

Détection et surveillance des zones surcontraintes par des méthodes sismo-numériques

Detection and monitoring of high stress concentration zones by numerical and microseismic methods

Erfassung und Überwachung von Hochdruckzonen mittels seismischen und digitalen Verfahren

G. SENFAUTE, M. AL-HEIB & J. P. JOSIEN, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages (LAEGO), Ecole des Mines, Nancy, France
J. F. NOIREL, Houillères du Bassin de Lorraine, Freyming Merlebach, France

RESUME : La détection et la surveillance de zones surcontraintes induites par l'exploitation de charbon à 1250 mètres de profondeur aux Houillères du Bassin de Lorraine sont effectuées à partir d'un couplage entre les méthodes numérique et microsismique. L'estimation des modifications de l'état de contraintes induites par l'exploitation est réalisée par des simulations numériques. La localisation et la surveillance des zones surcontraintes sont effectuées par des réseaux microsismiques locaux. L'étude de l'activité microsismique enregistrée lors de l'exploitation a permis de localiser les zones surcontraintes et de valider les calculs effectués par modélisation numérique. Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives intéressantes en ce qui concerne le couplage de la modélisation numérique et de l'écoute microsismique comme moyen de détection, de localisation et de surveillance des zones à risque de phénomènes dynamiques.

ABSTRACT : Detection and monitoring of high stress concentration zones induced by coal mining at a depth of 1250 meters in Lorraine Collieries, are carried out by coupling numerical and microseismic methods. Estimation of changes of state of stresses induced by coal mining is carried out by using of numerical modelling. Location and monitoring of high stress concentration zones are obtained by a local microseismic network. The study of microseismic activity recorded during coal mining made it possible to locate high stress concentration zones and to validate results from numerical modelling. The results of this study open interesting prospects with regards to coupling numerical and microseismic methods as a means of detection, location and monitoring of the zones prone to rockbursts.

ZUSAMMENFASSUNG : Die Erfassung und Überwachung entsehender Hochdruckzonen bei der Kohलगewinnung, in einer Teufe von 1250 Meter im Lothringer Kohlengebiet, wird mittels Zusammenkopplung microseismischer und numerischer Methoden ausgeführt. Die durch die Gewinnung hervorgerufene Änderung der Spannungslage wird über digitale Simulation bewertet. Gebiete mit hohen Spannungen werden mittels lokaler microseismischer Abhörungsnetze begrenzt und überwacht. Die Untersuchung der microseismischer Aktivität während des Kohlenabbaus hat es erlaubt solche Gebieten zu lokalisieren und die digitalen Berechnungen zu bestätigen. Die Resultate dieser Arbeit stellen hoffnungsvolle Möglichkeiten im Bereich der Zusammenkopplung numerischer Modelle und microseismischer Abhörnung als Mittel für Erfassung, Begrenzung und Überwachung gebirgsschlagempfindlicher Gebiete dar.

1. EXTENDED SUMMARY

1.1 Introduction

The mining operations that cause a disturbance in the rock mass equilibrium state and induce changes in the state of stress are at the origin of significant microseismic activity. Some of this microseismic activity is associated with rockbursts. Authors elaborated a methodology, based on numerical modelling on a large scale, for the detection of high stress concentration zones. In the present study, numerical modelling is coupled with microseismic monitoring to detect and monitor the high stress concentration zones induced by coal mining. Data comes from the excavation of the Irma panel located at a depth of 1250 m within the Lorraine collieries areas, France.

1.2 Numerical modelling

The calculation of the high stress concentration zones is carried out by numerical modelling with the software SUIT3D, based on the boundary elements method. This code is applied to the problems involving the calculation of the stress in the rock masses (stress-strains) in the case of mining by long caving faces and the room and pillar methods. It also makes possible to integrate in the

calculations, without any limitations, all the panels influencing a given sector. The first set of numerical modelling used to identify the high stress zones was carried out on the Irma panel before any mining operations had taken place. It showed two high stress zones: one located in the pillar zone and the other in the area of older adjacent worked panels. The stress level predicted was around 1,2 times the initial stress (figure 3a). The second set of numerical modelling was carried out to determine the evolution of the high stress zones after the beginning of mining operations on the panel. These results have shown that after a 630 metres advance (the working face being level of the pillar), the stress in the pillar zone increased. This new stress level was about 1,7 to 1,9 times the initial stress (figure 3b).

1.3 Microseismic monitoring

The location and monitoring of high stress concentration zones, identified by numerical modelling, are obtained with a local microseismic network installed underground and in the vicinity of the mining of the Irma panel. The microseismic network consists of 16 vertical sensors of geophone type with a flat response from 14 to 500 Hz. The acquisition of the signals is carried out by a computer at a sampling rate of 3 kHz. A total of 34 375 microseismic events were recorded at the first 1000 meters of the working panel. The

seismic events were located beyond and behind the working face. The small microseismic events, of a magnitude lower than 1,5 (99% of the recorded seismic events) appeared throughout the whole mining process. On the other hand, the stronger events, of a magnitude higher or equal to 1,5 (1% of the recorded seismic events) were recorded as soon as the working face approached the pillar and were systematically located in the pillar zone. The analysis of the seismic energy released by the advance of the working face shows a strong change of the seismic mode in the zone of the pillar. This change is associated with the appearance of the stronger events, of a higher magnitude than or equal to 1,5.

1.4 Correlation between numerical modelling, microseismic monitoring and the high stress concentration zones

The numerical modelling showed that the zone of the pillar was a high stress concentration zone before any mining operations, and this stress zone significantly increased with the mining operations. The location of this high stress concentration zone, estimated by numerical modelling, was confirmed by the microseismic activity recorded during the mining process. The analysis of the seismic energy released during the advance of the working face showed a strong change of the seismic mode in the zone of the pillar. These changes are associated with the appearance of the strong seismic events. All strong seismic events of a magnitude higher or equal to 1,5 are located in the zone of the pillar (figure 6). It is observed that the locations of these seismic events coincide with the most important stress changes induced by the mining operations.

1.5 Conclusions

The control of the behaviour of the rockmass under difficult conditions of mining required the creation and use of a methodology based on numerical modelling and microseismic monitoring. Numerical modelling made it possible to identify the high stress zones induced by the working faces. The positions of these high stress zones are confirmed by both the location of the microseismic events and the study of released seismic energy. The strongest microseismic events recorded are located in this zone where the changes of stress estimated by numerical modelling are highest. The results of this study open interesting possibilities with regard to the coupling of numerical modelling and microseismic monitoring as a mean of detection, location and monitoring of the zones prone to rockbursts.

2. INTRODUCTION

Les Houillères du Bassin de Lorraine exploitent depuis la seconde moitié du 19ème siècle la plus importante ressource de charbon de l'est de la France à la limite de la frontière franco-allemande. La géologie du site minier est très complexe. Le gisement comporte deux anticlinaux faillés (Merlebach et Simon), séparés par un synclinal à flancs fortement dissymétriques (Marienau). Cette série est recouverte en discordance par la formation des grès vosgiens d'une épaisseur variable selon les endroits de 200 à 300 mètres (figure 1). Dans la zone étudiée, les veines de charbon exploitées se situent dans deux faisceaux : les flambants inférieurs et les flambants supérieurs.

L'exploitation minière perturbe l'état d'équilibre du massif rocheux. Elle induit en particulier une redistribution des contraintes qui s'effectue suivant le comportement rhéologique et mécanique du milieu et qui est à l'origine d'une activité microseismique importante (McGarr et al 1975, Kaneko et al 1990). Une partie de cette activité microseismique est associée à des phénomènes dynamiques (Ben

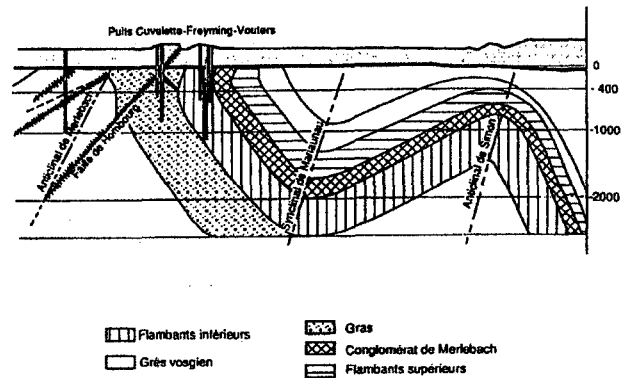


Figure 1 : Coupe géologique du bassin houiller lorrain

Slimane 1990, Senfaute 1994, Senfaute 1995). Les effets de ces phénomènes sont ressentis principalement au voisinage du front de taille et peuvent provoquer des dégâts au niveau des chantiers: éboulement de galerie, rupture violente de pilier, rupture de la couche de charbon. Des études ont été effectuées pour définir une méthodologie basée sur la modélisation numérique à grande échelle pour la prévision des zones surcontraintes (Al Heib et al., 1996, Josien et al., 1995). Dans la présente étude, la modélisation numérique est couplée à l'écoute microseismique pour détecter et surveiller les zones surcontraintes induites par l'exploitation. Elle est menée lors de l'exploitation du panneau Irma 1250 situé à une profondeur variant entre 1140 et 1250m aux Houillères du Bassin de Lorraine.

3. PRESENTATION DU CHANTIER

La veine Irma 1250 est exploitée par la méthode de la longue taille foudroyée. La largeur du front d'exploitation est de 290 mètres, la longueur totale de 1700 mètres. L'épaisseur de la couche est de 3 à 4 mètres et son pendage de 20°. L'exploitation de cette taille traverse 4 configurations différentes (figure 2) :

- configuration 1: le front d'exploitation est situé, pendant 535 mètres, à 180 mètres au-dessous d'anciens travaux de la veine Louise ;
- configuration 2: le front d'exploitation traverse une zone de stot de 195 mètres de large, appelée stot de Louise ;
- configuration 3: après le passage du stot de Louise, pendant 390 mètres, le front d'exploitation est situé à 180 mètres au-dessous d'anciens travaux en veine Louise et longe les vieux travaux d'une autre taille adjacente (taille Irma 1140) ;
- configuration 4: le front d'exploitation longe, pendant 580 mètres, les vieux travaux d'une taille adjacente (taille Irma 1140).

Cette étude est effectuée lors des 1000 premiers mètres d'exploitation de la taille Irma 1250 qui correspondent aux configurations 1, 2 et 3 (figure 2).

4. MODELISATION NUMERIQUE

L'estimation des zones surcontraintes est effectuée par modélisation numérique avec le code de calcul SUI3D (Al Heib et al, 1988) basé sur la méthode des éléments frontières (Linkov et al, 1997). Ce code effectue les calculs de pressions de terrains (contraintes-déformations) dans le cas des mines exploitées par la méthode des longues tailles foudroyées ou remblayées, et la méthode des cham-

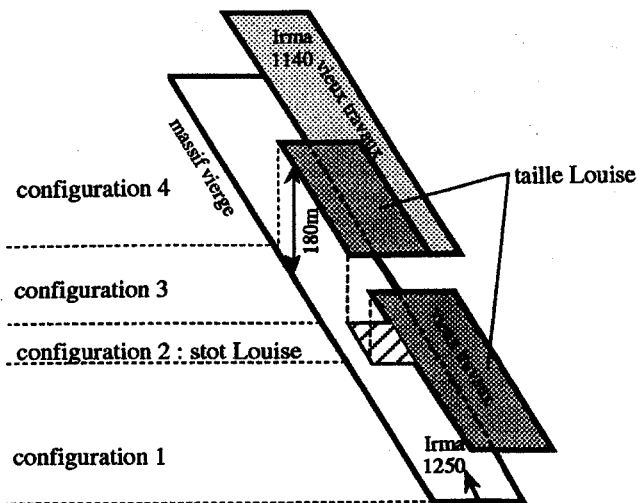


Figure 2: Configuration d'exploitation de la taille Irma 1250

bres et piliers. Il permet d'intégrer dans les calculs, sans limitation, l'ensemble des panneaux ou des veines influençant un secteur donné. La modélisation numérique effectuée à l'échelle de la taille Irma intègre l'ensemble des veines exploitées dans le secteur (4 veines). La modélisation a été réalisée en plusieurs phases correspondant aux différentes configurations d'exploitation de la taille (figure 2).

La première série de modélisations numériques est effectuée pour identifier les zones surcontraintes avant l'exploitation de la taille Irma 1250. Elle a montré deux zones surcontraintes: l'une correspond à la zone du stot de Louise et l'autre à une zone de culée de

contrainte des anciennes exploitations adjacentes. La contrainte normale est environ 1,2 fois la contrainte initiale (figure 3a). La deuxième série de modélisations numériques est effectuée pour déterminer l'évolution des zones surcontraintes après le démarrage de l'exploitation du panneau Irma 1250. Elle a montré qu'après 630 mètres d'avancement (le front d'exploitation est au niveau du stot de Louise), la zone de surcontrainte du stot s'étend et se caractérise par une forte augmentation de la valeur de la contrainte. Celle-ci est de l'ordre de 1,7 à 1,9 fois la contrainte initiale (figure 3b).

5. MISE EN PLACE D'UN RESEAU LOCAL D'ECOUTE MICROSISMIQUE

Pour localiser et surveiller les zones surcontraintes identifiées par la modélisation numérique, un réseau d'écoute microsismique local a été installé au fond et au voisinage de l'exploitation de la taille Irma 1250. Le réseau microsismique est constitué de 16 capteurs verticaux de type géophone (figure 4), et permet de surveiller la première partie de l'exploitation du panneau. Les géophones ont une fréquence propre de 14 Hz. La transmission des signaux s'effectue par l'intermédiaire de paires téléphoniques jusqu'à une station centrale d'acquisition et de traitement des données placée en surface. L'acquisition est effectuée par un ordinateur à une fréquence d'échantillonnage de 3 kHz. Dès qu'un événement est enregistré, un traitement automatique est effectué (calcul automatique de la localisation du foyer, de la magnitude et de l'énergie de l'événement).

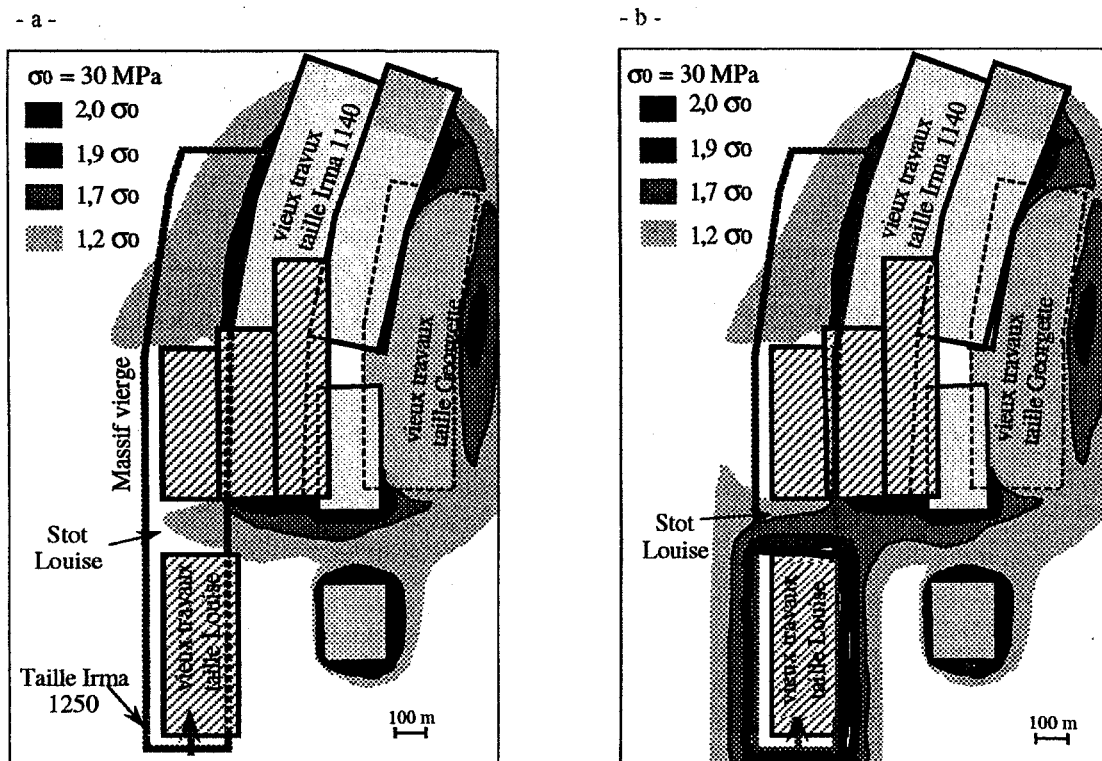


Figure 3 : a) Zones surcontraintes estimées par modélisation numérique avant l'exploitation de la taille Irma 1250
b) Zones surcontraintes normales estimées par modélisation numérique après 630 mètres de taille exploitée, le front d'exploitation est au niveau du stot de Louise.

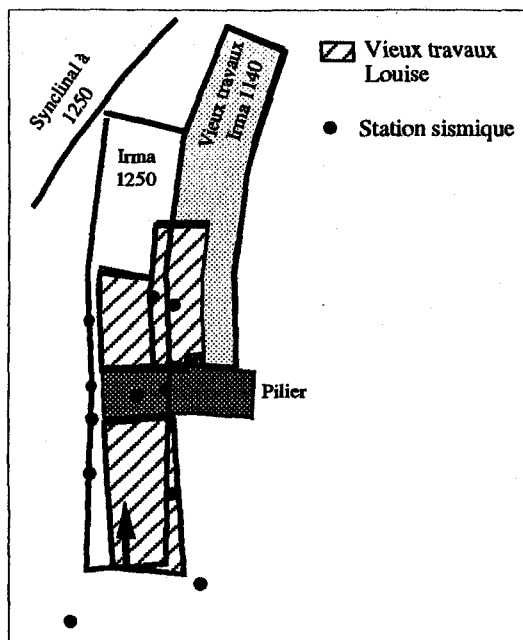


Figure 4 : Configuration du réseau microsismique installé lors de l'exploitation de la taille Irma 1250

6. ANALYSE DE L'ACTIVITE MICROSISMIQUE

6.1 Localisation des événements

Pour déterminer la vitesse de propagation des ondes sismiques adaptée à une localisation précise des foyers sismiques dans la zone d'étude, 6 tirs de calibrage ont été effectués. L'interprétation de cette série de tirs a fourni une vitesse de propagation de l'onde de l'ordre de 4700 m/s. La précision de la localisation des événements, obtenue avec ce modèle de vitesse, est de l'ordre de 20 mètres. Un total de 34375 événements microsismiques a été enregistré lors des 1000 premiers mètres d'exploitation de la taille. Les événements se localisent au voisinage du front d'exploitation. Ils se placent aussi bien à l'avant qu'à l'arrière du front d'exploitation. Les événements sismiques les plus faibles, de magnitude locale inférieure à 1,5 (99% de la population), apparaissent tout au long de l'exploitation. Par contre, les événements plus forts, de magnitude supérieure ou égale à 1,5 (1% de la population), apparaissent dès l'approche du front dans la zone de surcontrainte du stot de Louise et se localisent systématiquement au niveau de cette même zone.

6.2 Energie sismique cumulée

La corrélation entre l'énergie sismique et l'avancement cumulé du chantier met en évidence les différents régimes sismiques associés à l'exploitation du panneau. Trois régimes sismiques sont observés (figure 5):

Régime 1: ce régime sismique apparaît après 50 mètres d'avancement du front, il est associé à la mise en place du foudroyage du bas-toit. Ce régime présente une progression linéaire de l'énergie sismique libérée en fonction de l'avancement du front pendant les 500 premiers mètres d'exploitation et est associé à des événements faibles, de magnitude inférieure à 1,5.

Régime 2: un changement du régime sismique apparaît dès l'arrivée du front d'exploitation sous le stot de Louise. Ce nouveau régime se caractérise par une forte augmentation de l'énergie sismique libérée et est associé à l'apparition des événements sismiques

forts, de magnitude supérieure ou égale à 1,5. Ces événements s'ajoutent aux événements sismiques plus faibles (magnitude inférieure à 1,5) présents pendant le premier régime sismique

Régime 3: un troisième régime sismique est mis en place environ 25 mètres après la sortie du front d'exploitation de la zone du stot de Louise. Il se caractérise par une diminution importante de l'énergie sismique libérée et est associé uniquement à des événements sismiques de faible magnitude. Ce régime est perturbé par l'apparition de quelques événements forts. Toutefois, ces événements forts se localisent à l'arrière du front dans le stot de Louise.

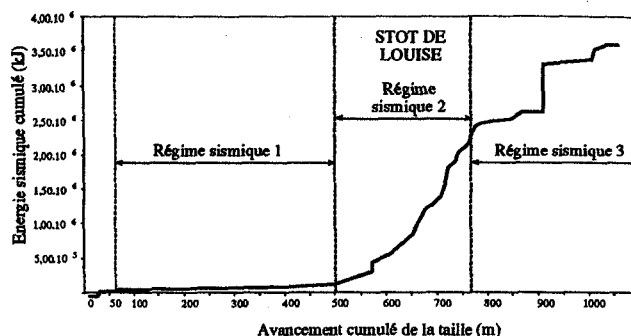
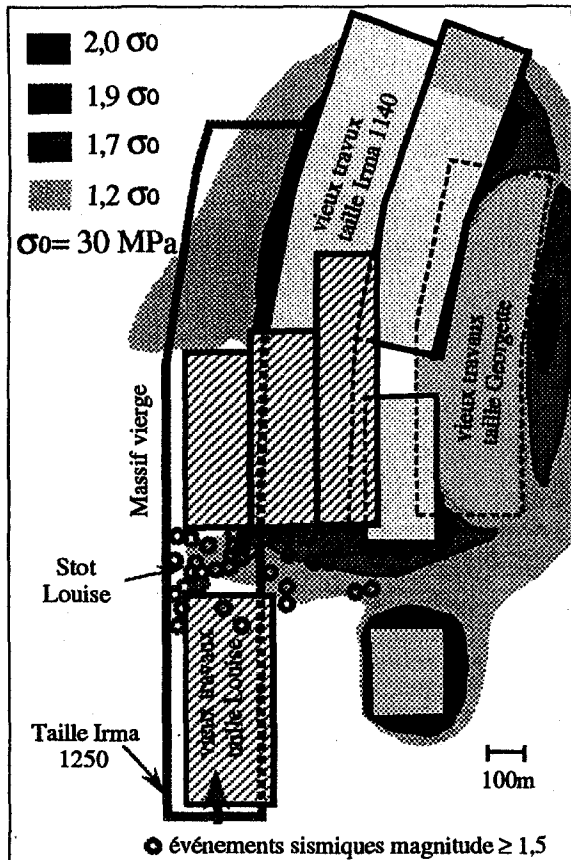


Figure 5 : Corrélation entre l'énergie sismique et l'avancement cumulé de la taille Irma 1250

7. CORRELATION ENTRE L'ACTIVITE MICROSISMIQUE ET LES ZONES SURCONTRAINTES

Les simulations numériques ont montré que la zone du stot de Louise était une zone de surcontrainte avant l'exploitation du panneau Irma 1250 et que cette surcontrainte augmentait significativement avec l'arrivée du front d'exploitation. La localisation des zones surcontraintes estimées par la modélisation numérique est confirmée par l'activité microsismique enregistrée lors de l'exploitation de la taille. L'analyse de l'énergie sismique libérée en fonction de l'avancement du panneau montre un fort changement du régime sismique dans la zone du stot. Ce changement est associé à l'apparition des événements sismiques forts. Tous les événements sismiques forts, de magnitude supérieure ou égale à 1,5, enregistrés lors de 1000 premiers mètres d'exploitation du panneau se localisent dans la zone de surcontrainte du stot de Louise (figure 6). McGarr et al 1975, dans les mines d'or de Witwatersrand, ont aussi montré que la position des foyers sismiques coïncide avec les zones où les changements de contraintes induits par l'exploitation ont été maxima.

Les événements plus faibles, de magnitude inférieure à 1,5, apparus depuis la mise en place du foudroyage, sont présents tout au long de l'exploitation et se regroupent en forme de nuage. Ce nuage d'événements se localise au voisinage du front aussi bien à l'arrière qu'à l'avant et avance avec le front d'exploitation. Cette population d'événements de faible magnitude est associée aux ruptures créées lors du foudroyage du toit et à la fracturation du charbon à l'avant du front de la taille (Senfaute 1997, Syrek et al 1988). Les événements forts, localisés uniquement dans la zone de surcontrainte du stot, sont associés à l'ouverture ou au glissement des fractures préexistantes remises en jeu dans cette zone et à la création de nouvelles ruptures.



34 375 événements sismiques ($0 < ML < 3$)
210 événements sismiques ($ML > 1,5$)

Figure 6 : Localisation des événements microsismiques de magnitude supérieure ou égale à 1,5 enregistrés lors de 1000 premiers mètres d'exploitation de la taille Irma 1250 et localisation des zones surcontraintes identifiées par modélisation numérique.

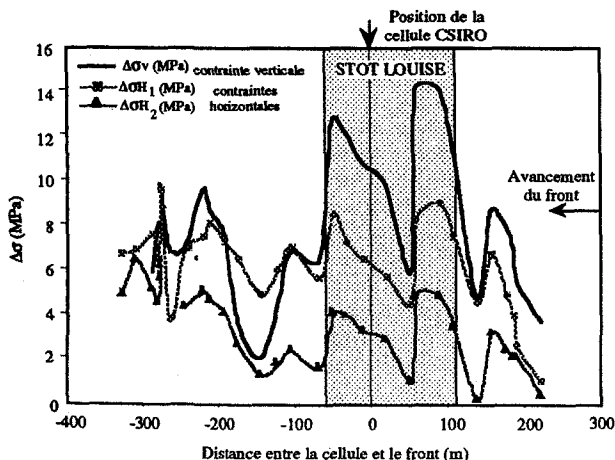


Figure 7 : Variations des contraintes mesurées par la cellule CSIRO en fonction de l'avancement du front d'exploitation de la faille

8. AUTRES MESURES

Des mesures complémentaires de surveillance mises en place lors de l'exploitation de la taille Irma 1250 ont permis de valider les résultats précédents. Les mesures effectuées concernent les

variations de contrainte, les déformations de terrains et les trous-tests.

Pour les mesures de variation de contraintes, une cellule comportant 12 jauges de déformation (cellule CSIRO) a été installée au toit de la taille Irma 1250, dans la zone du stot. Un traitement des données a été développé pour déterminer les contraintes à partir des déformations enregistrées. Ces mesures permettent de suivre l'évolution des contraintes en fonction de l'avancement du panneau. La figure 7 montre les variations des contraintes verticale et horizontale. Le module de la contrainte verticale varie de 3,6 à 14,2MPa. Les valeurs maximales de contrainte se situent dans la zone du stot (figure 7). Ces mesures valident parfaitement les observations et les calculs effectués précédemment. D'autre part, on constate que le stot de Louise reste en surcontrainte malgré le passage du panneau Irma 1250.

Des mesures de pression ont été effectuées à l'aide de capsules pressiométriques (capsules BOM) placées dans les galeries et dans la zone du stot. Des mesures de déformation ont été effectuées à partir de stations de convergence et d'expansion placées dans les galeries. L'ensemble de ces mesures a permis de confirmer la localisation des zones surcontraintes mises en évidence par le couplage entre la modélisation numérique et l'écoute microsismique.

Les moyens de détection et de surveillance des zones surcontraintes mis en place lors de l'exploitation de la taille Irma 1250 ont permis de suivre le comportement du massif à l'échelle de la taille. Une autre surveillance, à plus petite échelle (quelques mètres), a été mise en oeuvre. Il s'agit d'une surveillance par trous-test déclenchée à partir des résultats de la surveillance à l'échelle de la taille. La méthode de trous-test consiste à forer, en diamètre 42mm, un trou dans la veine de charbon. Le trou est dit réactif lorsque le débit des fines extraits des trous est largement supérieur à celui déduit du volume des trous. Malgré les fortes contraintes identifiées dans le massif, il n'y a jamais eu de trou-test réactif et il n'y a jamais eu non plus de réaction brutale du massif. Ces résultats indiquent que les fortes contraintes détectées dans le massif n'ont pas induit de risques de phénomènes dynamiques et montreraient l'adéquation de la méthode des trous-test pour la surveillance locale des chantiers.

9. CONCLUSIONS

La maîtrise du comportement des terrains dans des conditions d'exploitation difficiles a nécessité la mise en place d'une méthodologie basée sur la modélisation numérique à grande échelle et l'écoute microsismique.

Les simulations numériques ont permis d'identifier les zones surcontraintes induites par l'exploitation de la taille Irma 1250. La localisation de ces zones surcontraintes est confirmée par la localisation des foyers microsismiques et l'étude de l'énergie sismique libérée. Tous les événements microsismiques de forte magnitude enregistrés lors de l'exploitation de la taille se localisent dans la zone où les changements de contrainte estimés par modélisation numérique sont maxima. La localisation de ces zones surcontraintes a été confirmée par d'autres mesures de surveillance : variation des contraintes et déformation des terrains.

Les résultats de cette étude ouvrent des perspectives intéressantes en ce qui concerne le couplage de la modélisation numérique et de l'écoute microsismique comme moyen de détection, de localisation et de surveillance des zones à risques de phénomènes dynamiques.

BIBLIOGRAPHIE

Ben Slimane K., Besson J.C., Mandereau G. & Chambon C. (1990). *La surveillance sismique: un outil d'aide à la planification des chantiers sujets aux phénomènes dynamiques*. 3ème Colloque Polono-Français, Wrocław. Studio Geotechnica et Mechanica Vol XI, N° 1, pp 51-68.

Kaneko K., Sugawara K. & Obara Y. (1990). *Rock stress and microseismicity in a coal bursts district. Rockbursts and Seismicity in Mines*. Fairhurst (ed), Balkema, Rotterdam.

Linkov A., Zoubkov V. & Al Heib M. (1997). *Computer aided analysis of stressed state and rockburst hazard in veins and coal seams influenced by faults*. SAREST 97. 1st Southern African Rock Engineering Symposium Proceedings. Johannesburg, South Africa. Editors: RG Görtunca, TO Hagan.

Senfaute G., Chambon C., Bigarre P & Guise Y., Josien J.P. (1997). *Spatial Distribution of Mining Tremors and the Relations to Rockburst Hazard*. Journal of Pure and Applied Geophysics. Vol 150, pp. 451- 459. Birkhäuser Verlag, Basel.

Senfaute G. (1995). *La surveillance microsismique de l'exploitation souterraine du charbon aux Houillères de Provence. Contribution à la détection des risques de coups de terrains par écoute microsismique*. Thèse présentée à l'Institut National Polytechnique de Lorraine. 321p.

Senfaute G., Bigarré P., Josien J.P. & Mathieu E. (1994). *Real-time microseismic monitoring, Automatic wave processing and multilayered velocity model for accurate event location*. Rock Mechanics in Petroleum Engineering, EUROCK (Balkema, Delft/Netherlands) pp. 631 – 638.

Syrek B. & Kijaro C. (1988). *Energy and frequency distribution of mining tremors and theirs relations to rockbursts hazard in the Wujeck Coal Mine, Poland*. Acta Geophy. Pol. 36.

McGarr A., Spottiswoode M. & Gay N. (1975). *Relationship of mine tremors to induced stresses and to rock properties in the focal region*. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 4, pp. 981-993.

Al Heib M., Pigué J.P., Noirel J.F., Josien J.P. & Linkov A. (1996). *La planification des travaux miniers assistée par des modèles prévisionnels des états de contraintes dans les massifs rocheux*. 11ème Colloque Franco-polonais en Mécanique des Roches.

Josien J.P. & Derrien Y. (1995). *The prevision of rockbursts in Gardanne Colliery*. 26ème Conf. Int. des Instituts de Recherches sur la sécurité dans les Mines de Katowice.

Al Heib M. & Derrien Y. (1988). *Apport de la modélisation numérique à la maîtrise du comportement des terrains*. Congrès de l'Industrie Minière. Montpellier.