



**HAL**  
open science

## Modélisation tridimensionnelle de seisme induit

Pascal Bigarre, J. Tinucci, Karim Ben Slimane, Yves Guise

► **To cite this version:**

Pascal Bigarre, J. Tinucci, Karim Ben Slimane, Yves Guise. Modélisation tridimensionnelle de seisme induit. 3. Colloque national "Génie parasismique et aspects vibratoires dans le génie civil", Mar 1993, Saint-Rémy-lès-Chevreuse, France. pp.63-72. ineris-00971856

**HAL Id: ineris-00971856**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00971856>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## MODELISATION TRIDIMENSIONNELLE DE SEISME INDUIT

Pascal BIGARRE\*, John TINUCCI\*\*, Karim BEN SLIMANE\*, Yves GUISE\*\*\*

### RESUME

Dans les mines profondes, les ruptures violentes du massif rocheux à proximité des chantiers, désignées communément par les termes "coups de terrains" ou "rockbursts", sont des phénomènes particulièrement dangereux. Les glissements sur failles naturelles induits par l'exploitation sont une cause reconnue de ces phénomènes dynamiques. En relation avec l'Unité d'Exploitation de Provence (HBCM), un programme de recherche a été conduit par l'INERIS visant à évaluer par modélisation numérique le risque de coups de terrains par séismes induits. La méthode des éléments distincts a été choisie pour simuler la réponse du massif rocheux fracturé.

Les résultats présentés dans cet article montrent une corrélation qualitative satisfaisante entre le comportement de failles modélisées et la séquence de coups de terrains connus par l'U.E. Provence lors de l'exploitation du quartier de l'Estaque Sud.

### ABSTRACT

A research program has been carried out at INERIS aiming to quantify rockburst potential from mining-induced fault slip.

As a part of the research, numerical modeling of fractured rock mass has been undertaken, using the three-dimensional distinct element code 3DEC. Results presented in this paper demonstrate a very good agreement between calculated deformations of modeled faults and the experiences rockburst sequence during the mining of the Estaque Sud district.

### 1. INTRODUCTION

À l'Unité d'Exploitation de Provence, le charbon est exploité à une profondeur atteignant 1000 m. La méthode d'exploitation par longue taille permet de dimensionner des chantiers de 200 m de long, pour une veine de puissance d'environ 2,8 m. Le foudroyage permanent du toit en arrière taille provoque de nombreuses secousses dans les environs immédiats des chantiers. Ces ruptures des bancs surplombant la veine exploitée rendent compte de la redistribution permanente des contraintes dans le massif environnant, ainsi que de la libération de l'énergie potentielle sous une forme plus ou moins violente.

Néanmoins, la réponse complexe de la matrice rocheuse à ces fortes perturbations locales s'accompagne parfois de phénomènes dynamiques, ou coups de terrains, d'énergie inégale, mais parfois aux dégâts importants, dans les voies d'accompagnement des tailles ou en front de taille

---

\* INERIS, Ecole des Mines, Parc de Saurupt 54042 Nancy Cedex, France

\*\* ITASCA, Consult. Gr., 1313 Fifth St. SE, Minneapolis, MN 55414, U.S.A.

\*\*\* U.E. Provence, Service Commun, 13590 Meyreuil

même. Ces manifestations sont de nature dangereuse pour le personnel en activité dans les chantiers. Jusqu'à présent, la partie sud du gisement, et en particulier les quartiers de l'Etoile Sud et de l'Estaque Sud, ont été le siège principal de ces manifestations.

La présence de nombreuses failles et discontinuités tectoniques majeures dans ces quartiers sud a soulevé l'hypothèse de mécanisme de séismes induits, pouvant jouer un rôle important dans le chargement dynamique de la couche de charbon (figure 1). Cette hypothèse s'appuie notamment sur la présence d'une large faille chevauchante recouvrant la partie sud du gisement, limite naturelle des quartiers exploités, et au rejet important, ainsi que sur plusieurs failles majeures subverticales traversant les chantiers sud. Ceux-ci se caractérisent aussi par la présence de contraintes principales anisotropes, avec une contrainte verticale sublithostique et de fortes contraintes horizontales. Ces contraintes peuvent être expliquées par l'histoire géologique régionale, GAVIGLIO [1] (1988), REVALOR [2] (1986), GAVIGLIO [3] (1985). Les strates associées à la couche exploitée sont constituées essentiellement de calcaires lités, particulièrement compétents et au comportement élasto-fragile, JOSIEN [4] (1981).

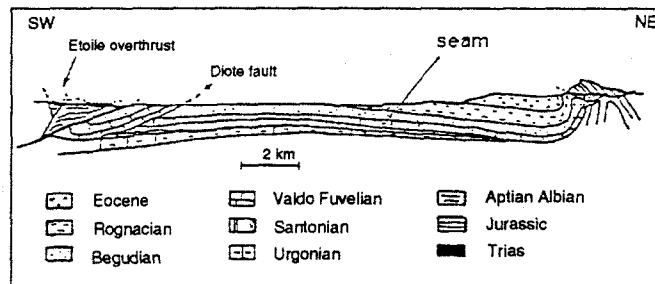


fig. 1- coupe géologique du bassin  
geological cross-section of the basin

## 2. MECANISMES DE COUPS DE TERRAINS

Durant les quinze dernières années, l'accroissement réguliers des secousses fortes aux chantiers ainsi que l'apparition de phénomènes dynamiques ont justifié un large programme de recherche conduit par le CERCHAR puis l'INERIS. L'objectif principal de ce projet est de comprendre les mécanismes initiant les coups de terrains afin d'améliorer la prévention et de contrôler au mieux leurs conséquences. Ces coups de terrains, classifiés en fonction de leur localisation ainsi que de leurs effets, se présentent en trois familles principales, REVALOR [5] (1991).

- Type 1 : Aux extrémités du front de taille, et particulièrement du côté des anciens travaux (figure 2a). Ces coups de terrains sont actuellement contrôlés par foration de trous de détente, selon un schéma établi dans la couche.

- Type 2 : Coups de couche accompagnés d'un soulèvement du mur. Ce type est de plus en plus fréquent, et peut affecter plus de 80 m de voie, soit du côté des anciens travaux (en avant du front), soit du côté du massif vierge. Les dommages engendrés peuvent se situer jusqu'à 100 m de distance du front (figure 2b).

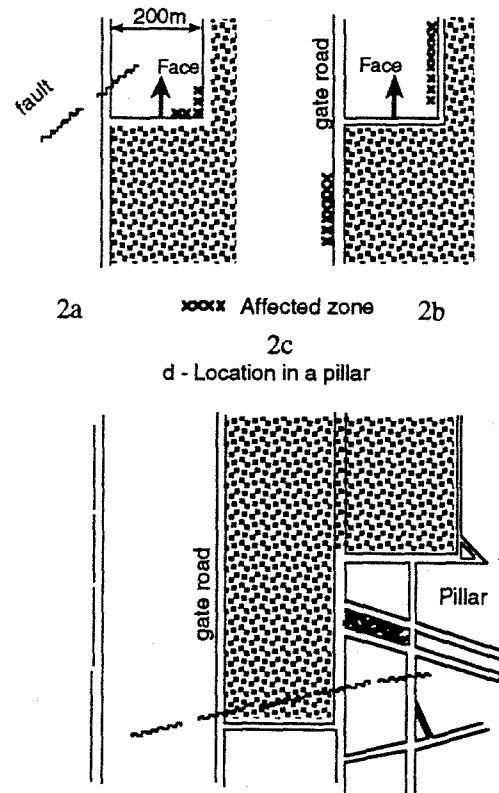


fig. 2- types coups de terrains  
kinds of rockbursts

- Type 3 : Ruptures de parements de pilier surcontraints (figure 2c).

L'exploitation du quartier de l'Estaque Sud démarra en 1987 par la taille 13 (figures 5 et 6). Durant les 3 années qui suivirent, l'exploitation des tailles 14, 15 et 25 vit l'enregistrement de 22 phénomènes dynamiques notables, principalement du type 2. Une description schématique des dommages les plus violents est montrée en figure 3, avec les caractéristiques suivantes :

- violente explosion de la couche dans la voie d'accompagnement,
- peu de fracturation du toit (et convergence très faible),
- soulèvement important du mur pouvant atteindre 1 m. Ce mécanisme associé, dont l'origine peut avoir plusieurs explications, est aujourd'hui contrôlé par la réalisation d'une tranchée en voie (figure 4). L'efficacité de cette méthode n'est cependant toujours pas clairement établie.

Une hypothèse aux causes des événements de type 2 survenus à l'Estaque Sud est celle d'un mécanisme de coups de terrains déclenché par une importante secousse délocalisée des chantiers, secousse induite par un glissement sur faille naturelle ou rupture d'un haut banc du toit. On imagine que le schéma particulier de radiation d'onde peut générer alors des vitesses particulières plus défavorables à certains endroits surcontraints autres que le chantier lui-même.

Néanmoins, les moyens de confirmer ce type de mécanisme sont très peu nombreux. Les informations pertinentes sont d'autant plus difficiles à recueillir que les extensions des chantiers et quartiers exploités sont importants. Les vitesses d'avancement des fronts pouvant atteindre 10 m par jour rendent compte de régimes dynamiques et transitoires complexes en terme de relaxation de la roche hôte. L'accès très restreint aux zones faillées, dû à une exploitation monocouche, ainsi qu'une difficulté évidente de bien comprendre les comportements du toit, rendent l'interprétation des données disponibles très délicate.

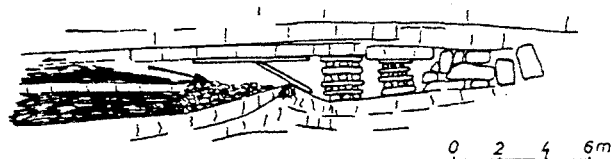


fig. 3- description schématique des dommages  
schematic description of the damages

Deux axes de recherche ont ainsi été développés et mis en oeuvre par l'INERIS ces dernières années :

a) Développement d'un réseau d'écoute sismique à l'échelle de la mine, permettant d'obtenir les localisations et énergies des secousses induites par l'exploitation. Ces paramètres doivent permettre de mieux qualifier et quantifier la réponse du massif aux sollicitations imposées dans l'espace et dans le temps. Une telle chaîne d'écoute est opérationnelle depuis janvier 1991. Composée de neuf stations à composante verticale dont une tridirectionnelle (figure 4), les enregistrements soigneusement analysés doivent notamment conduire à l'établissement de critères de prévention, basés par exemple sur la nature spatio-temporelle discontinue de la libération d'énergie emmagasinée.

L'INERIS participe actuellement à l'amélioration de ce réseau ainsi qu'à une méthodologie d'intégration de l'information sismique à l'ensemble des données disponibles, pour les décisions stratégiques d'exploitation, BEN SLIMANE [6] (1990).

Ces paramètres sont accessibles :

- soit à partir de l'analyse des signaux sismiques, obtenus en surface pendant le séisme ou après le séisme (répliques), en sources lointaines ou proches,
- soit à partir des observations de surface permettant de déterminer le champ des déplacements ante-, co- et post-sismiques,
- soit à partir des observations en profondeur, etc...

♦ **LE TRAJET** entre la source sismique et le site observé, lieu de propagation des ondes sismiques qui proviennent des dislocations élémentaires de la source.

Les paramètres du trajet concernent essentiellement :

- La géométrie des différentes couches géologiques et discontinuités.
- Leur comportement rhéologique et en particulier leur anisotropie et leur capacité d'amortissement (domaine visco-élastique).
- Si le site est en surface, l'effet de surface libre (passage rocher-air)

Les paramètres utilisés dans les modèles se réduisent généralement à :

- La distance à la source, centroïdale, focale, ... : Rx.
- Un facteur de qualité global Q ( $Q=1/2D$ , D étant l'amortissement), éventuellement anisotrope.

Actuellement, seule une analyse des signaux sismiques entre une source et un site donnés, pour une large gamme de magnitude, pourrait permettre une bonne prise en compte de l'influence du trajet (voir par exemple la thèse de M. BOUR, 1993).

♦ **LE SITE** d'observation finale, qui peut être situé en surface ou en profondeur . S'il est en surface, les paramètres qui ont influencé le signal sismique sont :

- La topographie de surface.
- La géométrie des différentes couches géologiques et surtout les épaisseurs des sols rocheux altérés et des sols meubles
- Leur comportement rhéologique en particulier dans le domaine non linéaire (élasto-plastique).

L'analyse des "effets de site" a fait l'objet de nombreuses recherches récentes, soit à partir d'expérimentation in-situ ou de modélisations numériques en cours de validation.

Il est alors possible de définir, pour un site donné, un point de référence (ou de contrôle) situé en surface au "rocher horizontal" (dont la vitesse des ondes S est de l'ordre de 1000 m/s. pour fixer les idées).

Ceci permet de découpler l'ensemble du problème SOURCE-TRAJET-SITE pour l'étude des mouvements sismiques en 2 parties distinctes (Figure 1).

- (1) SOURCE-TRAJET-SITE DE REFERENCE "ROCHER HORIZONTAL AFFLEURANT",  
qui fait l'objet du présent article
- (2) SITE DE REFERENCE-POINTS QUELCONQUES DU SITE

Ce découplage apparaît bien désormais dans les projets de règlements parasismiques récents,

*pour les ouvrages à risque normal*, comme par exemple les recommandations AFPS90 (utilisation de 4 types de site  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ). De plus, quand cela est nécessaire et possible, les formes de spectre peuvent également varier en fonction des sources sismiques, comme dans l'ATC 3-06, 1978 (spectres pour LAS VEGAS, LOS ANGELES, SAN FRANCISCO), ou les propositions qui ont été faites pour les Antilles (GODEFROY et MOURoux, 1990).

*pour les ouvrages à risque spécial*, l'étude des mouvements sismiques est actuellement basée sur une analyse sismotectonique (description détaillée des sources sismiques à partir des données de la sismicité et de la géologie). Il est alors nécessaire de disposer de méthodes d'analyse permettant une prise en compte plus complète des paramètres cités précédemment.

Plusieurs méthodes de calcul de spectres de réponse ont été proposées jusqu'à maintenant :

- *des méthodes statistiques* basées sur l'analyse d'un jeu de données accélérométriques (B. et G. MOHAMMADIOUN, 1980 ; PETROVSKI, 1986 ; V. CAILLOT, 1992). Ces méthodes font intervenir les paramètres magnitude et distance, parfois le type de sol. L'avantage de ces méthodes est qu'elles utilisent des accélérogrammes naturels, mais elles ne permettent pas une analyse systématique des paramètres physiques de la source et du chemin de propagation, compte tenu précisément de l'hétérogénéité des enregistrements naturels et surtout de leur nombre encore insuffisant pour une telle analyse, d'où souvent une grande dispersion ;

- *des méthodes spectrales* basées sur la convolution d'un spectre théorique, dont la forme tient compte de lois sismiques classiques (BRUNE, 1970), avec un bruit blanc reproduisant le comportement stochastique des accélérogrammes réels (BOORE, 1983 ; BERNARD, 1987). Elles donnent de bons résultats, en accord avec les données réelles, en faisant intervenir d'autres paramètres physiques de la source comme la chute de contrainte et la fréquence coin. Cependant, elles simulent mal les signaux en source proche, c'est-à-dire en des stations situées à des distances inférieures à la longueur de la source sismique, ce qui représente une limitation pour les séismes de magnitude importante, supérieure à 6 ; elles ne prennent pas non plus en compte le phénomène de directivité.

Le modèle qui est proposé dans cet article, dit de "*source spectrale*", tente de pallier ces dernières limitations par une analyse en source étendue, à partir d'un modèle cinématique de la rupture sur le plan de faille.

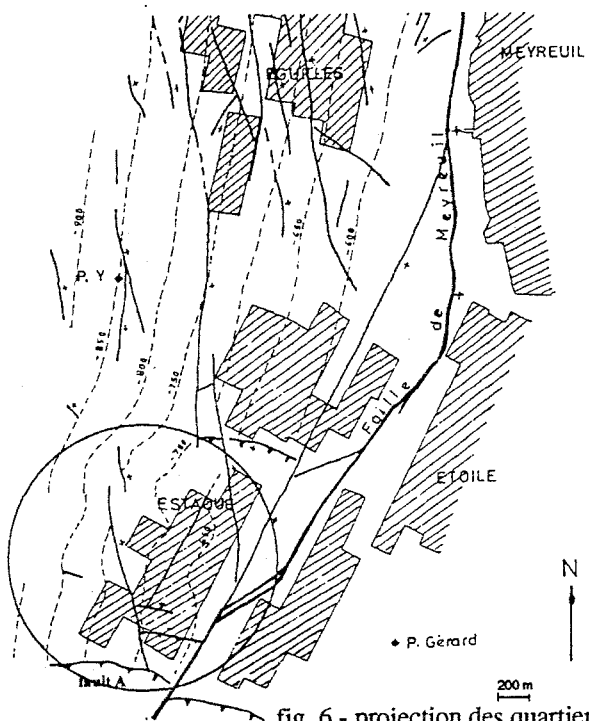


fig. 6 - projection des quartiers exploités  
map of the most recent mined districts

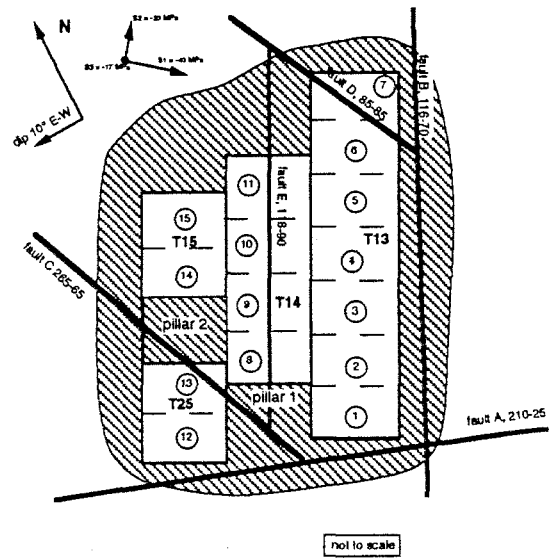


fig. 7 - modélisation du quartier de l'Estaque Sud  
modeling of the Estaque sud district  
faults are indicated with dip direction and dip

de quantifier les déformations élasto-plastiques subies par chaque joint à chacune des étapes de la simulation, deux paramètres essentiels sont définis et calculés de manière itérative :

$$M = \sum_{Subc} A_s D \tau$$

où  $A_s$  est l'aire du sous contact et  $D \tau$  le déplacement tangentiel.  $M$  caractérise le moment mécanique agissant sur la structure et reprend la formule du moment sismique divisée par le module de cisaillement du joint,

$$\Delta E = \frac{1}{2} \sum_{Subc} F_s D \tau$$

où  $F_s$  est la force tangentielle agissante au niveau du sous contact,  $\Delta E$  est le calcul de l'énergie dissipée par déformation plastique, induite par la contrainte de cisaillement en excès de la résistance.

Notons que ces deux paramètres sont liés dans l'analyse quasi statique, incrémentale, par la relation:

$$M = \frac{\Delta E}{\tau}$$

où  $\tau$  est la contrainte tangentielle agissante au niveau du sous contact.

table 1	structural features	rock matrix MPa
stiffnesses	kn,ks=10000 MPa / m	K,G=13333,8000
M.C. parameters	Fric=35°, Coh= 0, Rt= 0 MPa	

table 1 - caractéristiques mécaniques des matériaux  
elasto-plastic parameters of the model

table 2	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
value MPa	-40	-20	-17
dip °	120	30	0
dip dir. °	0	0	90

table 2 - contraintes à l'origine  
input stresses

fig. 8a vues de la matrice rocheuse modélisée  
views of the rock matrix and the blocs

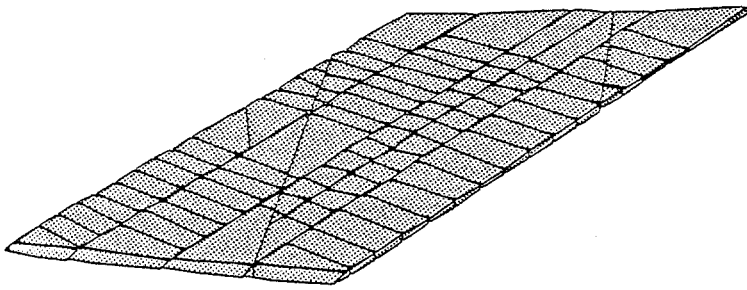
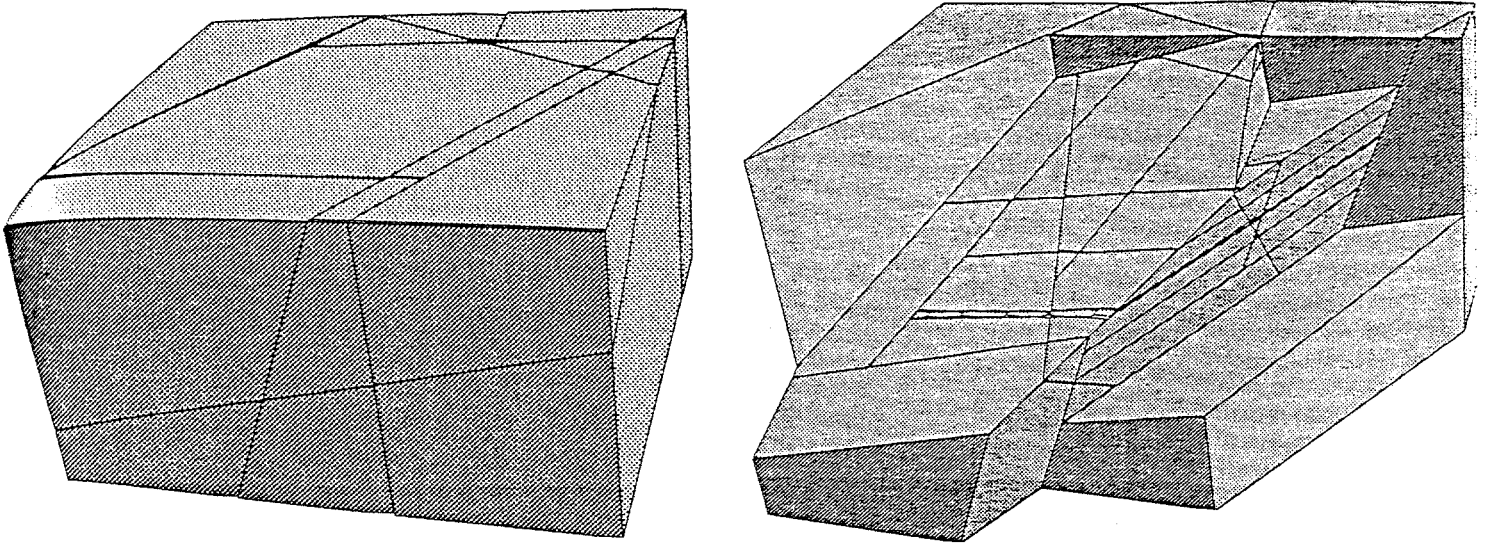


fig. 8b blocs constituant les tailles  
coal seam-longwall faces

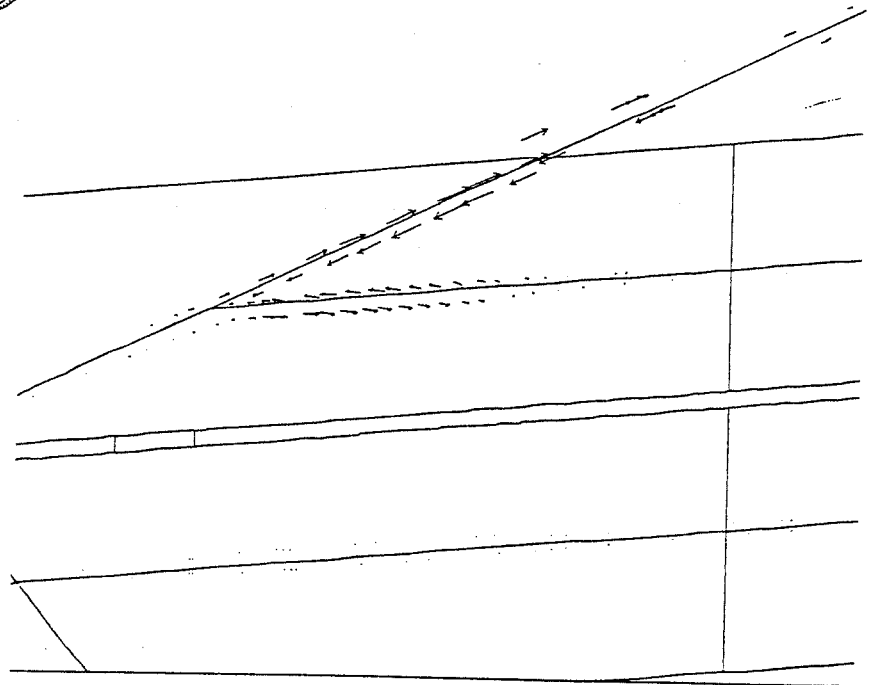


fig. 8c déplacement tangentiel plastique à  
l'étape 9 - 0.13 m après équilibre  
shear displacement along fault A & I



## 6. RESULTATS

Durant la simulation, seuls les points A et I, modélisant respectivement la faille chevauchante et le point stratigraphique supérieur subissent de larges déformations plastiques. Les figures 9 et 10 indiquent les courbes des paramètres M et  $\Delta E$  ainsi que la séquence de phénomènes dynamiques (axe vertical droit) fonctions de l'étape de la simulation. Les déformations calculées deviennent importantes à partir du démarrage de la taille 14 (étapes 8 et 9).

Résumant les résultats en points essentiels, il est possible de faire les commentaires suivants:

a) la corrélation qualitative entre le paramètre M pour les deux discontinuités modélisés A et I et la séquence de coups de terrains apparaît excellente,

b) le mécanisme de rupture le long de la faille A est du type cisaillement, induit à la fois par la réduction de la contrainte normale agissante et l'augmentation de la contrainte tangentielle. Ce couplage est à associer à une réorientation du tenseur des contraintes aux points de rupture. Les déformations calculées sont sensibles à l'élargissement du quartier d'Est en Ouest, c'est à dire au passage en seconde puis troisième taille. L'éloignement progressif des tailles est plus favorable à la stabilité (étapes 6, 7, 11). Les sous contacts de déplacement tangentiel maximum montrent une évolution très nette avec l'extension des tailles (figure 9). Leurs projections verticales correspondent assez bien avec la position du bloc excavé. L'énergie dissipée à l'étape 9, calculée sur une base journalière, donne une valeur d'environ  $10^9$  J, ce qui correspond à l'énergie sismique d'un événement de magnitude 3 environ sur l'échelle de Richter.

fig. 9  
énergie dissipée  $\Delta E$  à chaque  
étape de la simulation  
energy dissipated at each step  
for joints A & I

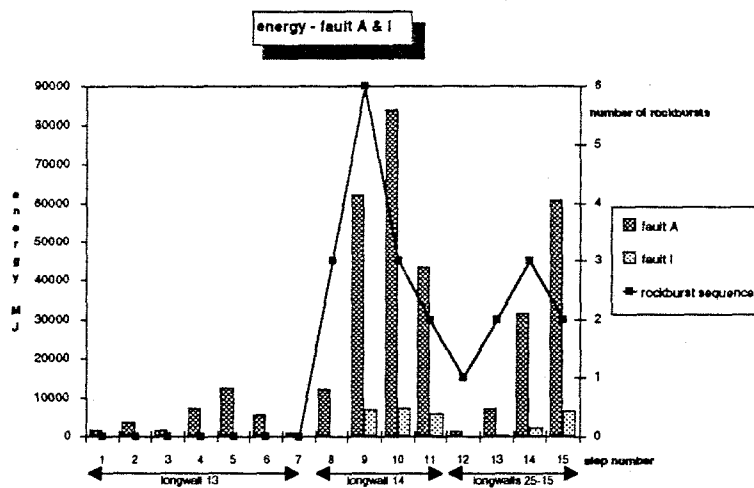
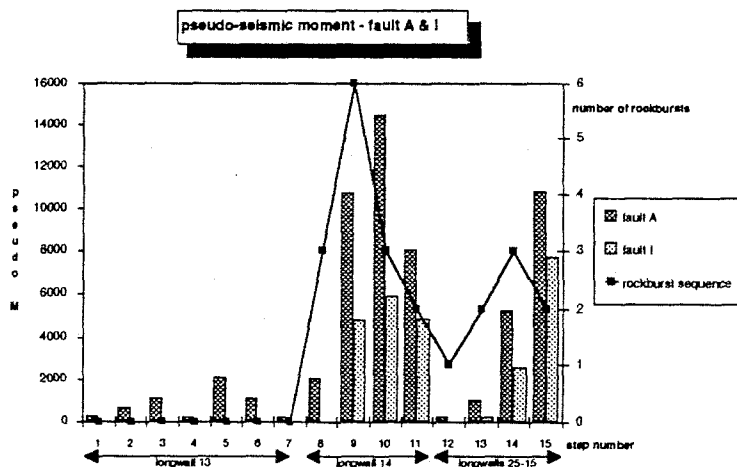


fig. 10  
paramètre M à chaque étape de  
la simulation  
parameter M at each step for  
structures A & I



c) Les mécanismes de rupture du point I sont de deux types : cisaillement et traction, dus au comportement de flexion du banc. L'énergie dissipée relativement faible est due à une faible contrainte tangentielle active sur les points de rupture. Néanmoins, la chute de la contrainte perpendiculaire aux épontes, impose une chute de la contrainte normale appliquée au point modélisé. La rupture par traction apparaît essentiellement aux étapes 10, 11 et 15, avec l'élargissement du quartier dans sa deuxième dimension.

d) Le glissement par cisaillement sur la faille A est du type oblique, c'est à dire associant un rejet composé de deux composantes inverse et latérale-droite. Ce glissement induit correspond grossièrement au mouvement naturel repéré de la structure. L'interaction des joints A et I à proximité de leur intersection est difficile à estimer. On peut tout de même noter que la compatibilité de la cinématique des blocs concernés peut engendrer une amplification mutuelle des ruptures (figure 8c).

Le long des autres points modélisés, on note peu de déformations plastiques, bien que l'évolution des contraintes soit défavorable, avec l'accroissement moyen du ratio  $\tau/\sigma_n$  sur l'ensemble des sous-contacts.

## 7. CONCLUSIONS

Rappelons que le but de cette étude était d'évaluer l'utilisation de la modélisation par la méthode des éléments distincts pour les problèmes de séismes induits. Ce type de mécanisme est à l'origine de nombreux phénomènes dynamiques dangereux dans la plupart des mines profondes en exploitation. Les résultats présentés montrent que, sous les hypothèses émises, ce type de mécanisme a pu être à l'origine de coups de terrains durant l'exploitation du quartier de l'Estaque Sud, à l'U.E. Provence. La corrélation entre la réponse de certains joints et la séquence de phénomènes dynamiques est remarquable. Les mécanismes de rupture sont clairement identifiés. Les géométries critiques peuvent être calculées, les ruptures localisées et les paramètres fondamentaux de déplacement estimés.

Néanmoins, aucune validation des mécanismes intuités et modélisés ne peut être démontrée. Ainsi, l'impact des ruptures des joints sur les chantiers ne peut être quantifié par l'approche présentée.

Cette méthodologie de modélisation doit donc être associée aussi étroitement que possible avec les observations in situ et les résultats des enregistrements sismiques du réseau actuel.

L'analyse rétrospective de secousses fortes, soigneusement sélectionnées et analysées en terme de sismologie (localisations, énergies, schémas de radiation) et de modélisation numérique, pourrait permettre de confirmer et quantifier des mécanismes complexes. Un tel calage permettrait alors d'utiliser la simulation numérique comme outil de prédiction de comportement de failles en milieu minier.

L'association de l'analyse sismique et de la modélisation dynamique par la méthode des éléments distincts se révèle comme très prometteuse. Cette étude définit la voie vers une méthodologie scientifique de mise en oeuvre complexe, mais qui pourrait s'avérer très fructueuse pour les études de stabilité en sol et sous-sol, et particulièrement en génie minier.

## REMERCIEMENTS

Nous adressons nos remerciements au Dr. FAIRHURST et au Dr PIGUET pour leur aide précieuse qui a permis la conduite de cette étude.

## REFERENCES

- [1] Gaviglio P., Revalor R., Piguet J.P., Dejean M, 1988 "Tectonic structure, strata properties and rockburst occurrence in a french coal mine", Proc. 2nd Int. Symp. "Rockbursts and Seismicity in Mines", Minneapolis, C. Fairhurst, Balkema.
  - [2] Revalor R., 1991 "La maîtrise des coups de terrains dans les exploitations minières", Doctorat, Institut Polytechnique de Lorraine.
  - [3] Gaviglio P., 1985 "La déformation cassante dans les calcaires fuvéliens du bassin de l'Arc. Comportement des terrains et exploitation minière" Thèse Doctorat d'Etat, Marseille.
  - [4] Josien J.P., 1981 "Lutte contre les coups de couche", rapport final EUR 7869, convention d'étude CECA 7220-AC/307.
  - [5] Revalor R., Josien J.P., Besson J. C., Magron A. 1985 "Seismic and seismo-acoustic experiments applied to the prediction of rockbursts in French coal mines", Proc. 2nd Int. Symp. "Rockbursts and seismicity in Mines", Minneapolis, C. Fairhurst, Balkema.
  - [6] Ben Slimane K., 1990 "Sismicité et exploitation minière", Rapport final INERIS.
  - [7] Cundall P. A., 1988 "Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part I a sheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks", Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech. Abstr. pp 107-116
  - [8] Hart R., Cundall P.A., Lemos J., 1988 "Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part II Mechanical calculations of motion and interaction of a system composed of many polyhedral blocks", Int. J. Rock Mech, Min. Sci. & Geomech. Abstr. pp 117-12.
  - [9] Hart R., Board M., Brady B., O'Hearn B., Allan G., 1988 "Examination of Fault-slip induced Rockbursting at the strathcona Mine", in Key questions in Rock Mechanics, Proc. 29th U.S. Rock Mechanics Symp. , Minneapolis, Cundall & al, Balkema.
  - [10] Tinucci J.P., Hanson D.S.G, 1990 "Assessment of seismic fault-slip potential at the Strathcona mine", in Rock Mechanics contri. & Chal., Hustrilid & Johnson, Balkema.
- Itasca Consulting Group, Inc, 3DEC version 1.3, Minneapolis, Minnesota.