

Technique d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrifère lorrain

G. SENFAUTE

Institut national
de l'environnement
industriel et des risques
(INERIS), 54042 Nancy

M. ABDUL WAHED

Laboratoire Environnement
Géomécanique et Ouvrages
(LAEGO), École des mines
de Nancy, 54042 Nancy
CEA de Syrie
Damas B.P. 6091 Syrie

J.-P. PIGUET

Laboratoire Environnement
Géomécanique et Ouvrages
(LAEGO), École des Mines
de Nancy, 54042 Nancy

J.-P. JOSIEN

GEODERIS
15, rue Claude-Chappe
BP 95308, 57071 Metz

Résumé

Les bruits émis lors de la rupture des terrains constituent des indices d'initialisation d'un effondrement. La validation de la technique d'écoute microsismique de ces bruits a été effectuée au moyen d'une expérimentation dans une mine de fer en activité. L'expérimentation a consisté à enregistrer, à la surface, les signaux microsismiques correspondant aux ruptures et aux éboulements locaux provoqués au fond de la mine par la destruction volontaire des piliers. Les opérations de dépilage et le foudroyage du toit ont été systématiquement corrélés à une série d'événements microsismiques. L'expérimentation a permis de valider la technique d'écoute microsismique comme moyen de détection des signes précurseurs de la manifestation en surface d'un effondrement, de démontrer l'efficacité de la technique et d'étalonner les paramètres principaux d'un dispositif d'écoute microsismique adapté à la détection et à la surveillance des zones à risque d'effondrement.

Mots-clés : écoute microsismique, effondrement, torpillage, dépilage.

Microseismic monitoring technique applied to the risk of collapse in lorraine iron mines

Abstract

Experiments carried out in a working iron mine validated the microseismic monitoring technique as a means of detecting fracture noise emissions regarded as signals indicating an incipient collapse. In the experiment surface recordings were made of the microseismic signals corresponding to fractures and local collapse phenomena generated at the mine bottom by deliberately destroying pillars. The pillar removal operations and the collapse of the roof were systematically correlated with a series of microseismic events. The experiment served to validate the microseismic monitoring technique as a means of detecting surface precursors of a collapse, to demonstrate the effectiveness of the technique, and to calibrate the principal parameters of a microseismic monitoring system adapted to detection and monitoring in areas where there is a risk of collapse.

Key words : microseismic monitoring, collapse, torpedoing, robbing of pillars.

NDLE : Les discussions sur
cet article sont acceptées
jusqu'au 1^{er} juillet 2001

Introduction

Le bassin ferrifère lorrain s'étend entre les villes de Luxembourg, au nord, et de Nancy, au sud. Le gisement de minerai de fer, d'âge aalénien et d'origine sédimentaire se situe dans les calcaires oolithiques de l'Aalénien, insérés entre les formations marneuses du Lias et les calcaires du Dogger (Jurassique moyen). Ce gisement est quasi horizontal avec un pendage moyen régulier de 3 % et une épaisseur moyenne de 30 m (Fig. 1). Les roches stériles situées au-dessus de la formation ferrifère, appelées « morts-terrains » ont une épaisseur moyenne de 150 m. Les mines les plus profondes du bassin ont exploité le minerai jusqu'à près de 300 m de profondeur.

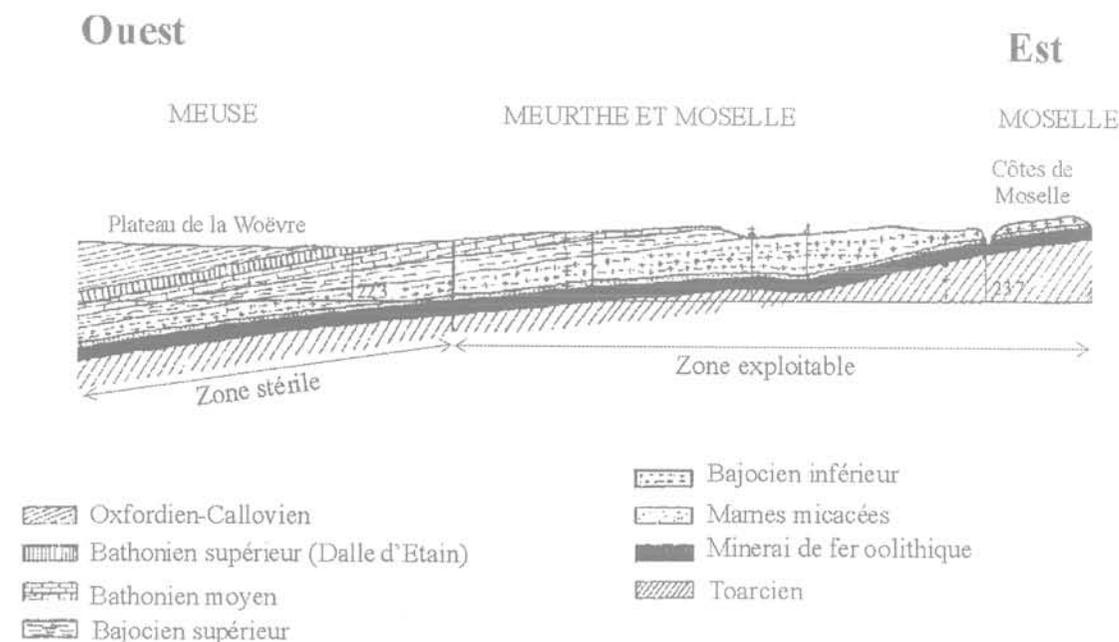


FIG. 1 Coupe géologique simplifiée du recouvrement du bassin ferrifère lorrain.
Simplified geological section of the Lorraine iron ore basin.

monitore d'un risque. Cependant, ces méthodes ne renseignent que sur le comportement local des secteurs instrumentés. Aucune surveillance globale, à l'échelle de l'ensemble de la mine et des terrains environnants, ne semble exister jusqu'à présent.

C'est pourquoi nous avons entrepris une recherche dont l'objectif est de valider la technique d'écoute microsismique pour détecter les bruits émis lors de la rupture de terrains qui constituent les prémices et/ou les premières indications du déclenchement d'un processus d'effondrement (rupture des piliers au fond, puis du toit immédiat, et enfin du recouvrement). La validation de cette technique a été effectuée dans le cadre d'une expérimentation réalisée dans la dernière mine de fer en activité (mine des Terres Rouges de l'Arbed). Cette expérimentation a consisté à détecter et

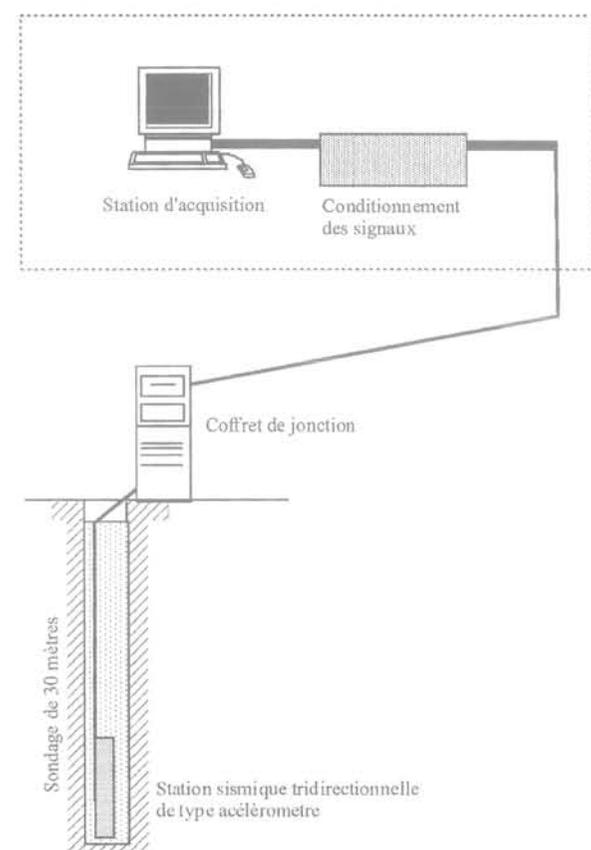
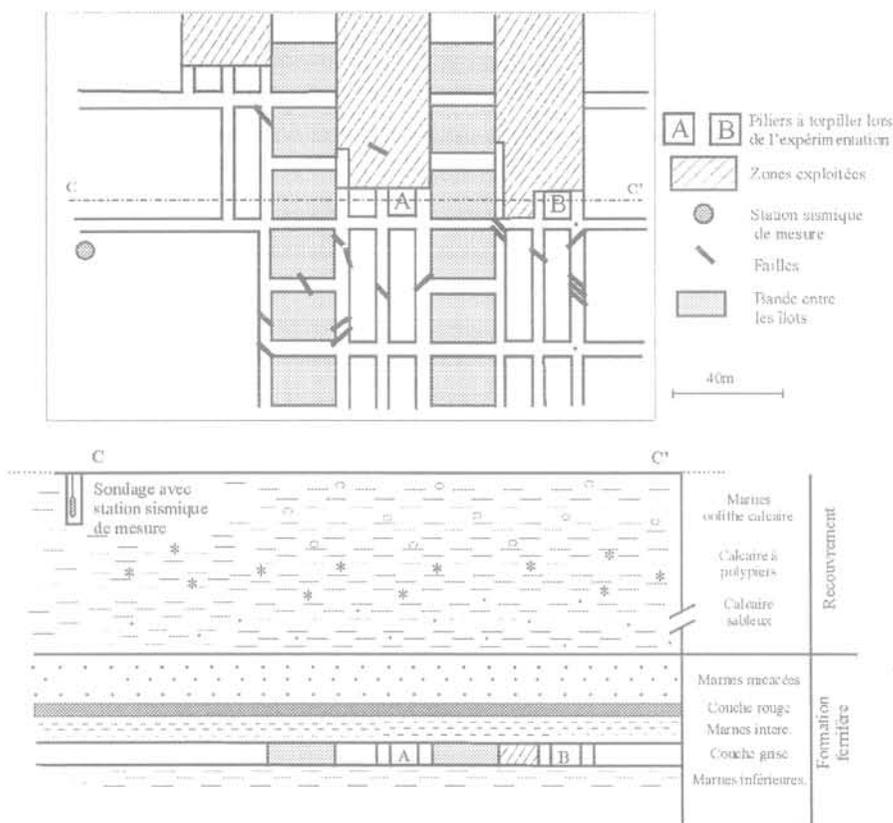
L'exploitation a été effectuée par dépilage et torpillage des piliers résiduels entraînant le foudroyage du toit sur la plus grande partie du gisement. Par contre, à l'aplomb des zones à protéger (habitations et infrastructures de surface), des méthodes d'exploitation partielle étaient pratiquées : chambres et piliers abandonnés, îlots séparés par des piliers longs. Cependant, dans ces zones, des phénomènes d'effondrement plus ou moins brutaux se sont produits plus ou moins longtemps après l'arrêt des travaux miniers, le plus souvent en raison de la rupture de piliers résiduels abandonnés (Piguet *et al.*, 1999 ; Vinkler et Piguet, 1999).

La technique d'écoute microsismique est aujourd'hui utilisée dans différents contextes : sismicité induite par les travaux d'extraction dans les mines en activité (Senfaute *et al.*, 1994, 1997, 1999), injection de fluides, géothermie (Moriya H., Niitsuma H., 1996), exploitation des hydrocarbures ainsi que pour la surveillance de stockages souterrains ou d'installations sensibles. Dans le cas des mines de fer abandonnées, soumises à des risques d'effondrements brutaux et inattendus affectant la surface, les techniques de surveillance en usage jusqu'à présent reposent sur les mesures de déformation (convergence, expansion) et la détection de leurs accélérations comme indication pré-

enregistrer en surface les signaux microsismiques correspondant à des événements apparaissant en profondeur et concomitants aux ruptures et effondrements locaux provoqués volontairement dans la mine par la destruction à l'explosif (torpillage) de certains piliers.

Présentation de l'exploitation et du système d'écoute microsismique

Dans les mines de fer de Lorraine, la méthode d'exploitation systématique consistait à découper, par des galeries d'extraction (traçage et dépilage), le gisement en panneaux, eux-mêmes découpés en piliers de géométrie carrée ou parallépipédique avec des dimensions d'ordre plurimétrique. Dans le cas des exploitations totales, les dimensions de ces piliers étaient progressivement réduites puis ils étaient abattus à l'explosif. Cette opération dite de « torpillage des piliers » prévoyait de provoquer l'effondrement des couches du toit de la mine, appelé « foudroyage ».



Lorsqu'il était jugé nécessaire de protéger les infrastructures de surface (villes, routes, voies ferrées, etc.) les méthodes pratiquées consistaient alors, soit à laisser en place un certain nombre des piliers (méthode dite « des piliers abandonnés »), soit à limiter les dimensions des panneaux (méthode dite des « îlots »).

La géométrie de l'unité d'exploitation suivie par écoute microsismique est présentée figure 2. Dans cette unité d'exploitation, l'épaisseur du recouvrement est d'environ 210 m, la largeur des îlots est de 40 m, la largeur des bandes entre les îlots de 30 m et la hauteur des bandes entre les îlots de 4 m. La station microsismique est positionnée à 30 m de profondeur sous la surface du sol dans un forage vertical implanté à environ 240 mètres du pilier A et à environ 300 m du pilier B (Fig. 2). La station microsismique est une station tridirectionnelle qui utilise trois accéléromètres monodirectionnels disposés orthogonalement avec une bande passante de 2 à 2300 Hz et une sensibilité de 500 mV/g. L'acquisition des signaux est réalisée par un ordinateur local à une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz (Fig. 3).

3

Événements microsismiques enregistrés

Le dispositif microsismique installé en surface, lors des opérations de dépilage et torpillage des piliers au fond de la mine, est resté en écoute pendant 34 jours. Pendant cette période, 260 événements microsismiques ont été enregistrés. Ces événements ont été classés en trois types en fonction de leur concomitance avec les opérations réalisées et/ou les observations constatées au fond de la mine :

- classe 1 : événements associés aux tirs de torpillage de piliers et/ou des chantiers de creusement des galeries de traçage ou dépilage ;

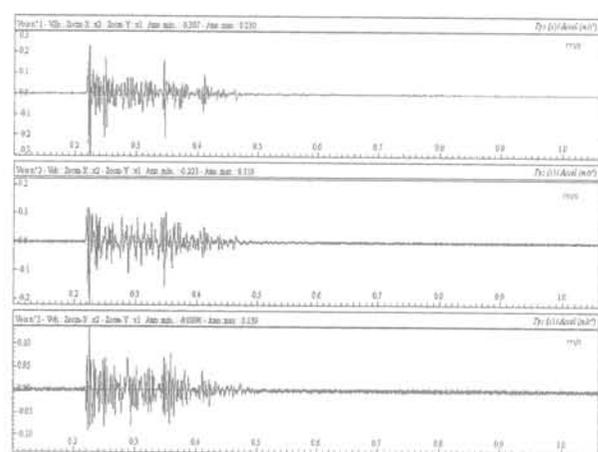
– classe 2 : événements associés aux ruptures du toit immédiat, lors du processus de foudroyage des terrains du toit ;

– classe 3 : événements associés aux ruptures hors foudroyage du toit.

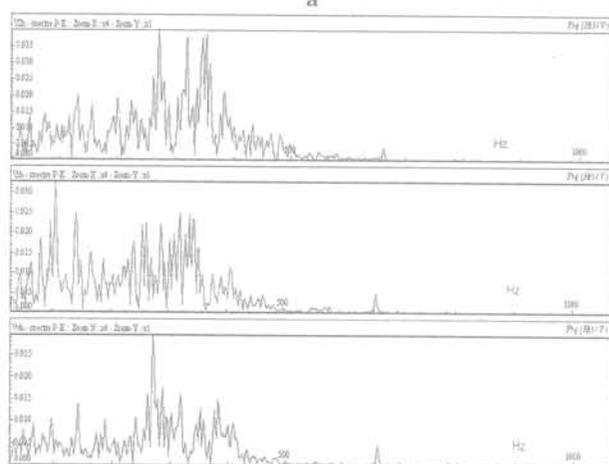
L'identification des événements de la classe 1 est réalisée avec le relevé de l'heure à laquelle le tir a été effectué, ils sont concomitants des tirs. Les événements de la classe 2 sont définis comme concomitants d'effondrements totaux ou localisés du toit (foudroyage), consécutifs au torpillage des piliers. L'expérience a montré que le foudroyage peut être immédiat ou décalé de quelques heures à quelques jours après le tir de torpillage. La troisième classe d'événements correspond à des événements nombreux mais relativement isolés. Ils surviennent hors des heures de tirs de dépilage ou traçage et hors du foudroyage du toit. Le tableau I donne la répartition des enregistrements réalisés durant toute la période d'écoute microsismique.

Événements microsismiques associés aux tirs

Toutes les vibrations provoquées par les tirs effectués lors des opérations d'exploitation et localisées à 300 m de la station sismique ont été systématiquement enregistrées par le dispositif d'écoute sismique. Les signaux enregistrés sont de très forte amplitude, ce qui induit une saturation du signal. La fréquence maximale des signaux est d'environ 300 Hz avec des pics qui vont jusqu'à environ 500 Hz (Fig. 4). D'autres tirs localisés dans des chantiers plus lointains situés à environ 600 mètres de la station d'écoute ont aussi été enregistrés. La fréquence maximale de ces événements est plus faible, inférieure à 100 Hz (Fig. 5). Enfin, des tirs localisés à environ 900 m de la station d'écoute n'ont pas été détectés par le système.



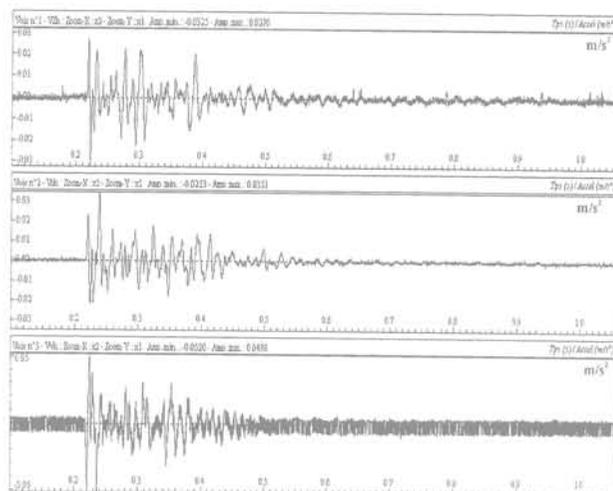
a



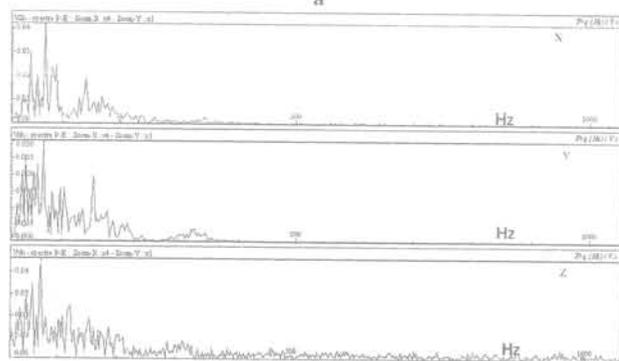
b

FIG. 4 Exemple des signaux sismiques enregistrés lors d'un tir effectué à 300 m de la station d'écoute sismique placée en surface. a – sismogrammes selon X, Y, Z des accélérations (m/s^2) ; b – spectres en fréquence.

Examples of seismic signals recorded during blasting operations some 300 m from the seismic monitoring station on the surface. a – seismogramme according to X, Y, Z of accelerations (m/s^2); b – frequency spectra.



a



b

FIG. 5 Exemple des signaux sismiques enregistrés lors d'un tir effectué à environ 600 m de la station d'écoute sismique placée en surface. a – sismogrammes selon X, Y, Z des accélérations (m/s^2) ; b – spectres en fréquence.

Examples of seismic signal recorded during blasting operations some 600 m from the seismic monitoring station on the surface. a – seismogramme according to X, Y, Z of accelerations (m/s^2); b – frequency spectra.

TABEAU 1 Événements microsismiques totaux enregistrés lors de la période d'écoute.
Total microseismic events recorded during the monitoring period.

Classe 1	Classe 2	Classe 3
Événements sismiques concomitants des tirs	Événements sismiques concomitants du foudroyage	Événements sismiques enregistrés hors foudroyage et tirs
26	66	168

3.2

Événements microsismiques associés aux ruptures du foudroyage

Le foudroyage du toit consécutif au torpillage des piliers A et B (Fig. 3) a généré 66 événements microsismiques.

Ces événements se caractérisent par une arrivée en rafale, c'est-à-dire, des événements nombreux enregistrés dans un court laps de temps nettement décalé de la fin des tirs. La signature temporelle des signaux et le contenu spectral de ces événements sont nettement différents de ceux associés aux tirs. Ce sont des événements très courts avec des pics de fréquence maximale entre 300 et 400 Hz (Fig. 6).

3.2.1

Foudroyage consécutif au torpillage du pilier A

Une série d'événements microsismiques a été enregistrée dans la minute qui a suivi le dernier tir de torpillage, correspondant à la suppression du pilier. Les observations effectuées au fond de la mine ont attesté de l'occurrence du foudroyage immédiatement après le tir de torpillage. Elles permettent d'associer les événements microsismiques enregistrés avec les ruptures générées par l'arrivée du foudroyage.

3.2.2

Foudroyage consécutif au torpillage du pilier B

La configuration de ce pilier est différente de celle de la zone A. Le pilier B est à environ 6 m d'un pilier déjà torpillé et de la zone foudroyée correspondante. Cette configuration implique que les dimensions de la cloche d'éboulement de ce pilier soient plus importantes que celles qui ont été associées au pilier A. Cette nouvelle cloche de foudroyage irait rejoindre la cloche de foudroyage du pilier voisin.

Au moment du torpillage du pilier B, aucun événement microsismique (en dehors des tirs) n'a été enregistré. Les observations au fond de la mine ont confirmé l'absence d'effondrement ou de foudroyage après les tirs de torpillage du pilier. Des nouveaux tirs ont été effectués 24 heures plus tard, sans foudroyage immédiat. Une rafale d'événements a été enregistrée 7 heures après cette dernière série de tirs (20 événements microsismiques en 40 minutes). Les vérifications au fond de la mine ont permis de constater que ces événements étaient concomitants avec une partie du foudroyage du toit. Les observations montraient toutefois que le foudroyage n'était pas complet. Une nouvelle rafale d'événements, plus importante que la précédente (40 événements microsismiques en une heure) a été enregistrée 16 heures après ce premier foudroyage partiel. Les vérifications effectuées au fond de la mine ont permis de constater que ces événements étaient associés à l'occurrence d'un deuxième foudroyage. Après le déclenchement de cette deuxième rafale d'événements, aucun autre événement n'a été enregistré tandis que le foudroyage cessait de se développer.

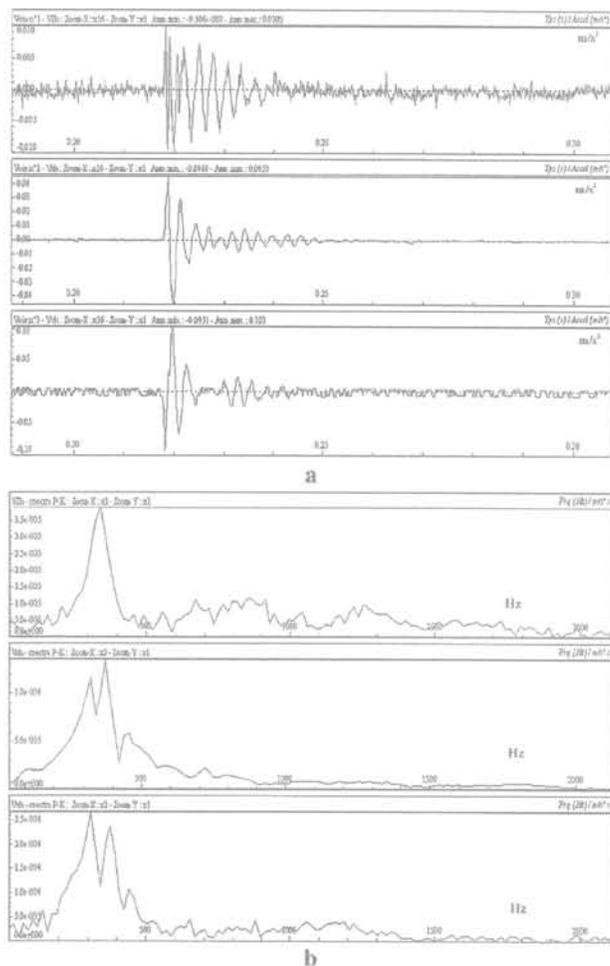


FIG. 6 Exemple de signaux sismiques enregistrés lors du foudroyage du toit. On peut constater la différence avec la signature des événements sismiques associés aux tirs (cf. Figs. 4 et 5). a – sismogrammes selon X, Y, Z des accélérations (m/s²); b – spectres en fréquence.

Examples of seismic signals recorded during the collapse of the roof. The difference with the signature of the seismic events associated with blasting can be clearly seen (see Fig. 4 and 5). a – seismogramme according to X, Y, Z of accelerations (m/s²); b – frequency spectra.

Événements microsismiques associés aux ruptures hors foudroyage sensu strict du toit

Ces événements se caractérisent par leur enregistrement exclusivement hors des heures de tir et hors du foudroyage constaté des toits. Ces événements ne se présentent pas en rafale, ils sont isolés dans le temps et arrivent à n'importe quel moment. La signature et le contenu spectral sont similaires aux événements associés au foudroyage. Ces événements ont été interprétés comme des réajustements différés dans le massif rocheux au voisinage de la zone exploitée (ruptures internes du toit ou des piliers qui restent confinés, sans manifestations visibles dans les galeries).

Sensibilité du système de surveillance par rapport aux événements sismiques enregistrés

Compte tenu de la gamme de fréquence des événements survenus au fond de la mine et de celle des capteurs mis en place pour les détecter et les enregistrer, il est apparu qu'aucun événement associé à des tirs survenus à une distance supérieure à 900 m n'a été détecté par la station microsismique utilisée. En revanche, tous les tirs survenus à une distance inférieure à 600 m ont été détectés par la station sismique.

D'autre part, les ruptures constatées du massif se produisant au niveau des couches exploitées à une distance d'environ 300 m de la station sismique ont été détectées et ont déclenché l'enregistrement de signaux sismiques interprétables. C'est pourquoi le rayon de sensibilité du système a été fixé à 300 m en première approximation.

RÉMÉRIEMENTS

Les auteurs remercient les sociétés LORMINES et ARBED ainsi que le ministère de l'Industrie pour le financement apporté dans la réalisation de cette expérimentation. Nous remercions particulièrement la direction et le personnel de la mine des Terres Rouges de l'ARBED pour l'appui qu'ils nous ont apporté dans la réalisation de l'étude sur le site.

Bibliographie

- Moriya H., Niitsuma H. – « Doublet analyses for characterizing regional structures in three-component microseismic measurements ». The 6th conference on AE/MA in Geological Structures and Materials, 1996.
- Piguet J.-P., Josien J.-P., Kouniali S., Bigarré P., Vouille G. – « The contribution of rock mechanics for long term risk assessment and management in abandoned mines. The case of iron mines in Lorraine ». 9th International Congress of Rock Mechanics, Paris, Balkema, 1999, p. 317-323.
- Senfaute G., Bigarré P., Josien J.-P., Mathieu E. – « Real-time microseismic monitoring : Automatic wave processing and multilayered velocity model for accurate event location ». *Rock Mechanics in Petroleum Engineering, EUROCK'94*, Delf (Netherlands) Balkema, 1994, p. 631-638.
- Senfaute G., Chambon C., Bigarré P., Guise Y., Josien J.-P. – « Spatial Distribution of Mining Tremors and the Relationship to Rockburst Hazard ». *Pure and Applied Geophysics*, vol. 150, Basel, Birkhäuser Verlag, 1997, p. 451-459.
- Senfaute G., Al-Heib M., Josien J.-P., Noirel J.-F. – « Detection and monitoring of high stress concentration zones by numerical and microseismic methods ». *9th International Congress of Rock Mechanics*, Paris, Balkema, 1999, p. 1065-1070.
- Tincelin E. – « Pressions et déformations de terrains dans les mines de fer de Lorraine ». Thèse à la Faculté des Sciences de l'Université de Nancy, 1958, 283 pages.
- Vinkler F., Piguet J.-P. « Analysis of the long term stability of an ancient room and abandoned pillar mine. Impact of the water level ». *FLAC Symposium on Numerical Modeling in Geomechanics*, Minneapolis, Itasca Ed., 1999, p. 245-253.

Conclusion

Les opérations de défilage effectuées au fond de la mine et, en particulier, les ruptures du foudroyage du toit ont été corrélées sans ambiguïté à une série caractéristique d'événements microsismiques enregistrés par une station sismique tridirectionnelle placée en surface. Les événements microsismiques associés aux ruptures du foudroyage du toit sont des événements très courts avec des pics de fréquence maximale entre 300 et 400 Hz. D'autres événements, produisant des signaux analogues à ceux du foudroyage du toit mais plus isolés dans le temps ont été interprétés comme des réajustements différés dans le massif rocheux.

L'expérimentation a permis de faire la démonstration de la validité de la technique d'écoute microsismique comme moyen de détection des signes plus ou moins précurseurs d'un processus d'effondrement limité du toit, avant que le phénomène ne soit répercuté en surface, de démontrer l'efficacité de la technique et de préciser les paramètres principaux d'un dispositif d'écoute microsismique adapté à la détection et à la surveillance des zones à risque d'effondrement dans le bassin ferrifère lorrain.

Une première application a été mise en œuvre sur les villes de Jœuf et Homécourt. Le sous-sol de ces villes est entièrement sous-cavé par des travaux miniers aujourd'hui abandonnés. Un dispositif de surveillance microsismique continue a été installé sur ce site et sur la base des résultats de ces essais de qualification préliminaires pour la surveillance d'une zone estimée particulièrement critique, une procédure de dépouillement et d'alarme a été établie. Depuis, d'autres installations d'écoute microsismique ont été mises en place dans le bassin ferrifère lorrain, dans des zones où les risques d'effondrement sont apparus importants.