campbell	46	12/31/94	13:30:03	1,2	Campbell
8	10/22/92	15:54:57	1,5	Campbell	47	1/21/95	19:54:52	0,7	Campbell
9	10/23/92	03:31:45	0,5	Campbell	48	2/09/95	03:28:24	1,9	Campbell
10	10/23/92	16:41:35	0,0	Campbell	49	2/16/95	02:52:28	1,0	Campbell
11	10/23/92	19:37:20	0,8	Campbell	50	2/20/95	20:42:41	1,0	Campbell
12	10/23/92	20:21:59	0,0	Campbell	51	3/03/95	22:03:20	0,7	Campbell
13	10/24/92	06:39:55	0,0	Campbell	52	3/22/95	15:28:56	2,2	Campbell
14	10/28/92	03:33:46	0,7	Campbell	53	3/23/95	16:37:56	2,1	Campbell
15	11/21/92	06:35:17	1,3	Campbell	54	3/29/95	15:36:42	0,9	Campbell
16	12/04/92	21:27:30	0,9	Campbell	55	4/12/95	15:26:41	1,2	Campbell
17	12/08/92	14:22:40	0,0	Campbell	56	5/18/95	15:32:49	1,0	Campbell
18	3/17/93	15:51:21	2,1	Campbell	57	5/18/95	19:31:30	1,1	Campbell
19	3/17/93	15:52:15	1,6	Campbell	58	5/18/95	22:46:03	0,5	Campbell
20	4/03/93	15:47:49	1,5	Campbell	59	5/28/95	09:57:56	2,5	Campbell
21	4/15/93	00:07:16	1,7	Campbell	60	7/17/95	11:35:03	0,2	Campbell
22	6/25/93	08:10:17	0,8	Campbell	61	7/18/95	03:55:08	0,7	Campbell
23	10/09/93	16:12:52	0,8	Campbell	62	8/08/95	08:41:55	1,2	Campbell
24	10/09/93	16:15:46	0,9	Campbell	63	8/20/95	08:51:20	0,4	Campbell
25	10/09/93	16:55:48	1,5	Campbell	64	8/22/95	22:12:05	0,7	Campbell
26	11/10/93	15:47:26	1,0	Campbell	65	9/13/95	00:55:47	1,3	Campbell
27	11/20/93	03:56:34	2,0	Campbell	66	9/16/95	19:34:31	0,9	Campbell
28	11/25/93	16:09:19	1,0	Campbell	67	9/29/95	05:45:05	0,2	Campbell
29	12/27/93	10:44:18	1,2	Campbell	68	9/29/95	05:45:20	0,2	Campbell
30	2/17/94	12:22:08	1,1	Campbell	69	10/07/95	15:18:03	0,2	Campbell
31	3/18/94	03:51:25	1,2	Campbell	70	10/07/95	15:18:23	0,3	Campbell
32	3/23/94	21:99:26	2,2	Campbell	71	10/07/95	16:54:50	0,0	Campbell
33	3/23/94	21:22:94	1,9	Campbell	72	10/07/95	18:20:29	1,0	Campbell
34	4/20/94	03:45:20	1,5	Campbell	73	10/22/95	15:09:53	0,0	Campbell
35	4/21/94	18:30:11	0,7	Campbell	74	10/22/95	15:11:08	1,1	Campbell
36	5/31/94	07:38:27	1,2	Campbell	75	10/22/95	15:11:11	1,2	Campbell
37	8/13/94	17:07:48	1,2	Campbell	76	10/22/95	15:11:12	1,2	Campbell
38	9/25/94	03:53:46	0,9	Campbell	77	10/22/95	18:07:31	0,5	Campbell
39	10/20/94	15:25:38	0,8	Campbell	78	11/16/95	03:07:40	0,0	Campbell

TABLEAU (ii) Événements sismiques enregistrés dans les mines de l'Ontario — mine Macassa.
Du 5/01/91 au 11/31/95 (mise à jour : 11/31/95)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
1	6/23/91	01:33:30	2,5	Macassa	62	10/29/92	15:23:11	0,1	Macassa
2	7/21/91	09:01:38	2,0	Macassa	63	11/09/92	11:54:18	1,2	Macassa
3	7/21/91	09:02:03	1,8	Macassa	64	11/09/92	11:55:49	1,5	Macassa
4	7/21/91	19:45:11	1,8	Macassa	65	11/19/92	13:18:38	0,7	Macassa
5	8/06/91	16:11:35	2,1	Macassa	66	12/20/92	08:49:38	1,4	Macassa
6	9/15/91	16:17:39	1,7	Macassa	67	12/22/92	10:31:55	0,4	Macassa
7	9/25/91	17:53:41	1,9	Macassa	68	1/12/93	16:12:32	0,2	Macassa
8	10/08/91	00:22:36	1,3	Macassa	69	1/12/93	23:41:58	1,4	Macassa
9	11/06/91	10:31:48	0,4	Macassa	70	1/21/93	01:51:54	0,0	Macassa
10	11/12/91	00:07:29	0,5	Macassa	71	1/31/93	05:52:13	0,0	Macassa
11	12/20/91	14:19:13	0,8	Macassa	72	2/18/93	03:14:53	0,6	Macassa
12	12/20/91	14:19:30	0,5	Macassa	73	4/02/93	19:45:12	0,0	Macassa
13	1/03/92	01:04:22	1,5	Macassa	74	4/03/93	17:19:20	0,0	Macassa
14	1/16/92	21:54:14	0,6	Macassa	75	4/16/93	03:32:24	1,9	Macassa
15	1/17/92	07:39:36	0,7	Macassa	76	4/27/93	22:33:41	0,3	Macassa
16	1/19/92	20:52:52	0,5	Macassa	77	5/14/93	23:05:07	0,6	Macassa
17	1/27/92	13:01:14	0,6	Macassa	78	5/29/93	00:28:39	0,0	Macassa
18	2/08/92	23:19:45	1,9	Macassa	79	5/29/93	00:47:20	0,0	Macassa
19	2/24/92	20:35:44	1,0	Macassa	80	6/02/93	04:23:57	1,1	Macassa
20	3/06/92	08:04:47	1,2	Macassa	81	6/26/93	00:10:00	1,1	Macassa
21	4/22/92	03:08:50	2,8	Macassa	82	6/30/93	10:27:35	0,6	Macassa
22	4/22/92	03:11:55	0,8	Macassa	83	7/12/93	12:40:20	1,5	Macassa
23	4/22/92	03:16:39	0,9	Macassa	84	7/13/93	01:14:23	0,0	Macassa
24	4/26/92	00:18:17	0,9	Macassa	85	7/24/93	00:40:30	0,6	Macassa
25	8/23/92	14:37:44	1,4	Macassa	86	7/24/93	01:33:39	0,3	Macassa
26	8/23/92	14:38:08	2,3	Macassa	87	7/27/93	14:51:12	0,7	Macassa
27	8/23/92	19:01:14	0,8	Macassa	88	7/30/93	05:33:22	0,7	Macassa
28	9/18/92	02:52:14	0,7	Macassa	89	8/17/93	17:37:44	0,3	Macassa
29	9/30/92	20:28:09	0,9	Macassa	90	8/18/93	03:09:36	0,9	Macassa
30	9/30/92	20:29:58	0,7	Macassa	91	8/27/93	03:15:12	1,7	Macassa
31	10/01/92	08:35:30	0,5	Macassa	92	8/28/93	00:09:47	0,6	Macassa
32	10/01/92	10:53:09	1,5	Macassa	93	9/19/93	21:14:19	0,0	Macassa
33	10/01/92	14:00:14	0,0	Macassa	94	9/20/93	15:58:55	1,1	Macassa
34	10/02/92	19:55:39	1,0	Macassa	95	9/20/93	16:42:42	1,2	Macassa
35	10/02/92	22:39:27	0,0	Macassa	96	9/23/93	16:00:13	0,0	Macassa
36	10/09/92	23:56:06	0,9	Macassa	97	9/27/93	00:24:00	0,0	Macassa
37	10/10/92	04:14:39	0,2	Macassa	98	9/28/93	03:29:07	0,9	Macassa
38	10/11/92	15:25:44	0,0	Macassa	99	9/28/93	13:28:21	0,0	Macassa
39	10/14/92	18:56:12	0,0	Macassa	100	9/29/93	04:02:23	0,0	Macassa
40	10/16/92	14:53:05	0,0	Macassa	101	10/07/93	03:51:19	0,4	Macassa
41	10/17/92	23:06:01	0,0	Macassa	102	10/27/93	14:02:30	0,4	Macassa
42	10/28/92	10:26:20	2,3	Macassa	103	11/19/93	11:12:36	0,0	Macassa
43	10/28/92	10:26:23	0,7	Macassa	104	11/20/93	00:00:04	1,3	Macassa
44	10/28/92	10:26:25	0,0	Macassa	105	11/25/93	01:38:58	0,8	Macassa
45	10/28/92	10:26:28	0,0	Macassa	106	11/26/93	08:20:38	2,8	Macassa
46	10/28/92	10:26:31	0,0	Macassa	107	11/26/93	08:20:45	2,1	Macassa
47	10/28/92	10:26:38	0,0	Macassa	108	11/26/93	08:20:47	1,7	Macassa
48	10/28/92	10:26:56	0,0	Macassa	109	12/04/93	19:36:59	1,2	Macassa
49	10/28/92	10:28:07	0,0	Macassa	112	7/19/94	04:32:14	0,7	Macassa
50	10/28/92	10:31:36	0,0	Macassa	113	7/19/94	08:10:29	0,0	Macassa
51	10/28/92	10:35:08	2,5	Macassa	114	7/20/94	15:29:34	0,0	Macassa
52	10/28/92	10:35:12	0,0	Macassa	115	9/10/94	14:33:09	1,5	Macassa
53	10/28/92	10:35:30	0,0	Macassa	116	9/10/94	14:38:44	0,5	Macassa
54	10/28/92	10:52:44	0,0	Macassa	117	9/12/94	21:29:55	1,2	Macassa
55	10/28/92	11:43:22	0,0	Macassa	118	10/08/94	05:06:15	0,1	Macassa
56	10/28/92	11:51:17	0,0	Macassa	119	10/08/94	05:06:19	1,1	Macassa
57	10/28/92	13:37:59	0,0	Macassa	120	10/08/94	08:46:34	1,2	Macassa
58	10/28/92	16:33:38	0,0	Macassa	121	10/22/94	16:11:32	1,0	Macassa
59	10/28/92	21:14:07	0,0	Macassa	122	12/25/94	07:56:35	2,5	Macassa
60	10/29/92	06:16:04	0,0	Macassa	123	2/01/95	16:16:03	2,9	Macassa
61	10/29/92	09:34:24	0,0	Macassa	124	2/01/95	16:44:58	1,2	Macassa

TABLEAU (ii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
125	2/05/95	13:04:50	1,3	Macassa	152	7/21/95	21:14:31	0,7	Macassa
126	2/12/95	01:38:19	1,0	Macassa	153	7/26/95	16:16:26	0,0	Macassa
127	3/10/95	15:48:58	0,7	Macassa	154	7/27/95	16:56:41	0,8	Macassa
128	3/18/95	03:22:44	0,0	Macassa	155	7/28/95	00:34:31	1,9	Macassa
129	3/24/95	22:11:09	2,1	Macassa	156	8/26/95	15:15:37	2,7	Macassa
130	3/24/95	22:11:57	0,0	Macassa	157	8/26/95	15:16:34	1,2	Macassa
131	3/25/95	00:11:43	0,0	Macassa	158	8/26/95	15:31:04	0,2	Macassa
132	3/25/95	05:19:10	0,3	Macassa	159	8/26/95	16:26:49	0,7	Macassa
133	4/01/95	16:24:28	0,1	Macassa	160	8/26/95	17:44:57	0,0	Macassa
134	4/01/95	16:25:43	1,0	Macassa	161	8/26/95	18:12:29	0,4	Macassa
135	4/01/95	16:37:13	0,0	Macassa	162	8/27/95	15:02:28	2,4	Macassa
136	4/01/95	16:39:53	0,2	Macassa	163	8/28/95	10:02:56	2,9	Macassa
137	4/01/95	16:40:07	1,1	Macassa	164	8/28/95	10:03:48	1,1	Macassa
138	4/01/95	17:29:30	0,0	Macassa	165	8/28/95	10:05:24	0,3	Macassa
139	4/01/95	20:35:36	0,8	Macassa	166	8/28/95	10:11:56	0,8	Macassa
140	4/05/95	15:59:39	0,8	Macassa	167	8/29/95	02:52:35	1,2	Macassa
141	4/12/95	13:35:56	0,3	Macassa	168	8/29/95	22:00:26	1,1	Macassa
142	5/09/95	09:50:36	0,0	Macassa	169	9/15/95	16:44:38	0,4	Macassa
143	5/20/95	16:45:00	0,0	Macassa	170	9/18/95	01:11:46	0,7	Macassa
144	6/08/95	03:15:20	2,6	Macassa	171	9/18/95	15:40:45	1,4	Macassa
145	6/20/95	04:06:06	2,6	Macassa	172	9/23/95	03:13:32	0,4	Macassa
146	6/20/95	04:06:11	1,2	Macassa	173	10/30/95	03:19:08	1,0	Macassa
147	7/15/95	12:37:28	1,5	Macassa	174	10/11/95	21:38:54	0,2	Macassa
148	7/15/95	13:39:30	1,3	Macassa	175	10/16/95	23:04:30	0,4	Macassa
149	7/15/95	13:39:53	0,6	Macassa	176	10/29/95	01:38:10	0,2	Macassa
150	7/15/95	13:40:27	0,3	Macassa	177	10/29/95	11:51:21	0,3	Macassa
151	7/19/95	16:33:04	0,5	Macassa					

TABLEAU (iii) Événements sismiques enregistrés dans les mines de l'Ontario — mine Creighton.
Du 2/12/92 au 11/20/95 (mise à jour : 11/20/95)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
1	2/21/92	08:46:20	1,3-1,5	Creighton	62	6/07/92	22:28:55	0,5	Creighton
2	2/21/92	10:16:45	1,2-1,9	Creighton	63	6/08/92	06:42:29	0,7	Creighton
3	2/26/92	06:18:48	1,5-1,8	Creighton	64	6/10/92	01:40:53	0,6	Creighton
4	2/27/92	22:46:53	1,6-2,1	Creighton	65	6/10/92	09:29:18	1,0	Creighton
5	2/28/92	03:06:06	0,6	Creighton	66	6/10/92	09:36:54	1,4-1,8	Creighton
6	2/28/92	03:39:33	1,0	Creighton	67	6/11/92	18:44:25	0,8	Creighton
7	3/01/92	08:51:04	0,9	Creighton	68	6/20/92	10:53:15	1,1	Creighton
8	3/08/92	11:10:31	1,2-1,4	Creighton	69	6/21/92	00:16:33	1,0	Creighton
9	3/15/92	14:05:32	1,7-1,9	Creighton	70	6/21/92	10:58:10	1,0	Creighton
10	3/24/92	12:49:34	1,6-1,6	Creighton	71	6/23/92	14:05:52	0,8	Creighton
11	3/24/92	14:39:58	0,0	Creighton	72	6/23/92	14:05:54	0,7	Creighton
12	3/26/92	06:13:55	0,0	Creighton	73	6/29/92	01:45:27	1,1	Creighton
13	3/28/92	22:40:01	1,0	Creighton	74	7/01/92	22:17:41	1,2	Creighton
14	4/01/92	15:04:40	1,5-1,5	Creighton	75	7/03/92	14:17:23	0,8	Creighton
15	4/03/92	04:11:37	1,3	Creighton	76	7/04/92	04:05:50	0,9	Creighton
16	4/06/92	15:11:56	1,9-2,0	Creighton	77	7/07/92	04:50:33	0,6	Creighton
17	4/06/92	23:17:30	1,0-1,5	Creighton	78	7/08/92	12:57:41	1,4-1,4	Creighton
18	4/07/92	02:16:30	0,0	Creighton	79	7/29/92	07:57:28	0,5	Creighton
19	4/07/92	06:08:58	1,8-2,1	Creighton	80	7/29/92	20:28:33	0,6	Creighton
20	4/10/92	04:20:26	0,9	Creighton	81	8/02/92	02:47:56	0,8	Creighton
21	4/11/92	07:00:03	0,9	Creighton	82	8/09/92	01:15:50	0,8	Creighton
22	4/23/92	00:20:53	2,2-2,4	Creighton	83	8/20/92	01:38:11	1,1-1,4	Creighton
23	4/23/92	05:40:00	1,5-1,7	Creighton	84	8/20/92	21:50:10	0,6	Creighton
24	4/25/92	11:03:38	2,2-2,6	Creighton	85	8/23/92	04:26:33	0,6	Creighton
25	4/26/92	00:31:23	1,0	Creighton	86	8/23/92	06:58:16	0,7	Creighton
26	4/26/92	05:17:28	1,0	Creighton	87	8/23/92	16:00:56	0,8	Creighton
27	4/26/92	10:20:50	1,0	Creighton	88	8/28/92	04:11:01	1,1	Creighton
28	4/27/92	11:43:27	1,3	Creighton	89	8/28/92	10:56:15	0,3	Creighton
29	4/28/92	04:58:30	1,0	Creighton	90	9/02/92	21:10:47	1,0	Creighton
30	5/02/92	17:24:32	1,3	Creighton	91	9/03/92	18:49:34	0,6	Creighton
31	5/06/92	05:38:57	0,9	Creighton	92	9/03/92	22:39:06	2,2-2,4	Creighton
32	5/06/92	13:07:31	1,2	Creighton	93	9/03/92	22:39:13	0,9	Creighton
33	5/09/92	04:52:25	2,0-2,2	Creighton	94	9/03/92	22:39:36	1,2	Creighton
34	5/09/92	05:32:42	1,7	Creighton	95	9/04/92	09:11:07	0,9	Creighton
35	5/09/92	05:57:23	0,0	Creighton	96	9/04/92	09:13:23	1,5-1,5	Creighton
36	5/10/92	08:53:15	2,0-2,0	Creighton	97	9/05/92	01:21:08	1,8-1,5	Creighton
37	5/11/92	09:17:42	1,0-1,6	Creighton	98	9/06/92	03:49:58	1,0	Creighton
38	5/14/92	02:58:21	1,1	Creighton	99	9/06/92	22:54:36	0,6	Creighton
39	5/14/92	10:37:11	1,1-1,3	Creighton	100	9/07/92	99:19:16	0,6	Creighton
40	5/16/92	09:47:56	0,7	Creighton	101	9/07/92	16:33:16	1,6-1,7	Creighton
41	5/16/92	13:16:44	0,8	Creighton	102	9/11/92	07:11:03	1,5-1,4	Creighton
42	5/20/92	05:04:59	0,8	Creighton	103	9/11/92	14:23:08	1,0	Creighton
43	5/21/92	11:41:59	0,8	Creighton	104	9/11/92	18:22:26	1,6-1,7	Creighton
44	5/21/92	15:59:00	0,8	Creighton	105	9/11/92	19:40:21	0,9	Creighton
45	5/23/92	04:38:48	0,0	Creighton	106	9/12/92	01:26:03	1,6	Creighton
46	5/23/92	04:42:00	1,6	Creighton	107	9/15/92	10:52:10	0,7	Creighton
47	5/25/92	01:10:00	2,8-2,6	Creighton	108	9/15/92	12:37:33	0,7	Creighton
48	5/27/92	06:46:49	1,5-1,9	Creighton	109	9/15/92	19:28:59	0,9	Creighton
49	5/31/92	15:37:28	0,5	Creighton	110	9/16/92	22:50:00	1,8-2,4	Creighton
50	6/01/92	16:12:41	1,2	Creighton	111	9/17/92	17:51:27	1,5	Creighton
51	6/04/92	02:26:55	1,2-1,5	Creighton	112	9/18/92	03:20:21	0,6	Creighton
52	6/04/92	03:09:49	1,5-1,7	Creighton	113	9/18/92	17:43:31	0,9	Creighton
53	6/04/92	09:33:40	1,1	Creighton	114	9/18/92	18:20:35	1,2	Creighton
54	6/04/92	17:00:28	0,9	Creighton	115	9/18/92	23:44:41	0,8	Creighton
55	6/04/92	19:58:36	1,2	Creighton	116	9/22/92	15:13:45	0,7	Creighton
56	6/05/92	09:44:20	0,5	Creighton	117	9/22/92	21:30:00	1,4	Creighton
57	6/05/92	18:08:48	0,7	Creighton	118	9/23/92	07:22:19	1,0	Creighton
58	6/06/92	18:03:29	2,1-2,5	Creighton	119	9/24/92	09:26:39	1,4	Creighton
59	6/06/92	22:54:12	1,4-1,5	Creighton	120	9/24/92	10:45:26	1,3	Creighton
60	6/06/92	22:56:32	1,1	Creighton	121	9/27/92	11:56:46	1,1	Creighton
61	6/07/92	22:16:37	1,1	Creighton	122	9/28/92	15:26:02	0,9	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
123	9/29/92	16:07:08	1,2	Creighton	185	11/24/92	04:16:07	0,4	Creighton
124	9/29/92	17:19:05	1,3	Creighton	186	11/25/92	22:08:03	1,4	Creighton
125	9/30/92	14:57:13	0,9	Creighton	187	11/27/92	23:49:12	1,2	Creighton
126	9/30/92	15:45:22	0,8	Creighton	188	11/28/92	09:55:29	1,0	Creighton
127	9/30/92	15:58:31	0,5	Creighton	189	11/28/92	15:14:13	0,8	Creighton
128	9/30/92	18:40:02	0,6	Creighton	190	11/30/92	21:58:51	2,1	Creighton
129	10/01/92	02:22:36	1,8-1,8	Creighton	191	11/30/92	22:45:15	1,1	Creighton
130	10/02/92	21:10:55	1,0	Creighton	192	12/01/92	09:00:45	1,1	Creighton
131	10/03/92	03:28:32	0,4	Creighton	193	12/04/92	15:42:12	2,0	Creighton
132	1/03/92	07:02:06	0,8	Creighton	194	12/04/92	16:19:10	2,7-3,0	Creighton
133	10/03/92	10:15:38	0,9	Creighton	195	12/04/92	16:19:16	0,8	Creighton
134	10/04/92	21:29:24	1,7-2,1	Creighton	196	12/04/92	16:19:56	0,9	Creighton
135	10/06/92	15:57:36	1,2	Creighton	197	12/04/92	21:38:26	0,9	Creighton
136	10/06/92	15:57:53	1,0	Creighton	198	12/05/92	02:21:04	1,1	Creighton
137	10/06/92	16:18:41	0,7	Creighton	199	12/05/92	18:25:37	0,6	Creighton
138	10/07/92	01:38:23	1,1	Creighton	200	12/05/92	20:56:17	1,1	Creighton
139	10/08/92	14:06:56	1,6-1,9	Creighton	201	12/06/92	01:26:20	1,1	Creighton
140	10/10/92	03:05:20	0,9	Creighton	202	12/07/92	22:55:47	1,1	Creighton
141	10/10/92	20:59:06	1,1	Creighton	203	12/08/92	01:18:00	0,7	Creighton
142	10/10/92	22:41:20	1,2	Creighton	204	12/09/92	22:14:15	2,3-2,2	Creighton
143	10/11/92	15:10:07	0,0	Creighton	204	12/10/92	21:36:24	1,6	Creighton
144	10/15/92	09:27:10	0,8	Creighton	206	12/17/92	13:21:38	2,1-2,6	Creighton
145	10/17/92	10:37:23	0,8	Creighton	207	12/17/92	22:38:18	1,1	Creighton
146	10/20/92	18:37:28	2,2-2,6	Creighton	208	12/19/92	16:05:57	1,4	Creighton
147	10/20/92	19:14:45	0,8	Creighton	209	12/21/92	08:01:42	0,4	Creighton
148	10/21/92	22:03:41	0,6	Creighton	210	12/21/92	21:18:04	0,3	Creighton
149	10/22/92	21:47:59	1,0	Creighton	211	12/24/92	17:23:17	0,6	Creighton
150	10/23/92	01:33:22	0,7	Creighton	212	12/27/92	07:18:14	0,9	Creighton
151	10/23/92	07:41:53	0,8	Creighton	213	12/29/92	08:15:21	0,5	Creighton
152	10/23/92	10:49:19	1,0	Creighton	214	1/01/93	05:42:50	0,7	Creighton
153	10/23/92	11:21:01	0,7	Creighton	215	1/03/93	18:27:05	0,8	Creighton
154	10/23/92	15:20:32	0,8	Creighton	216	1/05/93	21:17:40	0,6	Creighton
155	10/26/92	09:18:52	0,8	Creighton	217	1/09/93	16:29:56	0,7	Creighton
156	10/27/92	22:01:41	0,9	Creighton	218	1/09/93	20:15:38	0,4	Creighton
157	10/28/92	21:09:24	1,0	Creighton	219	1/11/93	06:34:51	0,6	Creighton
158	10/28/92	22:32:21	1,7-1,9	Creighton	220	1/11/93	10:11:25	0,9	Creighton
159	10/29/92	06:19:45	1,6-1,5	Creighton	221	1/11/93	19:02:27	1,1	Creighton
160	10/29/92	14:45:04	1,0	Creighton	222	1/12/93	06:13:42	1,3	Creighton
161	10/29/92	17:29:43	0,9	Creighton	223	1/12/93	23:32:54	0,8	Creighton
162	10/29/92	20:02:07	1,9-2,1	Creighton	224	1/15/93	00:07:22	0,7	Creighton
163	10/31/92	12:04:25	1,8-2,1	Creighton	225	1/23/93	21:16:16	1,2	Creighton
164	10/31/92	21:34:50	0,8	Creighton	226	1/29/93	11:19:28	0,6	Creighton
165	11/01/92	18:54:16	1,1	Creighton	227	2/06/93	10:03:03	1,6-1,8	Creighton
166	11/02/92	09:32:48	0,9	Creighton	228	2/07/93	03:11:06	1,4-1,9	Creighton
167	11/03/92	05:19:37	1,4	Creighton	229	2/09/93	02:21:29	0,8	Creighton
168	11/05/92	22:26:05	0,5	Creighton	230	2/09/93	05:19:01	0,8	Creighton
169	11/06/92	09:13:36	0,8	Creighton	231	2/09/93	17:57:45	0,8	Creighton
170	11/07/92	05:38:13	1,9-2,0	Creighton	232	2/10/93	20:32:55	0,9	Creighton
171	11/07/92	05:50:17	1,2	Creighton	233	2/10/93	22:56:05	1,1	Creighton
172	11/07/92	15:21:09	1,4	Creighton	234	2/11/93	00:39:49	1,4	Creighton
173	11/08/92	12:46:13	1,4	Creighton	235	2/11/93	00:39:55	0,8	Creighton
174	11/11/92	20:59:55	0,6	Creighton	236	2/16/93	06:32:24	1,2	Creighton
175	11/13/92	21:18:14	0,9	Creighton	237	2/16/93	16:28:49	1,0	Creighton
176	11/17/92	20:09:08	1,1	Creighton	238	2/18/93	18:06:58	1,1	Creighton
177	11/17/92	22:25:49	1,2	Creighton	239	2/20/93	20:33:56	0,8	Creighton
178	11/17/92	22:37:04	0,7	Creighton	240	2/21/93	22:07:40	1,6-1,6	Creighton
179	11/19/92	17:11:43	0,6	Creighton	241	2/22/93	13:32:05	1,3	Creighton
180	11/20/92	17:30:35	1,1	Creighton	242	2/23/93	09:54:16	1,2	Creighton
181	11/20/92	17:31:20	0,5	Creighton	243	2/23/93	20:24:34	0,7	Creighton
182	11/20/92	19:51:09	0,5	Creighton	244	2/25/93	12:50:11	0,8	Creighton
183	11/20/92	19:51:09	0,5	Creighton	245	2/25/93	22:00:13	1,2	Creighton
184	11/22/92	22:41:24	0,0	Creighton	246	2/26/93	22:57:18	1,1	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
247	2/27/93	11:35:56	0,9	Creighton	310	6/04/93	04:40:44	1,2	Creighton
248	2/27/93	19:12:57	1,2	Creighton	311	6/05/93	22:13:06	1,5	Creighton
249	2/27/93	19:13:17	1,0	Creighton	312	6/06/93	22:19:45	0,4	Creighton
250	3/01/93	00:00:41	1,0	Creighton	313	6/07/93	04:41:37	0,9	Creighton
251	3/01/93	23:22:14	1,3	Creighton	314	6/07/93	13:31:47	0,9	Creighton
252	3/03/93	10:49:50	1,1	Creighton	315	6/08/93	17:02:10	1,5-2,0	Creighton
253	3/04/93	21:33:45	0,6	Creighton	316	6/08/93	18:47:32	0,6	Creighton
254	3/05/93	01:52:17	1,2	Creighton	317	6/09/93	21:56:28	1,4	Creighton
255	3/10/93	04:31:03	1,2	Creighton	318	6/10/93	03:06:26	1,1	Creighton
256	3/13/93	04:03:37	0,8	Creighton	319	6/10/93	12:13:27	1,3	Creighton
257	3/16/93	02:22:02	2,0-2,2	Creighton	320	6/11/93	19:55:42	0,5	Creighton
258	3/16/93	02:24:29	1,5	Creighton	321	6/11/93	21:03:34	1,4	Creighton
259	3/16/93	13:33:13	0,9	Creighton	322	6/14/93	06:56:22	0,7	Creighton
260	3/21/93	10:42:21	1,1	Creighton	323	6/14/93	07:05:38	0,9	Creighton
261	3/21/93	10:52:18	1,0	Creighton	324	6/15/93	00:39:38	1,1	Creighton
262	3/24/93	01:39:39	1,6	Creighton	325	6/15/93	14:32:39	2,6-2,7	Creighton
263	3/26/93	03:46:18	0,9	Creighton	326	6/15/93	15:15:48	1,0	Creighton
264	3/29/93	18:09:58	1,2	Creighton	327	6/15/93	22:43:29	1,5	Creighton
265	3/30/93	03:02:21	1,0	Creighton	328	6/18/93	07:41:44	0,8	Creighton
266	4/01/93	19:14:03	2,1-2,1	Creighton	329	6/22/93	07:50:48	1,8	Creighton
267	4/01/93	20:51:22	1,1	Creighton	330	6/22/93	10:44:04	0,6	Creighton
268	4/02/93	02:14:51	1,2	Creighton	331	6/22/93	15:37:01	0,6	Creighton
269	4/02/93	14:23:13	2,9-2,9	Creighton	332	6/22/93	15:46:12	0,8	Creighton
270	4/02/93	14:27:43	1,5	Creighton	333	6/23/93	03:36:41	0,0	Creighton
271	4/02/93	14:35:28	1,3	Creighton	334	7/05/93	08:17:30	1,5-1,4	Creighton
272	4/02/93	22:55:24	1,3	Creighton	335	7/05/93	19:02:11	1,4-1,5	Creighton
273	4/03/93	02:16:59	0,8	Creighton	336	7/07/93	08:13:14	1,2	Creighton
274	4/03/93	09:56:25	1,1	Creighton	337	7/09/93	20:24:50	1,2	Creighton
275	4/03/93	22:25:59	1,5	Creighton	338	7/10/93	10:29:11	1,1	Creighton
276	4/03/93	22:50:57	0,7	Creighton	339	7/27/93	11:52:43	–	Creighton
277	4/04/93	06:21:48	0,6	Creighton	340	7/28/93	14:33:04	1,7-2,3	Creighton
278	4/05/93	14:27:18	0,7	Creighton	341	8/01/93	01:05:54	1,0	Creighton
279	4/05/93	21:56:12	1,0	Creighton	342	8/04/93	07:03:35	1,1	Creighton
280	4/18/93	04:15:33	0,8	Creighton	343	8/05/93	17:55:02	1,2	Creighton
281	4/18/93	08:36:49	1,2	Creighton	344	8/05/93	22:39:51	3,1-2,9	Creighton
282	4/19/93	23:12:57	0,9	Creighton	345	8/05/93	22:41:36	1,3	Creighton
283	4/23/93	16:31:20	1,4	Creighton	346	8/06/93	04:40:53	0,8	Creighton
284	4/28/93	08:03:23	1,5	Creighton	347	8/06/93	06:48:22	1,6	Creighton
285	4/29/93	02:45:32	1,4	Creighton	348	8/07/93	21:18:36	2,1-2,2	Creighton
286	4/29/93	15:26:12	1,8	Creighton	349	8/08/93	20:02:41	1,0	Creighton
287	4/29/93	17:02:55	0,7	Creighton	350	8/09/93	10:17:16	0,9	Creighton
288	5/06/93	06:49:25	1,1	Creighton	351	8/09/93	10:51:21	1,0	Creighton
289	5/07/93	01:01:30	1,2	Creighton	352	8/10/93	00:58:59	0,3	Creighton
290	5/07/93	14:15:26	0,5	Creighton	353	8/10/93	02:51:10	1,7	Creighton
291	5/08/93	13:44:26	1,3	Creighton	354	8/10/93	11:57:23	0,9	Creighton
292	5/08/93	14:57:12	1,9-1,9	Creighton	355	8/10/93	21:16:58	0,9	Creighton
293	5/08/93	15:17:49	1,4	Creighton	356	8/11/93	00:43:17	1,0	Creighton
294	5/08/93	20:12:41	2,6-2,5	Creighton	357	8/11/93	02:29:46	1,5	Creighton
295	5/11/93	22:36:36	1,2	Creighton	358	8/11/93	04:35:36	1,2	Creighton
296	5/12/93	21:03:21	1,5	Creighton	359	8/11/93	09:07:08	1,0	Creighton
297	5/13/93	04:37:55	0,9	Creighton	360	8/12/93	09:26:57	1,3	Creighton
298	5/13/93	12:40:10	0,7	Creighton	361	8/12/93	22:44:37	1,2	Creighton
299	5/14/93	08:05:12	1,8	Creighton	362	8/13/93	11:11:19	1,3	Creighton
300	5/14/93	08:07:12	1,8	Creighton	363	8/13/93	18:24:08	1,7	Creighton
301	5/14/93	10:11:45	1,1	Creighton	364	8/15/93	01:03:18	1,5	Creighton
302	5/16/93	18:35:10	0,7	Creighton	365	8/17/93	02:58:06	1,3	Creighton
303	5/22/93	07:42:45	0,5	Creighton	366	8/19/93	22:49:11	2,0-1,7	Creighton
304	5/23/93	10:16:33	0,8	Creighton	367	8/19/93	22:50:12	1,4	Creighton
305	5/24/93	01:59:03	1,1	Creighton	368	8/21/93	01:05:35	1,2	Creighton
306	5/25/93	01:58:29	1,0	Creighton	369	8/23/93	08:35:55	1,6	Creighton
307	5/26/93	19:27:55	1,0	Creighton	370	8/25/93	00:01:23	1,3	Creighton
308	5/30/93	18:05:06	0,5	Creighton	371	8/25/93	00:08:22	1,1	Creighton
309	6/03/93	03:20:11	1,1	Creighton	372	8/26/93	03:58:24	1,1	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
373	8/27/93	13:38:16	0,8	Creighton	436	10/22/93	17:47:07	1,0	Creighton
374	8/27/93	17:33:58	1,1	Creighton	437	10/23/93	02:26:55	1,2	Creighton
375	8/28/93	07:58:07	0,9	Creighton	438	10/25/93	06:30:44	0,8	Creighton
376	8/29/93	12:57:32	0,9	Creighton	439	10/26/93	04:50:27	1,1	Creighton
377	8/29/93	12:57:32	1,2	Creighton	440	10/26/93	20:56:17	1,8	Creighton
378	9/03/93	14:00:25	1,9	Creighton	441	10/26/93	20:57:39	0,9	Creighton
379	9/03/93	14:16:25	0,9	Creighton	442	10/29/93	05:30:09	0,9	Creighton
380	9/03/93	22:47:48	1,4	Creighton	443	10/29/93	05:32:44	0,7	Creighton
381	9/04/93	05:39:18	1,4	Creighton	444	11/01/93	23:15:25	1,1	Creighton
382	9/04/93	06:08:28	1,2	Creighton	445	11/03/93	02:34:37	0,7	Creighton
383	9/06/93	01:58:44	1,3	Creighton	446	11/03/93	17:17:01	0,9	Creighton
384	9/06/93	03:12:22	1,3	Creighton	447	11/05/93	03:43:21	1,8-2,4	Creighton
385	9/09/93	03:17:48	1,3	Creighton	448	11/05/93	04:54:39	0,9	Creighton
386	9/09/93	04:52:07	1,6	Creighton	449	11/05/93	13:10:23	1,0	Creighton
387	9/13/93	23:59:07	2,3	Creighton	450	11/05/93	22:23:22	2,8-2,8	Creighton
388	9/15/93	07:58:45	1,0	Creighton	451	11/05/93	22:23:28	1,1	Creighton
389	9/15/93	15:24:21	0,9	Creighton	452	11/05/93	22:24:21	1,0	Creighton
390	9/16/93	02:02:43	0,4	Creighton	453	11/05/93	22:25:33	0,7	Creighton
391	9/16/93	21:50:15	0,7	Creighton	454	11/05/93	23:00:12	1,3	Creighton
392	9/17/93	05:42:32	1,4	Creighton	455	11/06/93	06:11:39	0,8	Creighton
393	9/19/93	13:17:44	0,5	Creighton	456	11/06/93	06:12:04	1,1	Creighton
394	9/22/93	14:39:40	1,1	Creighton	457	11/06/93	10:37:31	1,3	Creighton
395	9/22/93	14:57:06	0,8	Creighton	458	11/07/93	04:12:14	1,3	Creighton
396	9/22/93	16:05:50	1,6	Creighton	459	11/07/93	05:17:10	1,1	Creighton
397	9/22/93	19:16:39	1,0	Creighton	460	11/08/93	00:14:57	1,2	Creighton
398	9/25/93	11:34:43	0,4	Creighton	461	11/08/93	00:36:58	1,0	Creighton
399	9/25/93	13:12:55	1,1	Creighton	462	11/09/93	12:47:35	0,7	Creighton
400	9/25/93	20:37:24	1,9-1,8	Creighton	463	11/10/93	13:08:55	1,0	Creighton
401	9/27/93	03:28:29	1,4	Creighton	464	11/11/93	08:05:22	1,1	Creighton
402	9/27/93	08:25:21	1,5	Creighton	465	11/12/93	20:59:00	0,9	Creighton
403	9/27/93	23:48:28	1,1	Creighton	466	11/14/93	10:16:05	0,9	Creighton
404	9/30/93	02:43:55	0,7	Creighton	467	11/16/93	21:42:18	0,7	Creighton
405	9/30/93	11:52:19	1,0	Creighton	468	11/18/93	15:35:34	0,3	Creighton
406	9/30/93	15:48:56	1,2	Creighton	469	11/19/93	15:54:34	1,5	Creighton
407	10/01/93	14:20:22	0,8	Creighton	470	11/20/93	07:22:39	1,4	Creighton
408	10/01/93	22:41:23	0,7	Creighton	471	11/22/93	13:26:14	1,3	Creighton
409	10/02/93	00:40:28	0,9	Creighton	472	11/24/93	08:42:19	1,1	Creighton
410	10/02/93	00:06:39	1,9	Creighton	473	11/24/93	13:42:00	0,7	Creighton
411	10/02/93	03:28:47	1,4	Creighton	474	11/24/93	22:31:07	1,0	Creighton
412	10/04/93	21:01:26	1,2	Creighton	475	11/24/93	22:47:05	0,6	Creighton
413	10/04/93	22:18:27	0,7	Creighton	476	11/25/93	14:10:33	1,0	Creighton
414	10/05/93	16:10:04	1,2	Creighton	477	11/25/93	14:18:46	1,3	Creighton
415	10/05/93	17:09:53	0,9	Creighton	478	11/29/93	23:47:19	0,7	Creighton
416	10/05/93	20:12:12	0,7	Creighton	479	11/30/93	01:09:34	0,4	Creighton
417	10/06/93	15:15:14	0,8	Creighton	480	11/30/93	17:28:51	1,5-1,9	Creighton
418	10/07/93	22:38:23	0,7	Creighton	481	12/02/93	12:06:13	2,2-2,5	Creighton
419	10/08/93	16:18:17	1,1	Creighton	482	12/02/93	13:41:10	2,4-2,6	Creighton
420	10/08/93	19:46:22	0,8	Creighton	483	12/03/93	00:31:07	1,4	Creighton
421	10/09/93	13:43:56	1,0	Creighton	484	12/03/93	10:24:13	0,6	Creighton
422	10/11/93	23:24:31	0,9	Creighton	485	12/08/93	19:49:21	1,0	Creighton
423	10/12/93	16:19:54	2,6-2,6	Creighton	486	12/11/93	11:06:00	1,3	Creighton
424	10/13/93	00:27:50	1,2	Creighton	487	12/11/93	13:29:00	0,8	Creighton
425	10/14/93	06:47:23	0,7	Creighton	488	12/20/93	02:41:11	1,6	Creighton
426	10/14/93	09:41:58	1,4	Creighton	489	12/20/93	15:01:10	0,7	Creighton
427	10/14/93	21:20:26	1,0	Creighton	490	12/21/93	08:34:35	0,7	Creighton
428	10/14/93	22:01:40	1,0	Creighton	491	12/28/93	03:52:33	0,8	Creighton
429	10/15/93	21:38:55	0,6	Creighton	492	12/29/93	09:59:14	1,0	Creighton
430	10/16/93	18:09:30	1,4	Creighton	493	12/29/93	22:33:06	0,8	Creighton
431	10/17/93	04:44:30	2,1-1,5	Creighton	494	1/05/94	08:21:24	0,9	Creighton
432	10/18/93	12:03:34	1,2	Creighton	495	1/06/94	10:31:26	1,8	Creighton
433	10/19/93	22:23:04	2,0-2,2	Creighton	496	1/18/94	12:31:55	1,4	Creighton
434	10/20/93	21:53:07	1,0	Creighton	497	1/18/94	12:40:20	0,9	Creighton
435	10/22/93	08:58:09	1,8	Creighton	498	1/19/94	01:18:26	1,8	Creighton
					499	1/19/94	14:28:18	1,7	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
500	1/22/94	22:41:40	1,0	Creighton
501	1/25/94	17:05:44	2,0	Creighton
502	2/03/94	01:04:00	1,2	Creighton
503	2/15/94	01:42:23	0,4	Creighton
504	2/16/94	07:55:58	1,2	Creighton
505	3/07/94	13:46:05	0,6	Creighton
506	3/09/94	11:01:30	1,2	Creighton
507	3/09/94	22:11:17	1,4	Creighton
508	3/13/94	20:32:02	1,8	Creighton
509	3/14/94	09:37:30	0,3	Creighton
510	3/17/94	18:32:22	0,3	Creighton
511	3/19/94	04:44:39	0,8	Creighton
512	3/19/94	21:05:26	1,6	Creighton
513	3/22/94	22:12:21	1,1	Creighton
514	3/25/94	22:24:48	0,2	Creighton
515	3/26/94	13:09:07	1,4	Creighton
516	3/28/94	07:28:06	1,3	Creighton
517	3/31/94	08:11:08	2,5-2,3	Creighton
518	3/31/94	14:02:11	0,8	Creighton
519	4/01/94	03:57:48	1,1	Creighton
520	4/01/94	06:17:55	1,0	Creighton
521	4/02/94	08:26:30	2,3-2,0	Creighton
522	4/02/94	13:32:28	1,5	Creighton
523	4/16/94	01:46:16	0,8	Creighton
524	4/22/94	04:04:49	0,3	Creighton
525	4/26/94	04:20:59	0,7	Creighton
526	4/30/94	17:58:30	0,9	Creighton
527	5/07/94	00:33:17	0,6	Creighton
528	5/09/94	13:31:21	0,7	Creighton
529	5/10/94	23:07:41	0,8	Creighton
530	5/12/94	14:52:05	0,5	Creighton
531	5/13/94	06:17:48	1,1	Creighton
532	5/14/94	02:39:22	0,7	Creighton
533	5/14/94	12:59:35	2,4-2,6	Creighton
534	5/14/94	15:49:16	1,3	Creighton
535	5/14/94	23:35:00	1,0	Creighton
536	5/15/94	06:14:59	0,7	Creighton
537	5/16/94	03:23:44	1,3	Creighton
538	5/16/94	03:23:50	1,0	Creighton
539	5/16/94	09:08:18	1,4	Creighton
540	5/17/94	01:03:44	1,6-1,9	Creighton
541	5/18/94	08:50:03	0,8	Creighton
542	5/19/94	03:26:33	0,9	Creighton
543	5/20/94	13:42:11	0,9	Creighton
544	5/23/94	04:05:28	0,8	Creighton
545	5/23/94	18:05:06	1,2	Creighton
546	5/24/94	19:05:39	0,5	Creighton
547	5/26/94	14:49:13	0,8	Creighton
548	5/28/94	12:46:13	0,7	Creighton
549	5/28/94	12:49:36	0,4	Creighton
550	6/02/94	12:39:06	0,9	Creighton
551	6/06/94	22:05:11	0,5	Creighton
552	6/07/94	03:05:30	1,6	Creighton
553	6/07/94	07:53:22	0,7	Creighton
554	6/08/94	10:30:28	0,3	Creighton
555	6/09/94	21:08:14	1,2	Creighton
556	6/11/94	05:45:55	1,0	Creighton
557	6/11/94	14:01:16	1,1	Creighton
558	6/11/94	17:17:31	1,2	Creighton
559	6/11/94	18:14:36	1,2	Creighton
560	6/11/94	21:07:36	0,7	Creighton
561	6/15/94	18:39:15	0,7	Creighton
562	6/17/94	23:51:36	0,8	Creighton
563	6/18/94	03:26:26	0,5	Creighton
564	6/21/94	17:41:02	1,0	Creighton
565	6/24/94	06:56:03	0,6	Creighton
566	6/30/94	01:43:02	0,4	Creighton
567	6/30/94	01:44:57	1,0	Creighton
567	6/30/94	16:54:36	1,0	Creighton
568	7/01/94	14:57:11	1,1	Creighton
569	7/05/94	13:51:54	1,1	Creighton
570	7/11/94	10:56:54	1,1	Creighton
571	7/11/94	22:47:57	1,2	Creighton
572	7/28/94	05:45:10	1,2	Creighton
573	7/28/94	13:10:42	1,0	Creighton
574	7/28/94	22:50:02	1,4	Creighton
575	7/30/94	06:42:05	0,8	Creighton
576	7/30/94	20:41:25	1,1	Creighton
577	8/01/94	23:43:39	1,1	Creighton
578	8/06/94	06:11:36	1,0	Creighton
579	8/07/94	00:44:16	1,6	Creighton
580	8/07/94	01:02:56	0,4	Creighton
581	8/07/94	15:25:06	1,2	Creighton
582	8/07/94	23:08:18	0,0	Creighton
583	8/07/94	23:17:47	1,8-1,6	Creighton
584	8/08/94	15:41:05	0,4	Creighton
585	8/09/94	11:06:53	1,7	Creighton
586	8/09/94	15:36:34	0,9	Creighton
587	8/09/94	18:39:11	0,5	Creighton
588	8/11/94	14:10:33	1,4	Creighton
589	8/12/94	23:15:02	1,4	Creighton
590	8/13/94	01:00:58	1,7	Creighton
591	8/15/94	20:51:42	1,2	Creighton
592	8/16/94	22:51:01	0,5	Creighton
593	8/18/94	22:44:22	1,0	Creighton
594	8/22/94	10:59:55	0,5	Creighton
595	8/23/94	22:52:14	0,7	Creighton
596	8/24/94	13:34:14	0,0	Creighton
597	8/24/94	19:22:07	0,8	Creighton
598	8/25/94	03:46:49	1,3	Creighton
599	8/25/94	07:43:24	1,0	Creighton
600	8/26/94	08:17:15	0,5	Creighton
601	8/26/94	08:19:35	0,6	Creighton
602	8/30/94	12:10:54	0,8	Creighton
603	8/30/94	12:18:54	1,2	Creighton
604	8/30/94	14:58:07	2,0-1,7	Creighton
605	8/30/94	15:34:27	1,5	Creighton
606	8/30/94	21:35:45	0,7	Creighton
607	8/31/94	03:17:04	2,9-3,1	Creighton
608	8/31/94	18:17:17	1,2	Creighton
609	9/01/94	11:11:12	0,9	Creighton
610	9/04/94	11:51:43	1,2	Creighton
611	9/04/94	15:07:35	1,0	Creighton
612	9/05/94	05:33:53	0,8	Creighton
613	9/05/94	21:41:50	0,9	Creighton
614	9/07/94	03:29:52	0,9	Creighton
615	9/07/94	18:44:50	1,4	Creighton
616	9/08/94	23:04:48	0,8	Creighton
617	9/08/94	23:11:43	0,7	Creighton
618	9/09/94	12:29:23	0,9	Creighton
619	9/10/94	17:43:44	0,6	Creighton
620	9/11/94	02:27:57	1,2	Creighton
621	9/15/94	13:30:25	1,4	Creighton
622	9/15/94	23:12:33	1,3	Creighton
623	9/17/94	10:07:58	1,2	Creighton
624	9/20/94	09:13:08	3,2-3,0	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

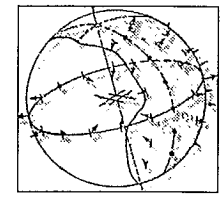
N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
625	9/20/94	09:13:22	2,0	Creighton	688	10/23/94	23:19:47	1,6-1,5	Creighton
626	9/20/94	09:13:43	0,9	Creighton	689	10/26/94	15:36:02	1,2	Creighton
627	9/20/94	09:26:51	0,9	Creighton	689	10/26/94	19:56:39	0,6	Creighton
628	9/20/94	09:31:15	0,6	Creighton	690	11/01/94	19:38:13	0,8	Creighton
629	9/20/94	18:00:20	0,9	Creighton	691	11/02/94	09:15:44	1,6	Creighton
630	9/20/94	21:15:45	1,6	Creighton	692	11/03/94	17:35:32	1,0	Creighton
631	9/20/94	21:16:51	1,2	Creighton	693	11/14/94	17:16:29	1,0	Creighton
632	9/20/94	21:39:52	0,9	Creighton	694	11/15/94	03:36:07	0,2	Creighton
633	9/21/94	02:26:19	2,5	Creighton	695	11/18/94	14:52:22	1,0	Creighton
634	9/21/94	02:28:33	1,0	Creighton	696	11/20/94	15:12:06	0,9	Creighton
635	9/21/94	02:57:18	0,4	Creighton	697	11/20/94	17:54:29	0,8	Creighton
636	9/21/94	22:15:44	1,1	Creighton	698	11/20/94	23:14:02	0,4	Creighton
637	9/23/94	21:01:37	0,8	Creighton	699	11/21/94	15:01:06	1,2	Creighton
638	9/23/94	22:36:30	0,7	Creighton	700	11/23/94	02:52:42	0,6	Creighton
639	9/24/94	01:04:37	1,1	Creighton	701	11/23/94	02:56:46	0,7	Creighton
640	9/24/94	01:11:03	0,6	Creighton	702	11/23/94	20:41:19	1,1	Creighton
641	9/24/94	01:52:01	0,9	Creighton	703	11/23/94	22:33:38	1,3	Creighton
642	9/25/94	13:08:23	0,8	Creighton	704	11/23/94	22:48:42	0,6	Creighton
643	9/28/94	15:34:48	1,3	Creighton	705	11/24/94	20:00:14	1,5	Creighton
644	9/29/94	00:54:58	0,7	Creighton	706	11/25/94	02:39:35	1,0	Creighton
645	9/30/94	06:52:12	0,9	Creighton	707	11/30/94	19:37:28	0,8	Creighton
646	9/30/94	20:06:38	1,0	Creighton	708	12/05/94	08:24:37	2,7-2,6	Creighton
647	10/01/94	10:34:59	0,8	Creighton	709	12/05/94	08:24:43	1,1	Creighton
648	10/02/94	04:21:55	0,8	Creighton	710	12/07/94	01:44:27	1,1	Creighton
649	10/02/94	21:37:51	1,0	Creighton	711	12/07/94	05:35:40	0,9	Creighton
650	10/02/94	23:27:48	1,2	Creighton	712	12/09/94	08:52:46	1,9-2,0	Creighton
651	10/03/94	00:55:24	3,0-2,9	Creighton	713	12/10/94	00:38:22	0,7	Creighton
652	10/03/94	00:55:34	1,3	Creighton	714	12/11/94	11:10:53	1,2	Creighton
653	10/03/94	01:44:13	1,0	Creighton	715	12/13/94	22:58:26	1,1	Creighton
654	10/03/94	01:46:34	1,4	Creighton	716	12/18/94	17:50:54	3,0-2,8	Creighton
655	10/03/94	02:17:26	0,9	Creighton	717	12/19/94	11:02:41	2,1-1,6	Creighton
656	10/03/94	02:19:30	1,0	Creighton	718	12/19/94	23:50:39	2,4-1,6	Creighton
657	10/03/94	04:06:44	1,4	Creighton	719	12/19/94	23:51:16	0,9	Creighton
658	10/03/94	06:34:08	0,9	Creighton	720	12/20/94	16:19:16	1,5	Creighton
659	10/03/94	06:35:25	1,1	Creighton	721	12/22/94	03:27:36	1,1	Creighton
660	10/03/94	08:22:05	1,1	Creighton	722	12/22/94	04:56:34	1,1	Creighton
661	10/03/94	10:13:28	1,6	Creighton	723	12/22/94	08:15:45	0,4	Creighton
662	10/03/94	13:02:13	0,7	Creighton	724	12/24/94	06:57:23	0,6	Creighton
663	10/05/94	11:17:35	1,2	Creighton	725	1/05/95	04:06:01	0,7	Creighton
664	10/05/94	12:44:33	1,0	Creighton	726	1/07/95	14:03:36	0,8	Creighton
665	10/05/94	21:44:47	0,6	Creighton	727	1/09/95	11:17:48	0,9	Creighton
666	10/05/94	22:50:48	1,4	Creighton	728	1/13/95	12:24:42	1,1	Creighton
667	10/05/94	23:05:24	0,6	Creighton	729	1/13/95	21:30:46	1,4	Creighton
668	10/06/94	06:36:41	1,2	Creighton	730	1/15/95	11:11:06	0,5	Creighton
669	10/07/94	08:45:54	1,4	Creighton	731	1/15/95	11:26:12	0,9	Creighton
670	10/07/94	09:46:41	1,1	Creighton	732	1/17/95	10:58:57	0,7	Creighton
671	10/07/94	22:56:39	0,8	Creighton	733	1/30/95	20:09:22	1,0	Creighton
672	10/08/94	03:07:41	1,2	Creighton	734	1/30/95	20:16:19	0,7	Creighton
673	10/08/94	04:44:30	1,0	Creighton	735	2/03/95	06:05:33	1,0	Creighton
674	10/08/94	18:26:45	0,7	Creighton	736	2/04/95	10:12:57	1,1	Creighton
675	10/09/94	18:24:10	1,3	Creighton	737	2/05/95	10:25:18	1,4	Creighton
676	10/09/94	22:18:09	1,5	Creighton	738	2/07/95	21:24:59	1,2	Creighton
677	10/11/94	07:39:03	1,4	Creighton	739	2/09/95	21:49:47	1,3	Creighton
678	10/12/94	13:48:39	0,6	Creighton	740	2/10/95	15:15:22	1,8-1,9	Creighton
679	10/12/94	15:24:41	1,1	Creighton	741	2/11/95	12:35:53	1,2	Creighton
680	10/13/93	09:16:29	1,0	Creighton	742	2/13/95	04:23:29	0,7	Creighton
681	10/14/94	07:29:55	1,1	Creighton	743	2/14/95	05:52:52	0,0	Creighton
682	10/15/94	23:25:21	1,0	Creighton	744	2/15/95	13:44:01	0,9	Creighton
683	10/16/94	22:00:45	1,0	Creighton	745	2/16/95	07:19:11	0,5	Creighton
684	10/18/94	22:52:34	0,5	Creighton	746	2/16/95	12:23:47	0,2	Creighton
685	10/19/94	03:40:22	0,9	Creighton	747	2/16/95	21:32:26	0,2	Creighton
686	10/21/94	04:54:34	1,2	Creighton	748	2/20/95	18:11:38	1,0	Creighton
687	10/23/94	04:54:51	2,5-2,5	Creighton	749	2/20/95	21:14:29	1,6	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
750	2/20/95	22:16:19	1,2	Creighton	812	5/06/95	21:41:03	1,5-1,7	Creighton
751	2/21/95	15:51:02	1,6	Creighton	813	5/09/95	05:11:39	1,4-1,5	Creighton
752	2/23/95	05:53:32	1,0	Creighton	814	5/09/95	20:56:20	1,4	Creighton
753	2/23/95	15:13:30	0,7	Creighton	815	5/10/95	10:44:07	1,6	Creighton
754	2/23/95	21:21:08	0,9	Creighton	816	5/10/95	10:16:45	1,0	Creighton
755	2/25/95	11:40:43	1,1	Creighton	817	5/12/95	04:34:57	1,7-1,8	Creighton
756	2/26/95	21:04:30	0,7	Creighton	818	5/21/95	19:39:22	1,2	Creighton
757	2/28/95	02:03:08	0,9	Creighton	819	5/24/95	02:48:14	0,7	Creighton
758	2/28/95	16:22:13	0,6	Creighton	820	5/24/95	09:04:02	0,4	Creighton
759	2/28/95	23:06:53	1,5	Creighton	821	5/25/95	08:14:56	1,7-1,8	Creighton
760	3/02/95	04:47:54	3,7-3,6	Creighton	821	5/25/95	16:06:21	1,3	Creighton
761	3/02/95	05:46:08	0,8	Creighton	822	5/26/95	09:41:27	1,1	Creighton
762	3/02/95	05:51:09	1,1	Creighton	823	5/27/95	19:36:25	1,0	Creighton
763	3/02/95	07:33:22	1,5	Creighton	824	5/27/95	20:52:58	1,3	Creighton
764	3/02/95	08:57:15	1,9	Creighton	825	6/01/95	21:14:15	2,0-2,0	Creighton
765	3/02/95	09:46:07	1,5	Creighton	826	6/01/95	21:14:56	1,2	Creighton
766	3/03/95	14:38:25	0,8	Creighton	827	6/04/95	04:38:08	1,0	Creighton
767	3/04/95	18:58:14	1,0	Creighton	828	6/06/95	08:27:52	1,7-2,2	Creighton
768	3/04/95	19:05:56	1,3	Creighton	829	6/06/95	21:37:03	1,3	Creighton
769	3/05/95	11:31:05	0,7	Creighton	830	6/12/95	17:03:21	1,1	Creighton
770	3/06/95	12:05:05	0,9	Creighton	831	6/13/95	15:07:52	1,0	Creighton
770	3/06/95	12:05:35	0,9	Creighton	833	6/14/95	16:30:36	1,2	Creighton
771	3/06/95	15:11:48	0,5	Creighton	834	6/17/95	22:55:36	0,7	Creighton
772	3/06/95	16:21:10	0,8	Creighton	835	6/18/95	20:19:35	0,6	Creighton
773	3/07/95	11:51:39	0,9	Creighton	836	6/19/95	01:52:04	1,0	Creighton
774	3/07/95	15:47:05	1,7	Creighton	837	6/19/95	04:08:11	0,9	Creighton
775	3/08/95	14:13:08	0,8	Creighton	838	6/21/95	23:05:07	0,9	Creighton
776	3/08/95	14:19:39	0,5	Creighton	839	6/25/95	09:16:54	1,7-1,9	Creighton
777	3/09/95	07:04:54	1,2	Creighton	840	6/28/95	02:37:43	0,7	Creighton
778	3/09/95	10:23:45	1,6	Creighton	841	7/07/95	00:00:25	1,0	Creighton
779	3/10/95	01:22:10	1,5	Creighton	842	7/07/95	05:52:28	1,0	Creighton
780	3/10/95	04:58:47	0,4	Creighton	843	7/08/95	14:22:22	1,0	Creighton
780	3/10/95	11:17:52	1,4	Creighton	844	7/16/95	05:38:20	1,3	Creighton
781	3/10/95	22:25:44	2,1-2,3	Creighton	845	7/24/95	21:26:47	1,4	Creighton
782	3/11/95	05:29:41	2,1-2,4	Creighton	846	7/27/95	04:08:13	0,7	Creighton
783	3/11/95	06:39:52	1,0	Creighton	847	7/29/95	06:12:48	0,8	Creighton
784	3/11/95	09:53:59	2,5-2,3	Creighton	848	7/31/95	05:45:30	0,9	Creighton
785	3/11/95	19:31:25	2,1-1,6	Creighton	849	7/31/95	11:33:33	1,5	Creighton
786	3/14/95	05:42:26	1,4	Creighton	850	7/31/95	13:41:05	1,4	Creighton
787	3/15/95	22:01:23	1,0	Creighton	851	8/01/95	06:21:22	0,7	Creighton
788	3/16/95	15:47:03	0,4	Creighton	852	8/01/95	14:26:03	1,1	Creighton
789	3/16/95	20:06:25	0,9	Creighton	853	8/02/95	05:08:06	0,8	Creighton
790	3/17/95	02:05:19	0,7	Creighton	854	8/02/95	08:09:11	1,6	Creighton
791	3/17/95	09:50:10	0,8	Creighton	855	8/06/95	00:25:55	1,9-1,8	Creighton
792	3/17/95	12:47:18	0,9	Creighton	856	8/06/95	02:25:26	1,0	Creighton
793	3/17/95	17:15:17	1,3	Creighton	857	8/08/95	12:14:37	1,2	Creighton
794	3/18/95	05:07:07	1,0	Creighton	858	8/09/95	10:53:38	1,7	Creighton
795	3/20/95	08:35:10	2,0-2,3	Creighton	859	8/09/95	16:04:10	0,9	Creighton
796	3/20/95	13:38:45	1,3	Creighton	860	8/10/95	02:39:45	1,7	Creighton
797	3/22/95	06:50:58	0,9	Creighton	861	8/11/95	08:06:27	0,8	Creighton
798	3/23/95	07:49:56	1,7	Creighton	862	8/12/95	07:42:48	1,3	Creighton
799	3/23/95	12:03:54	1,4	Creighton	863	8/13/95	21:52:38	1,6	Creighton
800	3/24/95	14:51:25	1,2	Creighton	864	8/16/95	07:51:15	0,9	Creighton
801	3/24/95	20:40:16	1,1	Creighton	864	8/16/95	16:47:55	1,3	Creighton
802	3/29/95	04:01:54	1,3	Creighton	865	8/18/95	01:13:45	1,2	Creighton
803	3/29/95	10:52:58	0,3	Creighton	866	8/18/95	11:39:37	2,7-2,8	Creighton
804	4/26/95	18:02:37	1,0	Creighton	867	8/18/95	18:17:56	1,1	Creighton
805	4/27/95	11:18:33	1,0	Creighton	868	8/20/95	02:21:48	1,8-1,6	Creighton
806	4/30/95	19:35:06	0,7	Creighton	869	8/22/95	07:57:33	0,9	Creighton
807	5/01/95	21:20:20	0,9	Creighton	870	8/23/95	05:13:44	0,4	Creighton
808	5/02/95	18:34:48	1,9	Creighton	871	8/23/95	21:12:20	1,2	Creighton
810	5/05/95	04:36:49	1,2	Creighton	872	8/24/95	14:43:47	0,9	Creighton
811	5/06/95	11:01:47	1,3	Creighton	873	8/25/95	17:05:24	1,6	Creighton

TABLEAU (iii) (suite)

N°	Date	Heure	Magnitude	Mine	N°	Date	Heure	Magnitude	Mine
874	8/25/95	18:54:43	1,6	Creighton	902	9/25/95	00:56:47	1,2	Creighton
875	8/25/95	18:56:55	1,1	Creighton	903	9/25/95	00:57:33	1,0	Creighton
876	8/29/95	10:55:29	1,7	Creighton	904	9/26/95	06:50:20	1,3	Creighton
877	8/30/95	12:50:20	0,6	Creighton	905	9/26/95	11:10:44	1,1	Creighton
878	9/01/95	02:18:41	0,9	Creighton	906	9/27/95	17:18:27	0,9	Creighton
879	9/01/95	14:34:55	1,2	Creighton	907	9/29/95	07:12:44	1,3	Creighton
880	9/02/95	05:38:53	1,1	Creighton	908	10/02/95	01:48:43	1,8	Creighton
881	9/02/95	08:11:55	1,1	Creighton	909	10/02/95	11:46:56	0,9	Creighton
882	9/02/95	09:02:26	1,4	Creighton	910	10/06/95	12:06:29	1,5	Creighton
883	9/02/95	09:24:48	1,1	Creighton	911	10/07/95	17:57:42	0,8	Creighton
884	9/02/95	09:54:59	1,0	Creighton	912	10/16/95	21:58:24	0,9	Creighton
885	9/02/95	20:38:14	1,0	Creighton	913	10/19/95	03:12:04	1,6	Creighton
886	9/03/95	01:18:10	1,8-1,5	Creighton	914	10/20/95	20:11:59	1,2	Creighton
887	9/04/95	06:28:40	1,3	Creighton	915	10/25/95	08:25:42	1,8-2,0	Creighton
888	9/04/95	14:35:35	1,1	Creighton	916	10/25/95	08:25:58	1,0	Creighton
889	9/04/95	21:34:33	1,6	Creighton	917	10/29/95	02:40:36	1,1	Creighton
890	9/04/95	23:36:32	1,5	Creighton	918	11/03/95	13:06:21	1,1	Creighton
891	9/05/95	07:53:32	1,1	Creighton	919	11/04/95	06:42:18	1,8-1,8	Creighton
892	9/06/95	06:26:14	1,7-1,5	Creighton	920	11/05/95	10:07:19	1,3	Creighton
894	9/07/95	13:21:57	1,7	Creighton	921	11/06/95	09:10:29	1,9-2,2	Creighton
895	9/07/95	22:29:13	1,1	Creighton	922	10/06/95	23:35:11	1,1	Creighton
896	9/08/95	10:41:13	1,3	Creighton	923	11/09/95	07:34:48	1,1	Creighton
897	9/18/95	16:46:09	1,5	Creighton	924	11/10/95	08:11:36	0,9	Creighton
898	9/21/95	04:38:11	0,8	Creighton	925	11/18/95	01:22:12	1,3	Creighton
899	9/21/95	13:33:31	1,9	Creighton	926	11/18/95	21:07:06	1,0	Creighton
900	9/21/95	22:51:00	1,0	Creighton	927	11/19/95	03:57:48	1,0	Creighton
901	9/23/95	20:21:29	1,2	Creighton	928	11/19/95	09:14:29	1,4	Creighton



Détection des signaux ayant pour origine des ondes S – Études de cas

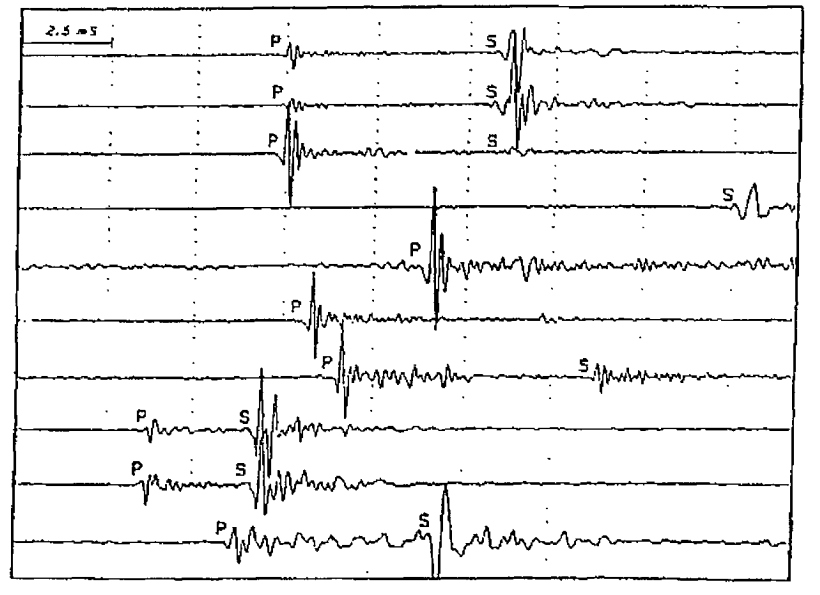
Un critère couramment utilisé pour déterminer les temps d'arrivée d'une émission acoustique ou d'un signal microsismique est la traversée du seuil, c'est-à-dire le moment où un signal dépasse un seuil préétabli, ce moment étant considéré comme le temps d'arrivée du signal. Ce critère est également utilisé dans les systèmes MP250. L'origine des temps d'arrivée établis d'après ce critère par un système microsismique est complexe. Outre les signaux d'ondes P, ces systèmes captent de nombreux signaux d'onde S et beaucoup de bruit. D'après des études réalisées dans de nombreuses mines au Canada et aux États-Unis, les signaux ayant pour origine des ondes S représentent environ 40 % des signaux captés. Il est donc impératif de déterminer les temps d'arrivée de ces ondes afin de pouvoir localiser la source avec précision.

Dans cette annexe, nous démontrons par plusieurs études de cas l'existence des signaux ayant pour origine des ondes S et l'importance de les détecter. Bien que nous n'ayons pas l'intention d'expliquer comment identifier les signaux d'ondes S, l'analyse qui suit devrait démontrer clairement qu'il est possible d'étudier scientifiquement, et de nombreuses façons, les signaux d'ondes S, en plus d'en vérifier la forme.

Cas 1

Le seuil et la fenêtre d'enregistrement sont les deux critères de base servant à la reconnaissance automatique des événements. Avec les systèmes MP250, on considère qu'un événement a eu lieu si le système a détecté au moins le nombre spécifié de signaux dont la tension dépasse le seuil, en un temps donné. Ce mécanisme de reconnaissance des événements indique qu'un signal d'ondes S a été capté si sa tension est au-dessus du seuil et si le signal d'ondes P précédent y est inférieur. On peut voir clairement ce phénomène à la figure (1), qui présente les signaux associés à un événement microsismique.

Figure (1) Exemple de signaux associés à un événement microsismique



(D'après Talebi et Young, 1989)

On voit sur cette figure que l'amplitude des ondes S est beaucoup plus grande que celle des ondes P sur six des dix canaux. Si on choisit le seuil comme étant égal à l'amplitude de l'onde P détectée sur le premier canal, ces six canaux (1, 2, 4, 8, 9, 10) seraient probablement activés par les ondes S, plutôt que par les ondes P. Quoi qu'il en soit, le canal 4 serait toujours déclenché par l'arrivée de l'onde S, peu importe la valeur du seuil, car l'onde P n'est pas détectable. L'amplitude plus élevée des ondes S détectées par certains capteurs est attribuable à divers facteurs, comme le mécanisme de la source, le trajet suivi par l'onde, le contenu fréquentiel de l'onde, les caractéristiques d'atténuation du milieu, les caractéristiques du capteur ainsi que l'orientation relative de celui-ci (géophone ou accéléromètre uniaxial) par rapport à la direction du mouvement des particules.

Cas 2

Une des meilleures méthodes pour évaluer la fiabilité du modèle de vitesse basé sur les événements (l'état physique de chaque canal est déterminé selon la théorie de la différence des temps d'arrivée et l'analyse des valeurs résiduelles, qui sont décrites au chapitre 5 du rapport) est l'étude de la calibration, qui fournit l'erreur réelle de localisation pour chaque modèle de vitesse donné. Les exemples suivants démontrent que la reconnaissance des signaux d'ondes S peut jouer un rôle majeur dans la localisation précise d'un événement. Ils démontrent également que les canaux d'ondes S sont nécessaires dans de nombreux cas, particulièrement pour les événements de faible ampleur. L'élimination de ces canaux peut causer la défaillance du processus de localisation. L'événement en question était associé à un sautage enregistré à la mine Kidd Creek de la Falconbridge Limitée, le 19 avril 1991. L'information relative à cet événement est présentée aux tableaux (i) à (iv). Le tableau (i) contient les coordonnées des capteurs et les temps d'arrivée. Le tableau (ii) compare les différences observées entre les temps d'arrivée, ainsi que les limites théoriques connexes des différences entre les temps d'arrivée des ondes P (en italiques). Le tableau (iii) donne les principaux résultats de localisation, ainsi que la localisation réelle de l'événement. Les résiduelles des canaux sont données au tableau (iv). Pour la première solution, on suppose que les signaux captés étaient des ondes P : cet événement est localisé à quelque 290 m du lieu du sautage, ce qui démontre le caractère erroné de l'hypothèse.

Tableau (i) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 89

Capteur n°	**9**	**29**	**31**	**11**	**23**
X (m)	65 614	65 629	65 636	65 649	65 675
Y (m)	65 542	65 610	65 500	65 438	65 628
Z (m)	2 728	2 546	2 544	2 727	2 566
Temps d'arrivée (10 µs)	0	715	1 000	1 410	2 005

Tableau (ii) Différence entre les temps d'arrivée pour l'événement 89 (10 µs)

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1P	*0*	*3 897*	*3 800*	*2 194*	*3 865*
	0	715	1 000	1 410	2 005
2P	*3 897*	*0*	*2 204*	*5 009*	*1 065*
	715	0	285	695	1 290
3P	*3 800*	*2 204*	*0*	*3 873*	*2 712*
	1 000	285	0	410	1 005
4P	*2 194*	*5 009*	*3 873*	*0*	*5 007*
	1 410	695	410	0	595
5PS	*3 865*	***1 065***	*2 712*	*5 007*	*0*
	2 005	**1 290**	1 005	595	0

Nota : Les chiffres dans la première rangée et la première colonne représentent les numéros de canaux, en termes de séquence de déclenchement. Dans chaque cellule, le chiffre du haut est la limite théorique pour la différence entre les temps d'arrivée des ondes P, et le chiffre du bas est la différence observée entre les temps d'arrivée pour les deux canaux indiqués par les numéros de rangée et de colonne.

Tableau (iii) Résultats de la localisation de la source pour l'événement 89

Solution	**Modèle de vitesse**	**Coordonnées (m)**			**Résiduelle pour l'événement (10 µs)**	**Sensibilité (m)**	**Erreur**
		X	**Y**	**Z**			
Lieu du sautage		65 663	65 552	2 643			
1	PPPPP	65 374	65 553	2 664	428	30	290
2	PPPPS	65 647	65 573	2 656	58	13	29
3	PPPPD	65 476	65 568	2 656	0	70	187

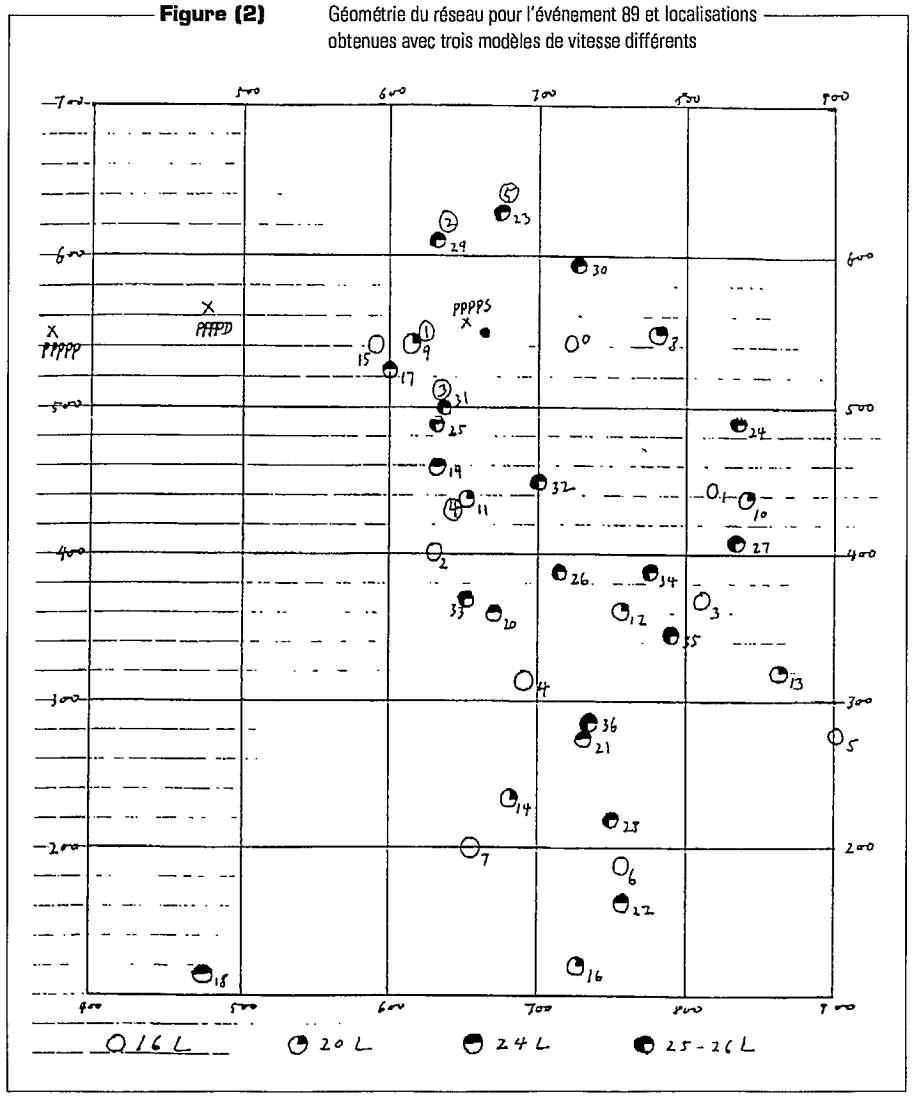
Pour la deuxième solution, on suppose que le canal 23 (le dernier canal associé à l'événement) est déclenché par l'arrivée d'une onde S. Cette hypothèse repose sur deux suppositions. Premièrement, on a déterminé que ce canal pouvait être celui d'une onde S, car la différence observée entre les temps d'arrivée par rapport au deuxième canal de l'événement (1 290) dépasse la limite théorique (1 065) (tableau (ii)). Deuxièmement, ce canal présente la plus grande résiduelle pour la première solution (tableau (iv)), ce qui indique une onde S, selon la théorie de l'analyse des résiduelles. D'après cette hypothèse, l'événement a été localisé à 29 m du lieu du sautage, ce qui, du point de vue pratique, semble très raisonnable. On doit également faire remarquer que cette solution présente une très faible résiduelle, soit 0,58 ms.

Pour la troisième solution, on a omis le cinquième canal, et l'événement a été localisé à quelque 187 m du lieu du tir. Cette solution inexacte s'explique par la géométrie inadéquate du réseau. Dans le réseau d'origine, les cinq capteurs forment une courbe présentant un rayon relativement faible dans le plan X-Y, et le lieu du sautage se trouve du côté concave de la courbe, comme l'illustre la figure (2). D'un point de vue théorique, on peut localiser l'événement sans grandes difficultés. Toutefois, les capteurs restants se trouvent presque sur un plan vertical, si on ne tient pas compte du dernier canal. L'écart-type pour le plan présentant le meilleur ajustement est de seulement 14 m, la normale du plan étant dans la direction X (les cosinus directeurs du plan sont de 0,97, 0,21 et 0,09, respectivement). Cette géométrie de réseau rend extrêmement difficile tout contrôle de l'exactitude dans la direction X. On peut voir clairement cette situation d'après l'analyse de sensibilité, qui indique que la sensibilité (en mètres) dans les directions X, Y et Z est de 70, 0 et -1 m, respectivement. L'erreur réelle de localisation (en mètres) dans ces directions est de 187, 16 et 13 m, respectivement.

Tableau (iv) Résiduelle des canaux pour l'événement 89 (10 µs)

Capteur n°	9	29	31	11	23
Solution 1	-163	-211	-54	121	307
Solution 2	-22	38	-25	24	-14
Solution 3	0	0	0	0	0

Figure (2) Géométrie du réseau pour l'événement 89 et localisations obtenues avec trois modèles de vitesse différents



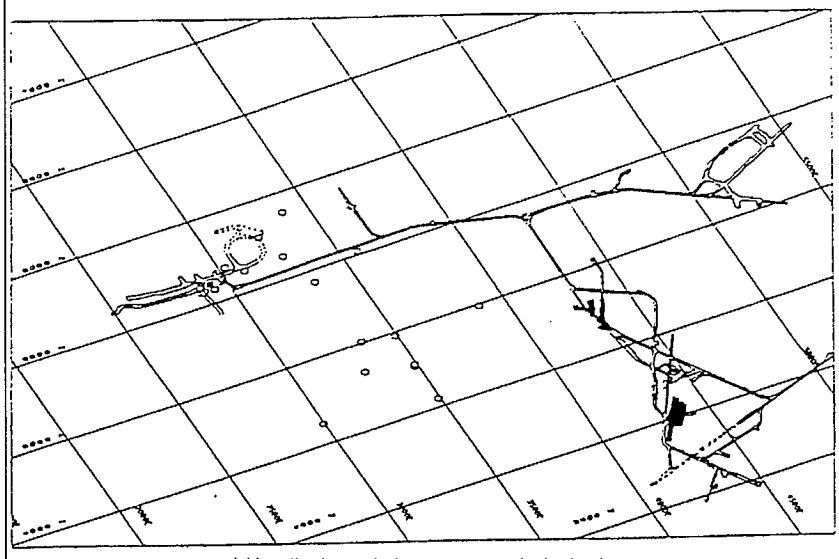
Cas 3

Nous avons clairement démontré dans le cas 2 ci-dessus l'existence des signaux ayant pour origine des ondes S et leur incidence sur la solution de localisation d'un événement. Bien que ce cas lui-même soit une étude de calibration détaillée pour un seul événement, il ne représente pas un phénomène inhabituel. Selon les études réalisées par l'auteur dans plusieurs mines, les signaux d'ondes S représentent environ 40 % des signaux détectés. La capacité de détecter les signaux d'ondes S est donc cruciale pour obtenir une représentation utile de la sismicité. Dans le cas présent, nous

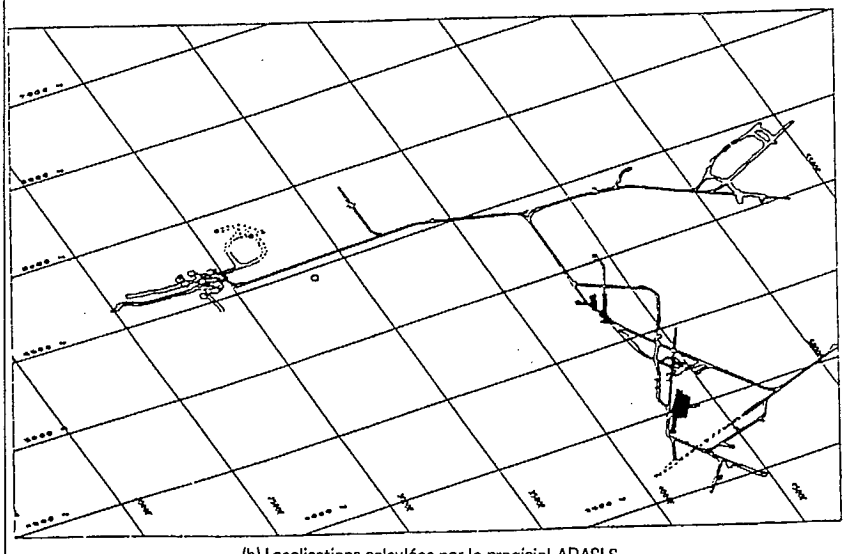
démontrerons de nouveau l'existence des signaux d'ondes S dans une étude de calibration portant sur un groupe de coups de toit. Nous démontrerons en particulier que les méthodes classiques, qui reposent sur l'hypothèse que tous les signaux captés représentent des ondes P, peuvent donner une représentation erronée de la sismicité d'un lieu.

Le coup de toit RB1097 s'est produit à la mine Creighton le 17 février 1992. Son emplacement réel, dans le système local de coordonnées (en pieds), était de 2 907, 5 615 et 5 252. Le tableau (v) contient les emplacements de ce coup de toit déterminés par la méthode ADASLS et par une méthode classique utilisée par la mine. La méthode classique considère que tous les temps d'arrivée sont des ondes P. Ces données comprennent également les emplacements de 20 répliques sismiques. La séquence numérique de ces événements, tels qu'ils apparaissent dans le fichier de données original (RBDADA), est indiquée dans la première colonne, le n° 36 représentant l'événement principal. Les lettres dans la deuxième colonne représentent le rang de la solution, d'après le progiciel ADASLS. Le nombre de canaux reliés à chaque événement est indiqué dans la troisième colonne. Les modèles de vitesse associés, utilisés par le progiciel ADASLS, sont indiqués dans la quatrième colonne, où P, S et D représentent les ondes P, les ondes S et les canaux omis, respectivement. Les localisations précises déterminées par le progiciel ADASLS sont indiquées dans les trois colonnes suivantes. Les solutions calculées par la mine sont indiquées dans les trois dernières colonnes. Enfin, la localisation réelle de l'événement principal est indiquée directement au-dessus de l'événement principal (n° 36).

Figure (3) Comparaison des localisations du coup de toit RB1079 et de ses répliques sismiques, obtenues par une méthode classique et par le progiciel ADASLS. (La localisation réelle du coup de toit RB1079 est indiquée par le cercle en continu. Les cercles ouverts correspondent aux localisations calculées.)



(a) Localisations calculées par une méthode classique



(b) Localisations calculées par le progiciel ADASLS

En comparant les coordonnées fournies par l'ADASLS avec celles de la mine, il saute aux yeux que ces dernières comportent des erreurs importantes. L'erreur type est d'environ 500 pieds en direction X, et de quelque 1 000 pieds en direction Y. De plus, pour 9 des 21 événements, l'emplacement est non plus dans l'éponte supérieure, mais dans l'éponte inférieure. Par contre, les solutions données par le progiciel ADASLS sont beaucoup plus fiables, une seule présentant une erreur de plus de 500 pieds. Afin de faciliter la comparaison des coordonnées, les principales erreurs sont indiquées en caractères gras. La figure (3) indique la localisation des événements déterminés au moyen du progiciel ADASLS et de la méthode classique.

Le tableau (v) présente un fait très intéressant : les piètres solutions données par la méthode classique sont toujours associées aux événements pour lesquels il y a plusieurs canaux d'ondes S, ce qui explique l'échec de la méthode classique. Dans cette mine, les données fournies par le réseau dense et le réseau installé à la grandeur de la mine, qui sont les deux principaux systèmes microsismiques utilisés à cet endroit, démontrent que la méthode classique a tendance, en raison de l'hypothèse sur l'arrivée des ondes P, à localiser dans l'éponte inférieure les événements qui ont lieu dans l'éponte supérieure. L'utilisation du progiciel ADASLS élimine ce problème.

Cas 4

Une manière positive d'étudier un signal d'ondes S consiste à tester sa cohérence avec les autres signaux captés. Si un événement comporte de nombreux canaux, on peut tester un canal d'ondes S si la localisation, avec et sans ce canal, donne des résultats identiques.

Le 9 novembre 1991, un événement d'ampleur relativement élevée, portant le numéro 145, a été enregistré à la mine Creighton. Cet événement porte le numéro séquentiel 175 dans le registre quotidien de la mine. La période de déclenchement pour cet événement enregistré sur 16 canaux est très courte, environ 38,85 ms, ce qui indique habituellement des temps fiables. Les tableaux (vi) à (viii) présentent les données sur la localisation de la source.

Selon la théorie de l'analyse de la différence entre les temps d'arrivée, dont nous avons traité au chapitre 5, le canal 59 (le 13e canal déclenché) n'a pas été activé par l'arrivée d'ondes P. Les différences observées entre les temps d'arrivée pour les deux premiers canaux (30,30 ms et 27,05 ms) sont beaucoup plus élevées que les limites théoriques correspondant aux différences entre les temps d'arrivée des ondes P (22,92 ms et 12,17 ms). Le canal 59 représente donc soit une valeur aberrante, soit un canal d'ondes S. Toutefois, il est plus probable

Tableau (v) Comparaison de la localisation de la source selon le progiciel ADASLS et une méthode classique pour le coup de toit RB1097 et ses répliques sismiques

N° de l'événement	Rang	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS			Mine		
				x	y	z	x	y	z
			Localisation réelle	2 907	5 615	5 253	2 907	5 615	5 252
36	A	16	PPPPPPPPPPPPPPP	2 886	5 635	5 293	2 879	5 624	5 307
37	C	8	PSSSPSSS	2 929	5 650	5 273	**3 319**	**5 426**	5 250
38	A	16	PPPPPPPDPPPDPPPD	2 884	5 632	5 309	2 868	5 608	5 309
39	A	11	PSSPSPSSPDS	2 928	5 566	5 320	**3 469**	**4 759**	5 318
40	B	13	PSSSPPPSPSDSS	2 920	5 604	5 297	**3 476**	**4 771**	5 330
41	B	13	PPPPSSPPSPSDS	2 854	5 550	5 417	**3 475**	**4 532**	5 318
46	A	16	PPPSPPPPSSPSPPSS	2 869	5 700	5 287	3 081	5 624	5 337
48	C	11	DPPPSPSPPPP	**3 325**	**5 441**	**5 439**	**3 270**	**4 822**	**5 629**
49	A	13	PSSSPPPSPSSDS	2 945	5 649	5 299	**3 264**	5 630	5 428
50	A	16	PPPPPPPPDPPPPPPP	2 819	5 652	5 399	2 875	5 584	5 376
52	B	11	PPSSPPSPDSS	2 978	5 614	5 304	**3 338**	**5 003**	5 172
53	A	16	PPPPPPPPPSPSPSPS	2 880	5 570	5 314	2 859	5 577	5 322
54	A	9	PPSSPSPSD	2 943	5 672	5 279	**3 379**	**5 880**	**5 027**
55	C	16	PPPPPPPPPPPPPPP	2 975	5 626	5 278	3 015	5 679	5 236
56	A	7	PSPSPSS	2 965	5 625	5 283	**3 222**	5 784	5 288
57	A	12	PPPSSPSDSPDS	2 941	5 578	5 299	**3 560**	5 519	**5 632**
58	B	7	PPSSPSPDS	2 869	5 624	5 303	**3 875**	**4 985**	5 268
59	B	16	PPPPPPPPPPPPPPP	2 935	5 595	5 284	2 920	5 577	5 306
60	B	13	PPPSSPPSPPSSS	2 910	5 560	5 352	2 976	**4 605**	5 276
61	A	13	PPPPSSPSPDSSD	2 808	5 687	5 361	**3 478**	**4 972**	5 267
62	C	16	PPPPPPPPPDPPPPP	2 909	5 660	5 324	2 976	5 623	5 284

que ce canal ait été déclenché par l'arrivée d'une onde S, car on ne retrouve aucun des signes habituellement associés aux valeurs aberrantes. Rien n'indique, d'après la théorie de la différence des temps d'arrivée, qu'un autre canal ait été déclenché par l'arrivée d'ondes S.

Dans la première solution, on a exclu des calculs les données obtenues sur le canal 59 et on a supposé que tous les autres canaux représentaient des signaux d'ondes P. La résiduelle pour cette solution était extrêmement faible, soit seulement 1,27 ms.

Tableau (vi) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 175

N° du capteur	31	22	8	21	62	48	18	30	23	50	63	61	59	1	26	16
x (pi)	4 577	4 655	4 578	4 603	4 687	4 549	4 846	4 582	4 784	3 920	4 078	3 920	4 791	4 541	3 938	4 499
y (pi)	5 386	5 441	5 266	4 961	5 452	5 937	5 847	5 720	5 884	5 786	5 836	5 637	5 446	6 069	5 909	6 107
z (pi)	5 972	6 171	5 768	6 168	5 774	5 972	6 371	5 574	6 172	5 973	5 776	5 771	6 373	5 974	6 171	6 371
Temps d'arrivée (10 µs)	5	330	980	370	1 225	2 405	2 410	2 430	2 725	2 885	2 840	2 845	3 035	3 120	3 305	3 885

Tableau (vii) Résultats de la localisation de la source pour l'événement 175

Solution	Modèle de vitesse	Coordonnées (pi)			Résiduelle pour l'événement (10 µs)	Sensibilité (pi)
		x	y	z		
1	PPPPPPPPPPPPDPPP	4 471	5 279	6 061	127	33
2	PPPPPPPPPPPPSPPP	4 471	5 279	6 061	121	30
3	PPPPPPPPPPPPPPPP	4 439	5 293	6 004	383	30

Tableau (viii) Résiduelles des canaux pour les solutions de l'événement 175

N° du capteur	31	22	8	21	62	48	18	30	23	50	63	61	59	1	26	16
Solution 1	-34	-174	48	-2	65	-101	-48	-68	112	-102	-22	83	0	-32	-24	300
Solution 2	-33	-173	49	-1	65	-101	-48	-68	113	-103	-22	83	0	-32	-24	299
Solution 3	-137	-518	106	-353	60	-160	-240	20	-93	-45	89	222	1 077	-91	-49	114

La sensibilité était de 33 pi, ce qui indique une solution stable. Par conséquent, il était raisonnable de conclure que l'hypothèse des signaux d'ondes P était exacte pour tous les canaux, sauf le canal 59.

Dans la deuxième solution, on a testé le 13e canal afin de déterminer s'il avait été déclenché par l'arrivée d'une onde S. Notre hypothèse était que nous n'avions aucune raison de rejeter le déclenchement probable du canal 59 par une onde S si la deuxième solution donnait un résultat identique au premier. Les résultats des deux solutions sont remarquablement similaires. Pour cet événement, les deux solutions donnaient des localisations ayant les mêmes coordonnées. En outre, même les résiduelles des canaux pour ces deux solutions étaient similaires à 0,01 ms près (c.-à-d., la différence des résiduelles pour tous les canaux était inférieure à 0,01 ms). Du point de vue de la localisation, la similitude des résiduelles de canaux peut être attribuable seulement au fait que le signal d'ondes S capté sur le canal 59 était très compatible avec les signaux d'ondes P captés par les autres canaux.

La troisième solution, pour laquelle nous avons supposé que tous les canaux correspondaient à des signaux d'ondes P, est présentée aux fins de comparaison. Cette solution présente une résiduelle relativement importante, comme prévu, et il y a lieu de noter qu'une partie importante de résiduelles sont transférées du canal 59 à deux canaux qui avaient été déclenchés plus tôt, soit les canaux 22 et 21.

Cas 5

Ce cas vise à démontrer l'existence des signaux d'ondes S de trois points de vue différents : nous démontrons que la solution qui reconnaît l'arrivée des ondes S est plus exacte; nous démontrons de plus que les signaux indiquant l'arrivée des ondes S sont compatibles avec les ondes P captées sur les autres canaux; enfin, nous présentons des preuves tangibles des temps d'arrivée d'une onde P sur le canal d'ondes S.

L'événement étudié s'est produit à la mine Creighton le 14 avril 1992. Il s'agit d'un événement associé à un sautage qui a été enregistré deux secondes après l'événement principal. L'emplacement du sautage, d'après le système local de coordonnées de la mine (en pieds), était le suivant : 4 600, 6 100 et 6 300. Les tableaux (ix) à (xiii) contiennent les renseignements appropriés sur l'événement.

D'après la théorie de l'analyse de la différence entre les temps d'arrivée, le dernier canal n'a pas été déclenché par l'arrivée d'une onde P. Nous avons constaté que les différences observées entre les temps d'arrivée étaient de beaucoup supérieures aux limites théoriques correspondantes pour les cinq canaux associés (tableau (x)), la différence la plus importante étant d'environ 16 ms.

Il y a trois façons possibles de traiter le dernier canal :

- l'exclure des calculs;
- l'utiliser comme canal d'ondes S;
- l'utiliser comme canal d'ondes P.

Dans tous les cas, nous avons fait l'hypothèse que les autres canaux représentaient l'arrivée d'une onde P. Les solutions correspondantes, pour ces modèles de vitesse basés sur les événements, ont été numérotées à la suite (1, 2 et 3) dans les tableaux (xi) et (xii).

Par rapport à la localisation réelle du sautage, les deux premières solutions apparaissent plus raisonnables. En effet, elles donnent des résultats qui se trouvent à 28 et 27 pieds du lieu du sautage, alors que la troisième solution donne une localisation se trouvant à 49 pieds du lieu réel, cette solution reposant sur l'hypothèse que tous les canaux correspondaient à des ondes P. La résiduelle de la troisième solution est beaucoup plus importante que celle des deux premières. De plus, nous constatons que les résiduelles des canaux correspondant à la deuxième et à la première solutions sont très similaires, ce qui démontre de façon très probante la compatibilité du signal d'ondes S avec tous les autres signaux d'ondes P. Le temps d'arrivée des ondes P, pour le dernier canal, peut être calculé à partir de l'événement principal (événement 200), qui s'est produit deux secondes plus tôt. L'événement principal et celui dont nous traitons ici présentent des temps d'arrivée très similaires, ce qui démontre que le temps d'arrivée de l'onde P sur le dernier canal (canal 24) devrait être d'environ 22 ms, comme l'indique le tableau (xiii).

Tableau (ix) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 201

N° du capteur	9	10	34	13	3	16	2	14	18	20	23	6	47	48	19	24
x (pi)	4 581	4 436	4 436	4 472	4 634	4 499	4 952	4 302	4 346	4 088	4 784	4 857	4 668	4 549	5 300	4 488
y (pi)	6 143	6 036	6 128	5 951	6 409	6 107	6 312	5 895	5 847	6 039	5 884	5 519	6 549	5 937	6 125	6 012
z (pi)	6 783	6 783	6 560	6 992	6 568	6 371	6 568	7 020	6 371	6 782	6 172	6 779	7 178	5 972	5 357	6 170
Temps d'arrivée (10 µs)	5	545	845	1 220	1 335	1 520	1 865	1 945	2 150	2 520	2 530	2 780	2 820	3 125	3 480	4 260

Tableau (x) Comparaison des techniques OAD et TLP pour plusieurs canaux associés au canal 24*

Canal associé	9	10	34	16	18
TLP (10 µs)	3 166	3 078	2 050	1 112	1 481
DAD (10 µs)	4 255	3 715	3 415	2 740	2 110

**TLP : limite théorique de la différence entre les temps d'arrivée des ondes P*
OAD : différence observée entre les temps d'arrivée

Tableau (xi) Résultats de la localisation de la source pour l'événement 201

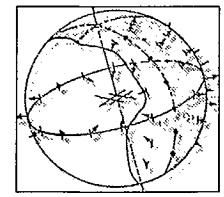
Solution (pi)	**Modèle de vitesse**	**Coordonnées (pi)**			**Résiduelle de l'événement (10 µs)**	**Sensibilité**	**Erreur (pi)**
		X	**Y**	**Z**			
	Endroit du tir	4 600	6 100	6 300			
1	PPPPPPPPPPPPPPD	4 620	6 086	6 716	135	23	28
2	PPPPPPPPPPPPPPS	4 620	6 087	6 718	130	25	27
3	PPPPPPPPPPPPPPP	4 635	6 093	6 763	501	25	49

Tableau (xii) Résiduelles des canaux pour les solutions de l'événement 201 (10 µs)

N° du capteur	31	22	8	21	62	48	18	30	23	50	63	61	59	1	26	16
Solution 1	-64	-59	26	-77	-30	95	137	-46	47	235	-78	97	-45	-279	41	0
Solution 2	-57	-58	19	-71	-34	84	133	-42	38	235	-89	95	-38	-291	35	39
Solution 3	-13	-132	-225	8	-159	-194	68	-16	-216	132	-329	64	96	-567	-561	540

Tableau (xiii) Comparaison des temps d'arrivée entre l'événement 200 et l'événement 201

N° du capteur	**Temps d'arrivée (10 µs)**	
	Événement 200	**Événement 201**
9	5	5
10	550	545
34	770	845
13	1 215	1 220
5	1 320	1 335
11	1 325	1 520
2	1 600	1 865
14	1 940	1 945
18	2 075	2 150
24	**2 215**	–
20	2 295	2 520
23	2 360	2 530
6	2 695	2 780
47	2 750	2 820
48	3 045	3 125
1	3 075	–
19	–	3 480
24	–	4 260



Valeurs aberrantes : Études de cas

Les valeurs aberrantes correspondent aux canaux qui ne sont pas attribués à des sources physiques qui déclenchent la majorité des canaux pendant la fenêtre temporelle associée à un événement. Dans un environnement minier, les principales sources des valeurs aberrantes sont les perturbations associées aux événements sismiques et les autres bruits, comme ceux qui sont causés par les sautages, le forage, les machines d'extraction et les ventilateurs de mine.

Selon les études réalisées dans plusieurs mines du Canada et des États-Unis, les valeurs aberrantes représentent environ 10 % du nombre total de canaux. Comme la présence d'un tel canal, lors d'un événement, ruine en général complètement la solution de localisation de la source, il est donc crucial de détecter les valeurs aberrantes afin d'accroître l'efficacité de la détection automatique des événements microsismiques.

Dans cette annexe, nous présentons un certain nombre de valeurs aberrantes types, ainsi que leurs conséquences sur la localisation de la source.

Cas 1

De nombreux événements de faible amplitude, tels qu'enregistrés par les systèmes MP250, ne sont pas réels, car chacun d'eux est déclenché par plusieurs sources physiques, et le nombre de canaux déclenchés par une source unique n'est pas suffisant pour obtenir une solution analytique. Comme ces événements qui ne peuvent servir à localiser la source représentent au moins 20 % du total des événements enregistrés, d'après des études réalisées dans plusieurs mines de l'Ontario, il importe de les détecter afin de pouvoir utiliser de façon efficace les données fournies par les systèmes MP250. Autrement, ces événements peuvent avoir un effet fort nuisible sur le calcul de la localisation de la source.

Le tableau (i) présente un exemple type d'un tel événement. Cet événement a été enregistré par le réseau installé dans l'ensemble de la mine Creighton le 13 avril 1992. On constate dans ce tableau qu'il y a un décalage temporel très important, soit 71 ms, entre le capteur 63 et le capteur 50. Une différence de temps importante entre deux capteurs très rapprochés signifie que la source est éloignée. Dans ce cas-ci, la source serait bien au-delà de l'éponte inférieure dans le massif rocheux. Cette situation n'est pas réaliste. Qui plus est, on constate que les coordonnées du capteur 49 (le premier canal déclenché) sont très différentes des autres. Les distances entre ce capteur et les autres, indiquées dans le tableau (ii), sont d'environ 2 000 pieds. Enfin, le capteur 49 se trouve dans un gisement de minerai isolé, et le mode de déclenchement indiqué par cet « événement » est pratiquement impossible. Si un événement avait eu lieu à cet endroit et avait été d'une ampleur suffisante pour activer des capteurs très éloignés, d'autres capteurs se trouvant dans cette même zone auraient également été déclenchés en même temps.

Tableau (i) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 24

N° du capteur	49	61	63	50	36
x (pi)	2 494	3 920	4 078	3 920	4 411
y (pi)	5 149	5 637	5 836	5 786	4 833
z (pi)	4 768	5 771	5 776	5 973	5 176
Temps d'arrivée (µs)	5	740	1 590	8 735	9 160

Tableau (ii) Distances entre le capteur 49 et les autres pour l'événement 24

N° du capteur	61	63	50	36
Distance (pi)	1 810	1 999	1 973	1 985

D'après l'analyse qui précède, nous pouvons conclure qu'au moins trois sources physiques peuvent expliquer cet « événement ». Le canal 49 était associé au premier; les canaux 61 et 63 au deuxième, et les canaux 50 et 36 au troisième.

Cas 2

Les valeurs aberrantes apparaissent lors d'événements de grande importance de même que lors d'événements de faible ampleur. Elles sont dangereuses en raison de leur extraordinaire effet nuisible sur les solutions de localisation des sources. Il suffit parfois d'une seule valeur aberrante pour ruiner la solution finale, peu importe l'ampleur de l'événement.

Le 29 avril 1991, quatre événements enregistrés sur 12 canaux, causés par un sautage à proximité, ont été enregistrés à la mine Kidd Creek pendant une période de six secondes. Il s'agissait tous d'événements majeurs, caractérisés par des temps de déclenchement très courts, environ 20 ms, si l'on ignore l'effet des valeurs aberrantes. Les données originales pour ces quatre événements sont présentées aux tableaux (iii) à (vi).

De ces quatre événements, trois sont contaminés par des valeurs aberrantes. Pour l'événement 39, le canal 15, le premier qui a été déclenché, correspond à une valeur aberrante caractérisée par un décalage temporel très important (68 ms) par rapport à au capteur suivant. Pour cette même raison, pour l'événement 40, le canal 30 correspond à une valeur aberrante. Pour l'événement 41, le canal 52 correspond à une valeur aberrante, ce qui est expliqué au tableau (vii), dans lequel on compare les modes de déclenchement pour les quatre événements. On constate sans difficulté que les quatre événements présentent des temps d'arrivée très similaires, ce qui indique que leur origine provient d'un volume très restreint. D'après les modes de déclenchement des événements 39 et 40, le canal 52 devrait correspondre à l'un des canaux déclenchés parmi les premiers, au lieu d'être le dernier.

Les résultats de la localisation sont résumés au tableau (viii). La première colonne indique les numéros séquentiels de ces événements dans le fichier de données original. Les modèles de vitesse utilisés par le programme ADASLS sont indiqués dans la deuxième colonne, où P et D représentent les ondes P et les canaux omis, respectivement. Les localisations déterminées par le programme ADASLS sont indiquées dans les trois colonnes suivantes, et celles qui ont été déterminées par une méthode classique le sont dans les trois dernières colonnes. Le programme ADASLS donne des résultats très cohérents pour ce qui est des localisations. Elles se trouvent à l'intérieur d'un bloc de 19 x 24 x 12 pi. Par contre, les solutions obtenues avec la méthode classique, qui ignorent l'existence des valeurs aberrantes, n'ont aucun sens. La valeur 99 999 indique que la coordonnée calculée a au moins six chiffres, ce qui indique manifestement une solution erronée.

Tableau (iii) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 39

N° du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps d'arrivée (10 µs)
15	65 588	65 545	2 850	0
52	65 709	65 572	2 102	6 820
57	65 692	65 559	2 038	7 325
49	65 714	65 555	2 140	7 555
59	65 648	65 654	1 964	7 620
47	65 604	65 635	2 142	7 940
50	65 584	65 629	2 102	7 960
45	65 706	65 559	2 197	8 125
53	65 639	65 533	2 099	8 130
60	65 724	65 555	1 964	8 380
43	65 639	65 555	2 196	8 715
44	65 596	65 607	2 197	8 810

Tableau (iv) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 40

N° du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps d'arrivée (10 µs)
30	65 726	65 597	2 542	0
52	65 709	65 572	2 102	6 055
57	65 692	65 559	2 038	6 130
47	65 604	65 635	2 142	6 380
59	65 684	65 654	1 964	6 445
50	65 584	65 629	2 102	6 790
53	65 639	65 533	2 099	6 885
60	65 724	65 555	1 964	6 920
45	65 706	65 559	2 197	7 245
44	65 596	65 607	2 197	7 390
40	65 628	65 559	2 276	8 030
41	65 662	65 581	2 271	8 185

Tableau (v) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 41

N° du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps d'arrivée (10 µs)
57	65 692	65 559	2 038	0
59	65 684	65 654	1 964	185
47	65 604	65 635	2 142	245
50	65 584	65 629	2 102	495
53	65 639	65 533	2 099	590
60	65 724	65 555	1 964	1 070
43	65 639	65 555	2 196	1 210
44	65 596	65 607	2 197	1 245
41	65 662	65 581	2 271	1 570
40	65 628	65 559	2 276	1 970
39	65 608	65 615	2 272	2 165
52	65 709	65 572	2 102	3 250

Tableau (vi) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 43

N° du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps d'arrivée (10 µs)
49	65 714	65 555	2 140	0
59	65 684	65 654	1 964	15
57	65 692	65 559	2 038	170
47	65 604	65 635	2 142	400
50	65 584	65 629	2 102	430
53	65 639	65 533	2 099	560
45	65 706	65 559	2 197	565
60	65 724	65 555	1 964	725
43	65 639	65 555	2 196	1 020
44	65 596	65 607	2 197	1 195
41	65 662	65 581	2 271	1 655
40	65 628	65 559	2 276	2 110

Tableau (vii) Comparaison des modes de déclenchement

N° de l'événement	Numéros des canaux (dans la séquence de déclenchement)*												
39	**15**	52	57	49	59	47	50	45	53	60	43	44	–
40	**30**	52	57	47	59	50	53	60	45	44	40	41	–
41	–	57	59	47	50	53	60	43	44	41	40	39	**52**
43	–	49	59	57	47	50	53	45	60	43	44	41	40

**Les chiffres en caractères gras représentent les valeurs aberrantes déterminées.*

Tableau (viii) Comparaison des localisations obtenues au moyen du progiciel ADASLS et d'une méthode classique, selon l'hypothèse que tous les signaux correspondent à des ondes P

N° de l'événement	Modèle de vitesse de l'événement donné par ADASLS	Localisation obtenue par ADASLS (m)			Localisation obtenue par une méthode classique (m)		
		X	Y	Z	X	Y	Z
39	DPPPPPPPPPPP	65 720	65 651	2 080	99 999	99 999	99 999
40	DPPPPPPPPPPP	65 717	65 669	2 084	99 999	99 999	99 999
41	PPPPPPPPPPPD	65 727	65 663	2 092	–	29 421	-70 801
43	PPPPPPPPPPP	65 736	65 675	2 088	65 736	65 675	2 088

Cas 3

Une des causes importantes des valeurs aberrantes est l'interférence produite par les événements sismiques eux-mêmes. Dans le présent cas, nous démontrons ce phénomène en montrant qu'un événement défini par un système MP250 est le résultat de la fusion de deux événements.

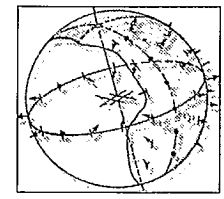
Le tableau (ix) présente les données au sujet de l'événement 94 qui s'est produit le 19 avril 1991 à la mine Kidd Creek. Il est manifeste, d'après ce tableau, que les capteurs qui ont été déclenchés dans la fenêtre temporelle correspondant à l'événement 94 se trouvent dans deux groupes distincts, pour ce qui est de leur localisation générale. Les capteurs 8, 23, 30, 11 et 10 sont situés dans les niveaux supérieurs de la mine, et le reste dans les profondeurs de celle-ci. Ce mode de déclenchement est impossible pour une source physique unique, compte tenu également de l'aménagement de la mine et de la disposition des capteurs.

Ces deux groupes de capteurs sont en fait associés à deux sautages différents. L'événement 94A (correspondant aux capteurs 8, 23, 30, 11 et 10) a été causé par un sautage qui s'est produit 25 secondes plus tôt. Le principal événement associé à ce sautage a eu la séquence de déclenchement **8**, **30**, **23**, 31, 29, **10**, 25, 19, 26, 9, **11**, 0, ce qui est très similaire à la séquence de l'événement 94A. Les localisations associées à l'événement principal et à l'événement 94A sont (663, 552, 2 643) et (713, 633, 2 697), respectivement. Il semble que la solution de l'événement 94 comporte une grave erreur.

L'événement 94B (capteurs 52, 57, 47, 50, 49, 53) a été causé par un autre sautage qui a eu lieu six secondes auparavant. La séquence de déclenchement pour l'événement principal est **52**, **47**, **57**, 43, **50**, **49**, 59, 23 et 29. Pour ces deux événements, les localisations sont (694, 654, 2 108) et (718, 660, 2 076), respectivement, soit une différence de seulement 40 m., ce qui est très rapproché.

Tableau (ix) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 94

N° du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps d'arrivée (10 µs)
8	**65 779**	**65 550**	**2 722**	0
23	**65 675**	**65 628**	**2 566**	160
52	65 709	65 572	2 102	330
57	65 692	65 559	2 038	810
30	**65 726**	**65 597**	**2 542**	915
47	65 604	65 635	2 142	1 070
50	65 584	65 629	2 102	1 625
11	**65 649**	**65 438**	**2 727**	1 835
10	**65 840**	**65 438**	**2 720**	2 010
49	65 714	65 555	2 140	2 965
53	65 639	65 533	2 099	3 650



PARTIE A – Études de cas relatives à la méthode hybride de localisation de la source

et

PARTIE B – Statistiques relatives à la précision de la localisation de la source

PARTIE A Études de cas : Méthode hybride de localisation de la source

La présente annexe comporte deux parties. La partie A porte sur des études de cas relatives à la méthode hybride de localisation de la source et la partie B présente des tableaux relatifs à la localisation de la source sismique obtenue à l'aide de l'ADASLS et d'une méthode classique.

La méthode hybride utilise les algorithmes Simplex et USBM et évalue la fiabilité des solutions obtenues à l'aide de ces méthodes d'après l'analyse de données brutes relatives aux événements et l'information contenue dans les solutions.

Un aspect important de la méthode hybride est la résiduelle principale qui nous renseigne sur le degré de concordance entre les temps d'arrivée observés pour les premiers canaux et les temps d'arrivée calculés pour ces canaux. L'importance accordée aux résiduelles associées aux premiers canaux est fondée sur le principe que les erreurs liées aux temps d'arrivée ne sont pas distribuées au hasard. De façon générale, les canaux déclenchés plus tôt devraient comporter les erreurs les plus faibles, ce qui est aisément compréhensible d'un point de vue pratique. La distance est ici l'élément clé. Les capteurs déclenchés plus tôt se trouvent plus près de la source, ce qui réduit beaucoup les incertitudes liées au modèle de vitesse. Une distance plus courte signifie également un plus grand niveau d'énergie et ainsi, une arrivée d'ondes plus distincte, ce qui réduit le risque d'erreurs temporelles. L'étude de calibration indique que les solutions qui comportent des résiduelles principales plus petites sont plus fiables. Dans la présente annexe, deux cas sont présentés pour démontrer le principe de la méthode hybride.

Cas 1

L'événement précisé dans le tableau (i) a été généré par un sautage de développement à la mine Kidd Creek enregistré le 7 mai 1991 (127e jour julien). Tous les canaux ont été déclenchés par des ondes P d'après l'analyse des différences entre les temps d'arrivée. Les solutions Simplex et du USBM ainsi que la localisation du site du sautage figurent au tableau (ii). Bien que la résiduelle de l'événement pour la solution du USBM soit quelque peu supérieure à celle de la solution Simplex, l'erreur réelle de localisation pour la solution du USBM est beaucoup plus faible, soit d'environ 35 m. Par contre, l'erreur de localisation pour la solution Simplex est de 129 m. Si nous examinons attentivement la distribution des résiduelles de canal au tableau (iii), il apparaît clairement que l'algorithme du USBM donne une meilleure solution dans ce cas; les résiduelles plus petites sont associées aux canaux déclenchés plus tôt alors que les résiduelles plus grandes sont associées aux canaux déclenchés plus tard. D'après la discussion précédente, nous comprenons que ce modèle est fort souhaitable du point de vue pratique. À titre de comparaison, les résiduelles de canal pour la solution Simplex suivent un modèle opposé où les grandes résiduelles sont associées aux premiers canaux.

Tableau (i) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée de l'événement 72

N° du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)	Temps d'arrivée (10 µs)
41	65 662	65 581	2 271	0
40	65 628	65 559	2 276	75
43	65 539	65 555	2 196	135
44	65 696	65 607	2 197	260
39	65 608	65 615	2 272	285
48	65 655	65 530	2 146	760
47	65 604	65 635	2 142	1 035
45	65 706	65 559	2 197	1 245
50	65 584	65 629	2 102	1 545
49	65 714	65 555	2 140	1 985

Tableau (ii) Résultat de la localisation de la source pour l'événement 72

Algorithme	Modèle de vitesse*	Coordonnées (m)**			Résiduelle de l'événement (10 µs)	Résiduelle principale (10 µs)	Erreur (m)
		X	Y	Z			
	(Lieu du sautage)	65 658	65 608	2 221			
Simplex	PPPPPPPPPPP	65 559(99)	65 527(81)	2 241(10)	269	343	129
USBM	PPPPPPPPPPP	65 635(23)	65 585(23)	2 235(14)	293	58	35

* *P représente les canaux d'ondes P*
** *Les nombres entre parenthèses représentent les erreurs*

Tableau (iii) Résiduelles de canal pour l'événement 72

N° du capteur	41	40	43	44	39	48	47	45	50	49
Simplex (10 µs)	-509	292	103	179	71	-61	-143	-1	-57	127
USBM (10 µs)	50	36	80	8	126	-436	-238	499	-510	383

Cas 2

L'événement dont il est question ici est une réplique sismique du coup de toit RB1097 survenu à la mine Creighton le 17 février 1992. Les données relatives à la localisation pour cet événement figurent aux tableaux (iv) à (vi) dans des formats très semblables à ceux dont il a été fait mention dans le cas 1.

La durée de l'événement a d'abord été remarquée comme étant plutôt longue, soit d'environ 100 ms. L'expérience nous indique que la durée d'un événement est habituellement inférieure à 30 ms si tous les canaux sont déclenchés par des ondes P. Ainsi, il n'est pas surprenant de remarquer la présence de nombreux canaux déclenchés par des ondes S. Leur nombre réel est de six, d'après la différence entre les temps d'arrivée et l'analyse des résiduelles. En raison de la présence de nombreux canaux déclenchés par des ondes S, l'algorithme du USBM ne devrait permettre d'obtenir aucun résultat raisonnable. En réalité, on constaterait une erreur de localisation très grande, d'environ 500 pi, si cette méthode était utilisée. Avec l'ADASLS, l'algorithme du USBM est mis de côté pour les événements comme celui-ci pour lesquels un grand nombre de canaux ont été déclenchés par des ondes S.

Avec l'algorithme Simplex, il existe deux solutions possibles (voir tableau (v)), qui sont différentes sur le plan des données d'entrée associées au canal 2. La première solution considère un canal déclenché par une onde P, alors que la seconde considère une onde S. Bien que les résiduelles d'événements des deux solutions soient semblables, les résiduelles principales sont très différentes. La solution pour laquelle on a obtenu la plus petite résiduelle principale (0,64 ms) ne comporte qu'une erreur de 46 pi, alors que celle pour laquelle on a obtenu une résiduelle principale relativement grande (2,37 ms) comporte une erreur de 363 pi.

Tableau (iv) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 37

N° du capteur	X (pi)	Y (pi)	Z (pi)	Temps d'arrivée (10 µs)
32	2 990	5 678	5 371	5
40	3 041	5 596	4 979	2 070
25	3 241	5 711	5 574	3 090
52	2 566	5 546	4 722	5 085
63	4 078	5 836	5 776	5 520
49	2 494	5 149	4 768	6 120
54	2 479	5 106	4 565	7 825
50	3 920	5 786	5 973	9 770

Tableau (v) Résultat de la localisation pour l'événement 37

Algorithme	Modèle de vitesse*	Coordonnées (pi)**			Résiduelle de l'événement (10 µs)	Résiduelle principale (10 µs)	Erreur (m)
		X	Y	Z			
	(Lieu du sautage)	2 907	5 615	5 252			
Simplex	PPSSPSSS	2 665(242)	5 715(100)	5 504(363)	295	237	363
Simplex	PSSSPSSS	2 929(22)	5 650(35)	5 273(21)	280	64	46
USBM	PPPPPPPP	3 352(445)	5 674(59)	5 040(212)	2 497	1 933	496

** P et S représentent des arrivées d'ondes P et S respectivement.*
*** Les nombres entre parenthèses représentent les erreurs.*

Tableau (vi) Résiduelles de canal pour l'événement 37 (10 µs)

Algorithme	Modèle de vitesse	32	40	25	52	63	49	54	50
Simplex	PPSSPSSS	-276	269	-140	10	-213	-78	78	350
Simplex	PSSSPSSS	-98	-47	22	132	-332	-182	172	384
USBM	PPPPPPPP	-3 288	-404	-482	-44	-549	67	1 259	3 442

PARTIE B Statistiques relatives à la précision de la localisation de la source

La présente partie compte six tableaux. Les tableaux (vii) à (xii) contiennent des données relatives aux localisations déterminées à l'aide de l'ADASLS et d'une méthode classique pour six ensembles de données de sautage. Chaque tableau est organisé comme suit : la première colonne comprend le nombre séquentiel de l'événement tel qu'il figure dans le fichier de données original. Les caractères qui figurent dans la deuxième colonne indiquent le classement des solutions obtenues à l'aide de l'ADASLS. Le lecteur peut se reporter au chapitre 5 pour de plus amples détails sur le système de classement. Le nombre de canaux déclenchés est donné à la colonne 3. Les modèles de vitesse utilisés par l'ADASLS figurent dans la quatrième colonne, où P, S et D représentent l'onde P, l'onde S et les canaux omis respectivement. Les localisations précises déterminées par l'ADASLS ainsi que par les erreurs associées sont indiquées dans les quatre colonnes suivantes. Les solutions de la mine sont indiquées dans les quatre dernières colonnes. La localisation réelle de chaque sautage est également indiquée dans le tableau.

Tableau (vii) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 19 février 1992 – ADASLS et méthode classique[1]

N° de l'événement	Classe	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS (m)				Méthode classique (m)			
				X	Y	Z	E**	X	Y	Z	E**
			Lieu du sautage	**5 699**	**5 532**	**2 663**		**5 699**	**5 532**	**2 663**	
1	B	12	PPPPPPPPPPP	5 676	5 532	2 660	23	5 674	5 535	2 659	25
2	A	12	PPPPPPPPPPP	5 689	5 519	2 657	17	5 554	5 532	2 639	147
3	B	12	PDPPPPSDPDPP	5 682	5 331	2 662	17	5 540	5 528	2 823	226
4	D	6	D*PDSPP	5 693	5 427	2 671	105	5 254	5 108	2 413	664
5	C	12	PDPDPPPPDPPP	5 695	5 511	2 682	29	5 554	5 588	2 761	184
6	C	12	PPDDPPDPPPPP	5 669	5 505	2 693	50	5 789	4 532	3 217	730
7	C	12	PPPDDPPDPPSS	5 678	5 451	2 669	84	5 441	5 322	2 706	335
8	D	8	D*PDPPDPP	5 676	5 451	2 669	63	5 441	5 322	2 706	457
10	C	12	PPPPDSPPPPDD	5 691	5 508	2 666	25	5 639	5 560	2 696	74
11	C	12	PPPDDPPPPPPS	5 696	5 539	2 684	22	5 790	5 953	3 311	778
12	C	12	PPPPSSPSSDPS	5 713	5 532	2 626	40	5 648	5 551	2 715	75
13	C	12	D*PPDDPPPPSPP	5 695	5 554	2 685	31	5 506	5 515	2 714	200
14	C	10	PPPPDDDSSD	5 669	5 530	2 674	32	5 611	5 611	2 280	166
15	A	12	PPDDPPPPSSSD	5 669	5 530	2 674	41	5 611	5 611	2 780	172
16	D	6	D*PPPPP	5 469	5 175	2 571	434	5 045	5 102	2 531	794
17	C	5	D*PPPS	5 714	5 514	2 643	30	5 262	5 074	2 287	736

[1] *Événements tirés du fichier de données MCG. Les données sont fournies par la mine Kidd Creek.*
* *Valeurs aberrantes déterminées.*
** *Distance entre la localisation de l'événement et le site du sautage (estimation de l'erreur).*

Tableau (viii) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 15 janvier 1992 – ADASLS et méthode classique[1]

N° de l'événement	Classe	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS (m)				Méthode classique (m)			
				X	Y	Z	E**	X	Y	Z	E**
			Lieu du sautage	5 778	5 273	2 590		5 778	5 273	2 590	
40	A	12	PPPDPPPPPPP	5 745	5 276	2 591	33	5 368	521	2 654	419
45	C	12	D*PPPPPPPPP	5 769	5 267	2 572	21	5 598	5 360	2 617	202
53	C	10	PPPPPPPPP	5 782	5 224	2 518	87	5 772	5 221	2 516	90

[1] *Événements tirés du fichier de données MCG. Les données sont fournies par la mine Kidd Creek.*
* *Valeurs aberrantes déterminées.*
** *Distance entre la localisation de l'événement et le site du sautage (estimation de l'erreur).*

Tableau (ix) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 6 mai 1992 – ADASLS et méthode classique[1]

N° de l'événement	Classe	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS (m)				Méthode classique (m)			
				X	Y	Z	E**	X	Y	Z	E**
			Lieu du sautage	5 762	5 513	2 631		5 762	5 513	2 631	
1	A	12	PPPPPPPPPPP	5 749	5 498	2 644	24	5 749	5 595	2 646	27
2	C	12	PPPPPPPPPPP	5 768	5 495	2 633	29	5 775	5 496	2 628	22
3	C	12	PPPPPPPPPPP	5 766	5 513	2 631	4	6 260	5 424	2 182	676
4	C	8	PPPPPPPP	5 712	5 523	2 665	61	5 672	5 472	2 643	114
5	C	12	PPPPPPPPPPP	5 770	5 496	2 621	21	5 773	5 496	2 620	23
6	C	12	D*D*PPPPPPPPP	5 771	5 518	2 622	14	5 589	5 328	2 748	279
7	C	12	PPPPPPPPPPD	5 754	5 512	2 641	23	5 769	5 525	2 649	23
8	C	12	PPPPPPPPPPD	5 754	5 512	2 641	15	5 745	5 514	2 653	28
9	C	12	PPPPPPPPPPP	5 790	5 519	2 623	30	5 799	5 518	2 618	40
10	C	12	PPPPPDDPPDPP	5 907	5 467	2 433	249	5 807	5 504	2 626	46
11	A	12	PPPPPPPPPPP	5 759	5 499	2 640	17	5 164	5 499	2 637	15
12	C	12	PPPPPPPPPPP	5 767	5 504	2 618	17	5 783	5 506	2 611	31
13	C	12	PPPPPPPPSPP	5 760	5 497	2 627	17	5 769	5 507	2 626	10
14	C	12	PPPPPPPPPPP	5 842	5 537	2 590	93	5 821	5 543	2 599	74

[1] *Événements tirés du fichier de données Drift91. Les données sont fournies par la mine Kidd Creek.*
* *Valeurs aberrantes déterminées.*
** *Distance entre la localisation de l'événement et le site du sautage (estimation de l'erreur).*

Tableau (x) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 29 mai 1991 – ADASLS et méthode classique[1]

N° de l'événement	Classe	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS (m)				Méthode classique (m)			
				X	Y	Z	E**	X	Y	Z	E**
			Lieu du sautage	5 690	5 559	2 722		5 690	5 559	2 722	
25	B	12	PPPPPPPPPPP	5 685	5 568	2 712	11	5 675	5 555	2 716	17
26	C	12	PPPPPPPPPPP	5 679	5 576	2 711	23	5 657	5 596	2 750	51
27	C	12	PPPPPPPPPPP	5 740	5 555	2 709	53	5 785	5 524	2 677	111
28	C	9	PPPPPPPPS	5 662	5 549	2 689	44	5 778	5 531	2 622	136
29	D	6	PPPSPP	5 688	5 739	2 741	181	5 759	5 525	2 629	121
30	C	12	PPPPPSSSSPS	5 701	5 546	2 710	21	5 684	5 588	2 724	29
31	C	12	D*D*PPPPPPPPP	5 684	5 572	2 718	14	5 726	5 624	2 634	115
32	C	12	PPPPPPPPPSSP	5 691	5 560	2 722	1	5 776	5 539	2 686	95
33	C	12	PPPPPPPPPPDD	5 716	5 578	2 731	33	5 801	5 530	2 670	126
34	C	12	PPPPPPPPPSPP	5 641	5 592	2 722	59	5 770	5 562	2 692	85
35	C	5	PPPDP	5 697	5 551	2 412	310	5 066	5 718	2 270	710
36	C	12	PPPPPPPPPPP	5 713	5 538	2 724	31	5 706	5 547	2 728	21
37	C	7	PPPPD*PP	5 765	5 507	2 672	104	5 680	5 503	2 619	117
38	C	12	PPPPPPPPSSS	5 719	5 506	2 700	64	5 750	5 498	2 674	98
39	B	12	PPPPPPPPDDD	5 682	5 525	2 727	35	5 815	5 513	2 660	149
40	C	12	PPPPPPPPPPD*	5 739	5 555	2 685	61	5 734	5 558	2 681	56
41	B	12	PPPPPPPPPSP	5 691	5 575	2 719	16	5 717	5 554	2 719	28
42	C	12	PPPPPPPSSPS	5 698	5 551	2 743	24	5 689	5 552	2 744	23
43	D	6	PPPPPD	5 691	5 540	2 691	36	5 663	5 486	2 679	89
44	C	12	PPPPPPPPPSP	5 703	5 579	2 723	24	5 729	5 546	2 715	42
45	D	7	D*PPPPPP	5 710	5 659	2 730	102	5 717	5 655	2 746	103

[1] *Événements tirés du fichier de données Drift91. Les données sont fournies par la mine Kidd Creek.*
* *Valeurs aberrantes déterminées.*
** *Distance entre la localisation de l'événement et le site du sautage (estimation de l'erreur).*

Tableau (xi) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 7 mai 1991 – ADASLS et méthode classique[1]

N° de l'événement	Classe	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS (m)				Méthode classique (m)			
				X	Y	Z	E**	X	Y	Z	E**
			Lieu du sautage	5 658	5 608	2 221		5 658	5 608	2 221	
71	A	12	PPPPPPPPPSS	5 657	5 594	2 215	15	5 654	5 580	2 225	29
72	C	10	PPPPPPPPP	5 635	5 585	2 235	35	5 636	5 581	2 232	40
73	C	11	PPPPPPPSSSD	5 662	5 595	2 203	23	5 719	5 616	2 208	63
74	A	8	D*PPPPD*SS	5 568	5 584	2 204	95	5 131	5 380	2 216	574
75	C	7	D*PPPPPP	5 663	5 648	2 209	42	5 667	5 644	2 217	37
76	C	7	PPPPSSD*	5 613	5 570	2 212	60	5 529	5 545	2 190	146
77	C	7	PPPPPPP	5 538	5 566	2 178	134	5 619	5 623	2 168	67
78	C	11	PPPPPPPPDDD*	5 625	5 567	2 222	53	5 648	5 570	2 212	40
79	C	7	PPPPPPP	5 660	5 628	2 211	24	5 399	5 189	2 384	519
80	A	12	PPPPPPPPPDD	5 648	5 594	2 227	18	5 643	5 591	2 225	23
81	C	11	PPPPPPPPPP	5 664	5 620	2 189	34	5 662	5 616	2 187	35
82	A	7	DPPPPPS	5 564	5 504	2 231	141	5 489	5 511	2 294	208
83	C	10	PPPPPPPPD	5 667	5 610	2 209	14	5 664	5 613	2 209	14

[1] *Événements tirés du fichier de données Drift91. Les données sont fournies par la mine Kidd Creek.*

* *Valeurs aberrantes déterminées.*

** *Distance entre la localisation de l'événement et le site du sautage (estimation de l'erreur).*

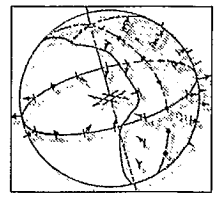
Tableau (xii) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 19 avril 1991 – ADASLS et méthode classique[1]

N° de l'événement	Classe	Nombre total de canaux	Modèle de vitesse	ADASLS (m)				Méthode classique (m)			
				X	Y	Z	E**	X	Y	Z	E**
			Lieu du sautage	5 663	5 552	2 643		5 663	5 552	2 643	
66	A	12	PPPPPPPPPPPP	5 814	5 590	2 600	162	5 699	5 504	2 629	63
67	C	8	D*PPD*SSD*D	5 754	5 541	2 627	93	5 771	5 224	2 282	500
68	D	7	PPPPSSD	5 885	5 485	2 728	170	5 868	5 366	2 577	285
70	D	7	PDSPSD*S	5 577	5 861	2 490	645	5 724	5 541	2 721	100
71	C	6	PPPPPD	5 679	5 574	2 665	35	5 698	5 537	2 662	43
72	D	6	PPPPPD	5 712	5 597	2 739	117	5 720	5 580	2 739	110
74	C	5	PPPPD	5 667	5 534	2 581	65	5 791	5 506	2 736	165
75	C	7	D*D*PPPPS	5 691	5 589	2 733	101	5 658	5 501	2 726	100
76	C	12	PPPPSSSSSSSS	5 792	5 630	2 477	224	5 645	5 570	2 574	74
78	C	5	PPPPD*	5 779	5 455	2 607	162	5 777	5 453	2 600	163
80	B	8	PPPPPSSP	5 639	5 563	2 663	33	5 699	5 548	2 641	36
82	C	6	PPPPPP	5 666	5 577	2 657	28	5 664	5 513	2 613	49
83	A	8	D*D*PPPPPP	5 63B	5 513	2 61B	53	5 63B	5 203	2 092	653
84	C	9	PPPPPPPPD	5 645	5 480	2 644	74	5 75B	5 539	2 654	97
85	D	5	PPPPP	5 597	5 470	2 395	269	5 831	5 643	2 865	293
86	C	B	PPPPPPDD*	5 668	5 542	2 635	20	5 625	5 537	2 633	42
B7	C	6	D*PPPPD	5 654	5 563	2 671	31	5 703	5 464	2 618	100
88	A	8	D*PPPPPDD	5 668	5 412	2 609	144	6 030	6 163	2 788	727
89	A	5	PPPPS	5 647	5 573	2 656	29	4 921	5 569	2 665	743
91	C	5	DPPPP	5 684	5 539	2 689	52	5 691	5 519	2 665	49
92	C	7	PPPPPDD*	5 660	5 560	2 633	13	5 677	5 528	2 636	29
93	D	7	PPPPPPD*	5 604	5 530	2 611	71	5 856	5 530	2 697	202
95	C	5	PPPPP	5 677	5 561	2 703	62	5 693	5 520	2 671	52
96	C	12	D*PPPPPPPPPP	5 678	5 533	2 655	39	5 698	5 510	2 646	55
97	D	12	PPPPPPPSPPPP	5 691	5 531	2 659	38	5 687	5 542	2 641	26
98	A	12	PPPPPPPSPPPP	5 691	5 531	2 659	39	5 712	5 529	2 651	55
100	C	12	PPPPPPSPPSSS	5 700	5 540	2 665	45	5 753	5 52B	2 645	93
101	C	10	PPPPPPPPPP	5 695	5 527	2 642	41	5 695	5 521	2 642	45
102	C	5	PPPPP	5 668	5 551	2 685	42	5 693	5 514	2 657	50
103	A	8	D*PPPPPSP	5 651	5 527	2 635	29	6 324	5 671	2 556	687
104	C	7	PPPPDDD	5 638	5 590	2 641	46	5 666	5 468	2 651	84
105	D	6	D*PPPPP	5 699	5 633	2 619	92	5 701	5 627	2 620	B7
106	C	12	PPPPPSSSPPSS	5 676	5 507	2 639	47	5 725	5 529	2 646	66
107	C	8	PPPPPPPP	5 669	5 542	2 571	79	5 668	5 543	2 577	67
108	C	11	PPPPPPPPPPD	5 693	5 509	2 644	56	5 633	5 501	2 663	62
109	C	5	PPPPD	5 637	5 527	2 643	36	5 633	5 512	2 645	50

[1] *Événements tirés du fichier de données Blast91. Les données sont fournies par la mine Kidd Creek.*

* *Valeurs aberrantes déterminées.*

** *Distance entre la localisation de l'événement et le site du sautage (estimation de l'erreur).*



Liste des publications sur la sismologie minière produites par le personnel des Laboratoires de recherche minière de CANMET dans le cadre de la phase II du Programme canadien de recherche sur les coups de toit, 1990-1995

Arjang, B. (1991). *Utilization of Stiff Backfill in Alleviation of Rockbursts Part 1: Pre-Mining Ground Stress Determinations at the Macassa Mine.* CANMET, Rapport de division MRL 91-089 (TR).

Arjang, B. et Swan, G.(1995). «Mechanical Characteristics of Stiff Backfills Under Confinement». CAMI '95 : 3rd Canadian Conference on Computer Applications in the Mineral Industry, Montréal, 22-25 octobre 1995.

Arjang, B. et Stevens, K. (1992). *Utilization of Stiff Backfill in Alleviation of Rockbursts Part 2A: Laboratory Scale Dilatometer Testing of Cemented Rockfill.* CANMET, Rapport de division MRL 92- 096 (TR).

Côté, M., Talebi, S. et Plouffe, M. (1994). *Preliminary Analysis of the Seismic Activity Recorded at Phalen Colliery, Sydney, Nova Scotia.* CANMET, Rapport de division MRL 94-055 (TR).

Forrester, D., Cain, D.P., Corbett, G. et Plouffe, M. (1994). *CBCRL Monitoring of Outburst Incident at Phalen Colliery of September 28, 1994.* CANMET, Rapport de division MRL 94-052 (CF).

Gagnon, L.P., Plouffe, M. et Côté, M. (1994). *Analyse de l'activité séismique à la mine Sigma, Val-d'Or, Québec, décembre 1992-avril 1994.* CANMET, Rapport de division MRL 94-019 (TR).

Galley, C.A. et Wetmiller, R.J. (1992). *The history of Mining-Induced Seismic Events in Sudbury Mines.* Rapport spécial, CGC.

Ge, M. (1991). *Microseismic Source Location Methods.* CANMET, Rapport interne, 29 pages.

Ge, M., (1992). *Analysis of Mine-Wide Array Microseismic Data.* Rapport final présenté à Inco Limitée, 116 pages.

Ge, M. (1992). *Automatic Data Analysis and Source Location System.* CANMET, Rapport interne, p. 90.

Ge, M. (1993). *Analysis of Kidd Creek Source Location Data.* Rapport final présenté à la mine Kidd Creek, Falconbridge Limitée, 150 pages.

Ge, M. (1994). *Analysis of Locations of January 7 Rockburst and Associated Events.* Rapport technique présenté à la mine Onaping, Falconbridge Limitée, p. 16.

Ge, M. (1995). «Comments on «Microearthquakes Location: A Nonlinear Approach that Makes Use of a Simplex Stepping Procedure» by Prugger, A. and Gendzwill, D.». *Bull. Seism. Soc. Am.* 85:375- 377.

Ge, M. et Kaiser, K.P. (1992). «P-Wave Velocity Back-Calculation with Automatically Determined Microseismic Event Data». 33rd U.S. Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, juin, pp.1071-1078.

Ge, M. et Mottahed, P. (1993). «An Automatic Data Analysis and Source Location System». *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* Kingston (Ontario), pp. 343-348.

Ge, M. et Mottahed, P. (1994). «An Automated AE.MS Source Location Technique Used by Canadian Mining Industry». Article sollicité par le 12th International Acoustic Emission Symposium, Sapporo, Japon, pp. 147-424.

Hedley, D.G.F. (1991). *A Five-Year Review of the Canada-Ontario Industry Rockburst Project.* CANMET, Rapport spécial SP90-4E.

Hedley, D.G.F. (1992). *Manuel des coups de toit dans les mines de roche dure de l'Ontario.* CANMET, Rapport spécial SP92-1F.

Laverdure, L. (1992). *Analysis of Time and Frequency Domain of Mining Induced Seismicity at Kidd Creek Mine, Ontario.* CANMET, Rapport de division MRL 92-195 (TR), p. 167.

Laverdure, L. (1994). *Wave Attenuation of Mining Induced Seismic Events: Part I-Bibliography.* CANMET, Rapport de division MRL 94-000 (TR), p. 73.

Laverdure, L. et Plouffe, M. (1991). *Full Waveform Analysis at Kidd Creek Mine – Progress Report.* CANMET, Rapport de division MRL 91-104 (TR), p. 21.

Laverdure, L. et Rochon, P. (1991). *Spectral Analysis of Sudbury Basin Data for the Proposed Neutrino Laboratory Site in Creighton Mines, Sudbury, Ontario.* CANMET, Rapport de division MRL 91-131 (TR), p.167.

Plouffe, M. (1990). *A Local Seismic Survey at Creighton Mine.* CANMET, Rapport de division MRL90-076 (TR).

Plouffe, M. (1992). *Preliminary Local Magnitude Scales for Mining-Induced Seismicity at Some Mines in the Sudbury Basin.* CANMET, Rapport de division MRL 92-109 (TR).

Plouffe, M. (1992). *Preliminary Report on Magnitude Scaling of Mining Induced Seismicity at Kirkland Lake.* CANMET, Rapport de division MRL 92-113 (TR).

Plouffe, M. (1993). *Rapport préliminaire : levé séismique à la mine Agnico-Eagle, Joutel, Québec.* CANMET, Rapport de division MRL 93-002 (CF).

Plouffe, M., Lachance, D.V., Asudeh, I., Aguila, R. et Turgeon, L. (1993). «The Agnico-Eagle Mine Seismic Survey». Présenté au 3e Symposium international sur les coups de toit et la séismicité dans les mines, Kingston (Ontario). CANMET, Rapport de division MRL 93-009 (TR).

Plouffe, M., Mottahed, P., Lebel, D. et Côté, M. (1993). «Monitoring of Large Mining Induced Seismic Events». Présenté au 3e Symposium international sur les coups de toit et la séismicité dans les mines, Kingston (Ontario).

Pritchard, C. et Talebi, S. (1994). *The Upgraded Sudbury Local Telemetered Network (SLTN): The First Year of Operation (93-94).* CANMET, Rapport de division MRL 94-053 (TR).

Rochon, P., Lebel, D., Plouffe, M. et Côté, M. (1995). «Rockburst Phenomenon. Data Acquisition and Analysis Using Multi-Tasking and Multi-User Operating Systems». Présenté à la 3e Conférence canadienne sur les applications informatiques dans l'industrie minérale (CAMI'95), Montréal (Québec).

Stevens, K. (1992). *The Influence of Continuous Structures on Ground Stability at the Fraser Mine, Sudbury Basin.* CANMET, Rapport de division MRL 92-126 (TR), p. 72.

Swan G., Arjang, B. et Hedley, D.G.F. (1993). «On the Use of Rockfills in Overhand Cut-and-Fill Mining». *Proceedings of the International Congress on Mine Design,* Kingston (Ontario).

Talebi, S. (1993). *Source Studies of Mine-Induced Seismic Events Over a Broad Magnitude Range (-4 < m_N <4).* CANMET, Rapport MRL 93-046(CL) présenté au PCRCT.

Talebi, S. (1994). *Source Studies of Mine-Induced Seismic Events Over a Broad Magnitude Range (-4 < m_N <4).* CANMET, Rapport MRL 94-030 (CL).

Talebi, S., Ge, M., Rochon, P. et Mottahed, P. «Analysis of Induced Seismicity in a Hard-Rock Mine in the Sudbury Basin, Ontario, Canada». *Proceedings of the First North America Rock Mechanics Symposium,* Balkema Publishers, pp. 937-944.

Talebi, S., Mottahed, P. et Corbett, G. (1995). «Outburst Monitoring Using Microseismic Techniques in the Phalen Colliery, Sydney, Nova Scotia, Canada». Communication présentée au symposium international «Management and Control of High Gas Emission and Outbursts in Underground Coal Mines», Wollongong, Australie.

Talebi, S., Mottahed, P. et Plouffe, M. (1995). «Overview of Mine-Induced Seismicity at CANMET». Présenté à l'atelier sur la séismicité induite, Conférence de l'Union canadienne de géophysique, Banff (Alberta).

Talebi, S., Pritchard, C. et Mottahed, P. (1995). «Rockburst Monitoring in Mining Camps of Ontario and Quebec Using CANMET's Digital Seismograph Network». Réunion générale du CIM, Halifax (Nouvelle-Écosse).

Talebi, S. et Young, R.P. (1992). *Source Studies of Mining-Induced Seismic Events Over a Broad Magnitude Range (-4 < m_N <4).* MRD-SM001, p. 28.

Talebi S. et Young, R.P. (1993). «Design of a Microseismic Monitoring System for the Investigation of Tunnel Excavation Damage». *Proceedings of the 3rd International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines,* Kingston (Ontario), pp. 423-428.

Wetmiller, R.J., Galley., C.A. et North, R.G. (1992). «The Role of the National Seismograph Network in Monitoring Mining-Induced Seismicity in Canada». Montréal (Québec).

Wetmiller, R.J., Galley., C.A. et Plouffe, M. (1993). «Post-Closure Seismicity at a Hard-Rock Mine». Présenté au 3e Symposium international sur les coups de toit et la séismicité dans les mines, Kingston (Ontario).

Wetmiller, R.J., McNeil, W. et Plouffe, M. (1992). «Canada's Largest Rockburst». Présenté au 33e US Symposium on Rock Mechanics, Santa Fe, États-Unis.

LISTE DES FIGURES

Chapitre 2

Figure 2.1 Bandes de fréquence enregistrées pour les tremblements de terre, l'activité macro/microsismique, les émissions acoustiques et les domaines connexes d'étude et de recherche.

Figure 2.2 Schéma représentant six modèles concevables d'événements induits par l'activité minière (Hasegawa et al., 1989).

Figure 2.3 Trois bandes de magnitude/fréquence pour la détection des trains d'ondes complets dans l'étude de la sismicité induite par l'activité minière au Canada.

Figure 2.4 Vitesse de l'onde P dans différents types de roche (données de Birch, 1966).

Figure 2.5 Mouvement des particules provoqué par une onde P sphérique (d'après Telford et al., 1990).

Figure 2.6 Patron de rayonnement normalisé des ondes P et S en champ lointain (flèches continues) pour quatre types de sources ponctuelles, illustrées à la figure 2.2 (dessin modifié d'après Hasegawa et al., 1989).

Figure 2.7 Patron de rayonnement des ondes P et S pour une source à double couple.

Figure 2.8 Mécanismes au foyer pour un événement de cisaillement induit par l'injection de fluides : (a) première arrivée de l'onde P; (b) polarisation de l'onde S (Talebi et Cornet, 1987).

Figure 2.9 Types élémentaires de mécanisme au foyer : (a) faille décrochante; (b) rejet de faille inverse; (c) rejet de faille normale (Kasahara, 1981).

Figure 2.10 Trois types de paramètres sismiques de la source.

Figure 2.11 Représentation schématique des spectres de déplacement des ondes P et S en champ lointain.

Figure 2.12 Moment sismique en fonction du rayon de la source pour de petits tremblements de terre (Hanks, 1977).

Figure 2.13 Balayage associé à trois configurations expérimentales; (a) zone balayée sur les quatre côtés; (b) zone balayée sur trois côtés; (c) zone balayée sur deux côtés (d'après Jackson et Tweeton, 1994).

Figure 2.14 Test de résolution avec des données de synthèse : (a) modèle de vitesse; (b) reconstruction d'après la zone balayée sur quatre côtés, figure 2.13(a); (c) reconstruction d'après la zone balayée sur trois côtés, figure 2.13(b); (d) reconstruction d'après la zone balayée sur deux côtés, figure 2.13(c.)

Chapitre 3

Figure 3.1 Emplacement des stations sismographiques dans le nord de l'Ontario.

Figure 3.2 Emplacement des stations sismographiques autour du Bassin de Sudbury et transfert des données du RTLS original.

Figure 3.3 Signaux sismiques analogiques associés à des sautages et des coups de toit, enregistrés par le sismographe d'Elliot Lake.

Figure 3.4 Histogramme indiquant le nombre d'événements sismiques ($m_N > 2,0$) dans les mines de Sudbury au cours de la période de 1984 à 1990.

Figure 3.5 Emplacement des stations sismographiques et du RTLS amélioré.

Figure 3.6 Carte illustrant l'étendue du réseau sismographique numérique de CANMET.

Figure 3.7 Représentation schématique du transfert des données sur le RTLS amélioré.

Figure 3.8 Représentation schématique du traitement des données pour le RTLS amélioré.

Figure 3.9 Exemple de signal d'un sautage enregistré sur le RTLS.

Figure 3.10 Exemple de signaux associés à un sautage avec délais prolongés, suivi d'un événement induit par l'exploitation minière.

Figure 3.11 Exemple d'un événement induit par l'exploitation minière à la mine Creighton d'Inco, enregistré par le RTLS, et plan connexe de localisation de la source.

Figure 3.12 Signaux enregistrés par le RTLS pour le coup de toit mortel du 26 novembre 1993 à la mine Macassa de Kirkland Lake (Ontario).

Figure 3.13 Trains d'onde associés à un événement sismique majeur récent (magnitude de 2,7 m_N) à la mine Macassa de Kirkland Lake (Ontario), enregistrés le 25 décembre 1994.

Figure 3.14 Localisation de la source et détermination de la magnitude de l'événement sismique du 25 décembre 1994 à la mine Macassa.

Figure 3.15 Ondes associées à un faible tremblement de terre dans la région de Kapuskasing, au nord de l'Ontario, le 25 décembre 1994.

Figure 3.16 Localisation de la source et détermination de la magnitude pour le faible tremblement de terre du 25 décembre 1994 dans la région de Kapuskasing.

Chapitre 4

Figure 4.1 Aperçu du système microsismique de CANMET – Mine Creighton.
Figure 4.2 Diagramme décrivant le logiciel d'acquisition des données ainsi que les interactions entre les différents modules du programme.
Figure 4.3 Diagramme décrivant les options offertes dans le logiciel d'analyse des ondes de CANMET.
Figure 4.4 Tracé du mécanisme au foyer pour les données de la mine Creighton, utilisant l'algorithme du Virginia Technical College
Figure 4.5 Histogramme illustrant la magnitude des événements en fonction du temps, pour les données de la mine Creighton.
Figure 4.6 Histogramme indiquant le nombre d'événements en fonction du temps pour la mine Creighton.

Chapitre 5

Figure 5.1 Hyperbole déterminée par la différence entre les temps d'arrivée à deux capteurs.
Figure 5.2 Champ hyperbolique associé à deux capteurs.
Figure 5.3 Comparaison de la localisation du coup de toit RB1097 et de ses répliques sismiques : méthode classique et progiciel ADASLS.
Figure 5.4 Localisation du coup de toit du 7 janvier 1994 et des événements connexes à la mine Onaping.

Chapitre 6

Figure 6.1 Différence de chute de contrainte entre des tremblements de terre importants intraplaques et interplaques
Figure 6.2 Exemple de signaux enregistrés par le système macrosismique de CANMET à la mine Creighton.
Figure 6.3 (a) Vue en plan et (b) Coupe verticale indiquant l'emplacement des capteurs et la localisation de la source des événements à la mine Creighton.
Figure 6.4 Exemple de spectre de déplacement observé pour un événement macrosismique.
Figure 6.5 Histogramme illustrant les résultats des mesures du facteur de qualité des ondes S (Q_S).
Figure 6.6 Facteur d'atténuation des ondes S (Kappa) en fonction de la distance source-capteur sur une échelle bilogarithmique pour les cinq capteurs (S1 à S5).
Figure 6.7 Facteur d'atténuation des ondes S (Kappa) en fonction de la distance source-capteur sur une échelle linéaire pour les cinq capteurs (S1 à S5).
Figure 6.8 Moment sismique en fonction du rayon de la source pour les résultats de l'étude. Les lignes droites représentent les valeurs constantes de chute de contrainte.
Figure 6.9 Paramètre de la vitesse maximale (R_V) en fonction du moment sismique (M_0).
Figure 6.10 Moment sismique en fonction du rayon de la source.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 3

Tableau 3.1 Événements sismiques induits par l'exploitation minière ($m_N > 1,5$) dans le nord de l'Ontario entre le 3 septembre 1992 et le 15 juin 1993.

Tableau 3.2 Événements sismiques induits par l'exploitation minière ($m_N > 1,5$) dans le nord de l'Ontario entre le 15 juin 1993 et le 31 décembre 1993.

Tableau 3.3 Événements sismiques induits par l'exploitation minière ($m_N > 1,5$) dans le nord de l'Ontario entre le 1er janvier 1994 et le 31 décembre 1994.

Chapitre 4

Tableau 4.1 Exigences de base recommandées pour le matériel informatique.

Tableau 4.2 Flux de données et interaction entre les divers modules du programme.

Tableau 4.3 Liste des commandes les plus importantes du système.

Chapitre 5

Tableau 5.1 Limites théoriques se rapportant aux différences entre les temps d'arrivée à deux capteurs pour quatre combinaisons de types d'ondes.

Tableau 5.2 Interprétation de la résiduelle de canal.

Tableau 5.3 Caractéristiques techniques de l'ADASLS.

Tableau 5.4 Comparaison des localisations du coup de toit RB1097 et de ses répliques sismiques par ADASLS et par une méthode classique.

Chapitre 6

Tableau 6.1 Résultats de la détermination des paramètres de la source.

Figures des annexes

Annexe I

Figure (1) Menu principal.

Figure (2) Menu 4 – Tracé des canaux – Relocalisation des canaux.

Figure (3) Menu 3 – Modification de la plage.

Figure (4) Menu 5 – Modification de l'échelle de temps.

Figure (5) Menu 8 – Localisation de la source.

Figure (6) Menu 6 – Sélection de la particule de crête.

Figure (7) Menu 7 – Sélection de l'énergie.

Figure (8) Menu 2 – Sélection du temps d'arrivée.

Figure (9) Menu 9 – Sélection de la FFT pour éliminer le bruit.

Annexe III

Figure (1) Exemple de signaux associés à un événement microsismique (d'après Talebi et Young, 1989).

Figure (2) Géométrie du réseau pour l'événement 89 et localisations obtenues avec trois modèles de vitesse différents.

Figure (3) Comparaison des localisations du coup de toit RB1079 et de ses répliques sismiques, obtenues par une méthode classique et par le progiciel ADASLS.

Tableaux des annexes

Annexe I

Tableau (i) Exemple d'un fichier p.

Tableau (ii) Exemple d'un fichier fax.

Annexe II

Tableau (i) Événements sismiques enregistrés dans les mines de l'Ontario – mine Campbell – du 1-01-92 au 12-31-95 (mise à jour : 12-31-95).

Tableau (ii) Événements sismiques enregistrés dans les mines de l'Ontario – mine Macassa – du 5-01-91 au 11-31-95 (mise à jour : 11-31-95).

Tableau (iii) Événements sismiques enregistrés dans les mines de l'Ontario – mine Creighton – du 2-12-92 au 11-20-95 (mise à jour : 11-20-95).

Annexe III

Tableau (i) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 89.
Tableau (ii) Différence entre les temps d'arrivée pour l'événement 89 (10 μs).
Tableau (iii) Résultats de la localisation de la source pour l'événement 89.
Tableau (iv) Résiduelle des canaux pour l'événement 89 (10 μs).
Tableau (v) Comparaison de la localisation de la source selon le progiciel ADASLS et une méthode classique pour le coup de toit RB1097 et ses répliques sismiques.
Tableau (vi) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 175.
Tableau (vii) Résultats de la localisation de la source pour l'événement 175.
Tableau (viii) Résiduelles des canaux pour les solutions de l'événement 175.
Tableau (ix) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 201.
Tableau (x) Comparaison des techniques OAD et TLP pour plusieurs canaux associés au canal 24.
Tableau (xi) Résultats de la localisation de la source pour l'événement 201.
Tableau (xii) Résiduelles des canaux pour les solutions de l'événement 201 (10 μs).
Tableau (xiii) Comparaison des temps d'arrivée entre l'événement 200 et l'événement 201.

Annexe IV

Tableau (i) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 24.
Tableau (ii) Distances entre le capteur 49 et les autres, pour l'événement 24.
Tableau (iii) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 39.
Tableau (iv) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 40.
Tableau (v) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 41.
Tableau (vi) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 43.
Tableau (vii) Comparaison des modes de déclenchement.
Tableau (viii) Comparaison des localisations obtenues au moyen du progiciel ADASLS et d'une méthode classique, selon l'hypothèse que tous les signaux correspondent à des ondes P.
Tableau (ix) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 94.

Annexe V

Tableau (i) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée de l'événement 72.
Tableau (ii) Résultat de la localisation de la source pour l'événement 72.
Tableau (iii) Résiduelles de canal pour l'événement 72.
Tableau (iv) Coordonnées des capteurs et temps d'arrivée pour l'événement 37.
Tableau (v) Résultat de la localisation pour l'événement 37.
Tableau (vi) Résiduelles de canal pour l'événement 37 (10 μs).
Tableau (vii) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 19 février 1992 – ADASLS et méthode classique.
Tableau (viii) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 15 janvier 1992 – ADASLS et méthode classique.
Tableau (ix) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 6 mai 1992 – ADASLS et méthode classique.
Tableau (x) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 29 mai 1991 – ADASLS et méthode classique.
Tableau (xi) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 7 mai 1991 – ADASLS et méthode classique.
Tableau (xii) Comparaison des localisations d'événements générés par un sautage dans une galerie le 19 avril 1991 – ADASLS et méthode classique.

Glossaire de termes sismologiques

ACP (analyse des composantes principales) : Méthode statistique employée pour déterminer une corrélation dans la distribution des hypocentres.

Analyse spectrale : Analyse des ondes sismiques rayonnées, à partir de leurs spectres FFT.

Aspérités : Régions (points ou surfaces) le long d'une faille présentant une grande résistance au cisaillement, c'est-à-dire des zones où le relâchement des contraintes et le rayonnement d'énergie sismique sont les plus élevés.

Atténuation (ou absorption) : Absorption d'une partie de l'énergie des ondes sismiques lorsque ces ondes se propagent dans un milieu inélastique, c'est-à-dire filtration sélective des fréquences des ondes sismiques causant une distorsion.

Axe P (ou axe des pressions) : Axe des contraintes principales maximales.

Axe B (ou de mouvement nul) : Axe correspondant à l'intersection des deux plans nodaux d'un mécanisme au foyer (le mouvement le long de cet axe est nul).

Axe T (ou axe des tensions) : Axe des contraintes principales minimales.

Barrières : Régions (points ou surfaces) le long d'une faille qui résistent à la rupture et qui restent intactes après celle-ci.

Champ proche : Zone entourant une source sismique dans laquelle les distances à la source sont beaucoup plus faibles que les longueurs d'onde réelles considérées.

Champ lointain : Zone entourant une source, dans laquelle les distances à la source sont beaucoup plus grandes que les longueurs d'onde réelles considérées (distance à la source égale à plusieurs longueurs d'onde).

Chute de contrainte statique : Différence moyenne entre les niveaux de contrainte initial et final sur un plan de faille à la suite d'une rupture.

Chute de contrainte dynamique : Chute de contrainte basée sur la vitesse et l'accélération du sol dans le champ lointain.

Coda : Partie du sismogramme où des vibrations sont encore détectées longtemps après le passage des ondes sismiques.

coefficient b : Pente de la distribution du logarithme du nombre d'événements en fonction de leur magnitude. Ce paramètre peut être utilisé comme paramètre précurseur.

Coefficient de rayonnement : Coefficient représentant le rayonnement des ondes produites par des sources sismiques dans différentes directions de l'espace.

Comportement fractal : Type particulier de phénomène physique complexe dans lequel la relation entre les éléments est la même quel que soit le niveau d'observation.

Contrainte apparente : Estimation, indépendante du modèle, du relâchement des contraintes dynamiques à la source.

Coup de toit : Événement sismique induit par l'activité minière qui cause des dommages aux installations ou des blessures aux personnes, ou encore le déplacement de plus de cinq tonnes de roche (Hedley, 1992).

Dédoublement d'une onde de cisaillement (ou biréfringence) : Découplage d'une onde S en deux composantes se propageant à des vitesses différentes au sein d'un milieu anisotrope.

Dispersion : Réflexion et/ou réfraction des ondes de volume sur des discontinuités au sein du massif rocheux, à la suite de laquelle une partie de l'énergie sismique est perdue.

Double couple : Système de forces ponctuel constitué de deux couples opposés superposés dont le moment est nul. Ce modèle est utilisé pour décrire des phénomènes de cisaillement en champ lointain.

EA/MS : Abréviations des expressions «émission acoustique/microsismique».

Effets de parcours : Distorsion des formes d'onde sismiques consécutive à la propagation de l'onde dans le massif rocheux.

Élastique : Un solide élastique retrouve sa forme initiale après une série de charges et de décharges, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de perte d'énergie pendant le processus.

Émission acoustique (EA) : Émission d'ondes haute fréquence par des roches soumises à des contraintes élevées. Lorsque ce phénomène est audible, il est aussi appelé bruit de roche.

Énergie sismique : Énergie des ondes P et S rayonnées par une source sismique.

Épicentre : Projection de l'hypocentre à la surface de la Terre.

Erreur spatiale : Distribution tridimensionnelle d'une fonction inadéquate, calculée à partir des résiduelles, caractérisant l'erreur dans la localisation de la source (c.-à-d., distribution d'une erreur spatiale).

Étalement géométrique (ou divergence sphérique) : Propagation d'un front d'onde sphérique qui se dilate, telle que l'amplitude de l'onde diminue lorsque la distance augmente, tandis que l'énergie totale reste constante.

Événement sismique : Mouvement passager de terrain causé par une libération soudaine de l'énergie potentielle ou de l'énergie de déformation emmagasinée dans la roche. Au bas de l'échelle sismique, ces événements sont parfois appelés événements microsismiques ou macrosismiques.

Événements induits par l'exploitation minière (secousses) : Événements sismiques provoqués par les activités minières.

Facteur Q (de qualité) : Paramètre caractérisant l'atténuation des ondes sismiques.

FFT : Transformée de Fourier rapide.

Flux d'énergie : Intégrale du carré de la vitesse des particules des ondes de volume rayonnées.

f_{max} : Limite de fréquence maximale d'un spectre sismique qui peut être enregistrée.

Fonction de rejet : Fonction décrivant le déplacement d'une faille lors d'un événement sismique.

Fonction de Green : Fonction représentant la réponse du massif rocheux au glissement pendant un événement sismique.

Foyer : Synonyme d'hypocentre

Précurseurs : Activité sismique de faible magnitude enregistrée avant un séisme.

Fréquence-coin : Fréquence correspondant à l'intersection des tendances basse fréquence et haute fréquence des spectres de déplacement FFT des ondes P et S rayonnées lors de phénomènes de cisaillement.

Géophysique : Branche des géosciences visant l'étude de la Terre par les méthodes et les outils de la physique.

Géotomographie : Imagerie tomographique utilisée en géophysique dans le but d'étudier la croûte terrestre.

Homogène : Milieu dans lequel les propriétés sont identiques en tous les points.

Hypocentre : Point géométrique où la rupture se déclenche et d'où les premières ondes P sont rayonnées.

Imagerie tomographique : Production par tomographie d'une image d'une propriété à l'intérieur d'un objet.

Isotrope : Qualité d'un milieu qui présente les mêmes propriétés ou réactions physiques dans toutes les directions.

Localisation de la source : Équivalent de l'hypocentre, c'est-à-dire le point de déclenchement de la rupture.

Magnitude : Estimation de l'ampleur d'un événement, habituellement calculée en fonction de l'amplitude maximale d'une onde sismique à une fréquence particulière.

Magnitude du moment : Estimation de l'ampleur d'un événement basée sur son moment sismique.

Magnitude de Nuttli : Magnitude basée sur l'amplitude maximale des ondes sismiques à une échelle logarithmique, utilisée lors d'événements sismiques dans la partie est de l'Amérique du Nord.

Mécanisme au foyer (mouvement le long d'une faille) : Diagramme de rayonnement relatif à une source à double couple, consistant en deux quadrants de dilatation et deux quadrants de compression.

MLTWA (Multiple Lapse Time Window Analysis) : Méthode de mesure permettant d'évaluer l'importance relative de l'atténuation intrinsèque et de l'atténuation par dispersion d'une onde sismique.

Modèle cinématique : Modèle décrivant un mécanisme de rupture par cisaillement dans lequel il est tenu compte de la chronologie de la dislocation le long de la faille (p. ex., modèle de Brune).

Modèle de vitesse : Modèle de la distribution des vitesses sismiques à l'intérieur du massif rocheux utilisé pour la localisation des sources.

Modèle homogène : Modèle décrivant un mécanisme de rupture par cisaillement, dans lequel il y a relâchement homogène des contraintes le long de la faille lorsque la rupture est achevée.

Modèle hétérogène : Modèle décrivant un mécanisme de rupture par cisaillement, dans lequel le relâchement des contraintes le long de la faille n'est pas homogène lorsque la rupture est achevée.

Modèle quasi-dynamique : Modèle décrivant un mécanisme de rupture par cisaillement dans lequel la vitesse de rupture le long de la faille a été supposée et la chronologie de la dislocation est calculée à l'aide de cette valeur supposée (par ex., modèle de Madariaga).

Onde S : Second type d'onde de volume, aussi appelée onde de cisaillement, transversale, rotationnelle ou secondaire. Le dernier nom signifie que ce type d'onde arrive généralement après les ondes primaires d'un séisme.

Onde SV : Composante d'une onde S découplée polarisée dans un plan vertical et perpendiculaire au rai sismique.

Onde P : Premier type d'onde de volume aussi appelée onde de dilatation, de compression, longitudinale, irrotationnelle ou primaire. Le dernier nom signifie que ce type d'onde est généralement le premier enregistré à la suite d'un séisme.

Onde SH : Composante horizontale d'une onde S découplée.

Ondes de volume : Ondes mécaniques qui se propagent dans un milieu infini. Elles sont de deux types : les ondes P et les ondes S.

Paramètres de la source : Paramètres sismiques, calculés dans les domaines temporel et fréquentiel, caractérisant les propriétés de la source sismique.

Phénomène précurseur : Anomalie de la sismicité avant un séisme important. Ce phénomène peut être modélisé à l'aide de modèles de nucléation ou de dilatance.

Plans nodaux : Deux plans orthogonaux séparant les quadrants de dilatation et de compression dans un mécanisme au foyer. L'un de ces plans correspond au *plan de faille* réel, l'autre est appelé *plan auxiliaire.*

Polarisation : Mouvement des particules dans un milieu lors du passage d'une onde sismique.

Porosité : Paramètre définissant l'indice des vides dans les roches et autres matériaux.

Prédiction (physique) des séismes : Prédiction du lieu, de l'ampleur et de l'heure d'un séisme. Selon l'information principale considérée, on parle de prédiction statistique et de prédiction tectonique. Selon la période visée, la prédiction est dite à court terme, à moyen terme ou à long terme.

Processus de rupture autosimilaire : Processus de rupture sous-entendu dans un modèle de chute de contrainte constante, c'est-à-dire que les événements sismiques se produisent de la même manière, mais le long de zones de rupture de différentes tailles.

Rejet d'une faille : Phénomène causé par un glissement le long d'une faille préexistante.

Relations de proportionnalité : Relations entre des estimations de l'ampleur d'une source et ses dimensions.

Résiduelles : Différences entre les temps d'arrivée des ondes P et S calculés et observés, depuis une source sismique jusqu'aux capteurs. Cette notion est utilisée dans les techniques de localisation des sources.

Risque sismique : Risque associé à une sismicité potentielle en un point donné de la Terre.

Simplex : Figure géométrique comportant un sommet de plus que les dimensions de l'espace à étudier.

Sismicité : Production d'événements sismiques en raison des mouvements de la croûte terrestre.

Sismicité induite : Sismicité causée par l'activité humaine, c'est-à-dire non directement provoquée par des processus naturels (par ex., exploitation minière, fonçage de tunnels, injection de fluide/extraction, barrages, etc.)

Sismicité induite par l'exploitation minière : Sismicité provoquée par les activités minières.

Sismogramme : Forme d'onde enregistrée par un capteur à la suite d'un événement sismique.

Sismologie : Étude des séismes. Cette science comporte différentes branches : sismologie des tremblements de terre, sismologie minière, sismologie d'exploration, etc.

Source (ou foyer) : Zone de rupture associée à un événement sismique.

Spectres de déplacement : Spectres de déplacement FFT des ondes P et S rayonnées.

Systèmes sismographiques : Systèmes d'acquisition de données habituellement utilisés pour enregistrer une sismicité de magnitude supérieure à 2,5.

Systèmes macrosismiques : Systèmes d'acquisition de données habituellement utilisés pour enregistrer une sismicité dans l'échelle de magnitude de 0 à 3.

Systèmes microsismiques : Systèmes d'acquisition de données habituellement utilisés pour enregistrer une microsismicité dans l'échelle de magnitude de -4 à 0.

Systèmes haute fréquence : Systèmes portables d'acquisition de données utilisés habituellement pour la surveillance des émissions acoustiques dans l'échelle de magnitude de -6 à -3.

Technique de reconstruction algébrique (TRA) : Technique itérative utilisée en tomographie dans laquelle un modèle initial est progressivement modifié jusqu'à ce qu'il y ait convergence vers une solution.

Technique de reconstruction itérative simultanée (TRIS) : Processus itératif dans lequel un modèle initial est progressivement modifié jusqu'à ce qu'il y ait convergence vers une solution.

Techniques de localisation de la source : Techniques utilisées pour déterminer les hypocentres. Elles sont de deux types : les méthodes directes (par ex., la méthode du USBM) et les méthodes itératives (par ex., la méthode de Geiger et la méthode Simplex).

Tomographie par transmission : Technique d'imagerie tomographique dans laquelle les ondes sont transmises directement des sources à des capteurs placés sur le périmètre d'un objet.

Tomographie par diffraction : Imagerie tomographique effectuée à l'aide d'ondes dispersées par des discontinuités à l'intérieur d'un objet.

Tomographie : Reconstruction d'une propriété à l'intérieur d'un objet, dans une coupe transversale ou dans un volume, par enregistrement, sur le périmètre de l'objet, d'ondes qui le traversent et application subséquente de techniques d'inversion.

Symboles

A	Aire de la source sismique
A_1, A_2	Amplitude de l'onde aux points 1 et 2
C	Vitesse d'une onde P ou S
C_p	Vitesse d'une onde P
C_s	Vitesse d'une onde S
f	Fréquence
f_0	Fréquence-coin
f_1, f_2	Limites basse et haute fréquences de la largeur de la bande spectrale
F_C	Coefficient de rayonnement des ondes P ou S
f_{max}	Limite de fréquence maximale du spectre sismique
J_C	Flux d'énergie
M	Magnitude du moment
M_0	Moment sismique
M_L	Magnitude sur l'échelle de Richter
m_N	Magnitude sur l'échelle de Nuttli
M_S	Magnitude calculée à partir des ondes de surface
M_A	Magnitude calculée à partir de l'accélération maximale
M_D	Magnitude calculée à partir de la durée du coda
Q	Facteur de qualité des ondes P ou S
r_0	Rayon de la source (rayon d'une source circulaire plane)
R	Distance entre la source et le capteur
R_C	Effet de surface libre
u	Rejet moyen sur le plan de faille
α	Paramètre d'atténuation
$\Delta\sigma$	Chute de contrainte statique
λ	Constante de Lamé
μ	Module de cisaillement (ou module de rigidité) de la roche
ρ	Densité de la roche
σ_d	Chute de contrainte dynamique
σ_{rms}	Chute de contrainte quadratique moyenne
Ω_0	Plateau des basses fréquences
ω	Fréquence angulaire ($= 2\pi f$)