



**HAL**  
open science

## Comportement de la couronne soutenue par câbles d'ancrage d'un chantier d'exploitation de la mine souterraine de sotiel (Andalousie-Espagne)

Francis Wojtkowiak, D. Thibodeau

► **To cite this version:**

Francis Wojtkowiak, D. Thibodeau. Comportement de la couronne soutenue par câbles d'ancrage d'un chantier d'exploitation de la mine souterraine de sotiel (Andalousie-Espagne). International Symposium on Rock Support, Jun 1992, Sudbury, Canada. pp.201-209. ineris-00971853

**HAL Id: ineris-00971853**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00971853>**

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.

## Comportement de la couronne soutenue par câbles d'ancrage d'un chantier d'exploitation de la mine souterraine de Sotiel (Andalousie-Espagne)

F.Wojtkowiak

BRGM-4S, Département Ingénierie Géotechnique, Orléans, France

D.Thibodeau

Ecole des Mines, Laboratoire de Mécanique des Terrains, Nancy, France

RESUME : L'évolution et la répartition des efforts qui s'exercent sur des câbles à ancrage réparti, soutenant la couronne d'un chantier d'abattage selon la méthode des tranches montantes remblayées, ont été mesurées pendant la progression de l'exploitation dans la mine souterraine de Sotiel (Andalousie-Espagne). Les résultats obtenus mettent clairement en évidence l'influence néfaste des tirs d'abattage sur la stabilité de la couronne dont le comportement est assimilable à celui d'un assemblage de blocs. Ils contribuent également à améliorer notre compréhension des interactions entre massif rocheux fracturé et soutènement. En effet, les câbles jouent non seulement le rôle d'armatures, assurant ainsi l'intégrité de l'assemblage de blocs, mais ils permettent également aux blocs de se réajuster les uns par rapport aux autres après chaque tir d'abattage, jusqu'à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre de l'assemblage.

### 1 INTRODUCTION

Le renforcement des structures minières par boulonnage à l'aide de câbles à ancrage réparti a connu ces dix dernières années un grand développement dans les exploitations minières souterraines d'amas polymétalliques d'Amérique du Nord, et plus particulièrement du Canada, des pays nordiques tels que Suède et Norvège, et d'Australie. Alors que la pose de ces câbles se mécanise de plus en plus, on est forcé de constater que le dimensionnement de ce renforcement est encore abordé de manière très empirique et gagnerait sans aucun doute à être rationalisé.

En vue d'élucider le comportement mécanique de tels câbles et leur rôle exact dans le soutènement des excavations dans les massifs de roche dure fracturée, l'Université Laval de Québec a mis au point un dispositif original de mesure des efforts qui s'exercent localement sur ces câbles, la jauge TENSMEG 70 (Choquet et Miller 1988), fabriquée et commercialisée maintenant par la société Supportek. Nous avons utilisé ces dispositifs pour étudier le comportement de câbles d'ancrage soutenant la couronne d'un chantier d'exploitation de la mine souterraine de Sotiel (Andalousie, Espagne).

L'ensemble des mesures d'effort effectuées sur une dizaine de câbles d'ancrage

indique clairement que la couronne renforcée se comporte typiquement comme un assemblage de blocs délimités par les plans de discontinuité majeurs. Une analyse en composantes principales a permis d'établir une relation certaine entre les contraintes induites en couronne par les tirs d'abattage à l'explosif et les variations d'intensité des efforts s'exerçant sur les câbles.

Pour compléter cette première analyse des résultats et améliorer notre compréhension des interactions du massif rocheux fracturé et du soutènement par câbles d'ancrage, une étude de stabilité de la couronne a été entreprise en mettant en oeuvre le logiciel Résoblok, développé à l'Ecole des Mines de Nancy. Dans sa forme actuelle, ce logiciel est un ensemble de deux codes. Il s'agit, en premier lieu, d'un générateur de blocs définis à partir de champs de fractures simulés prenant en compte les caractéristiques statistiques de la fracturation naturelle. La stabilité de chaque bloc ainsi défini est ensuite analysée indépendamment des autres blocs, selon la théorie du bloc-clé de Warburton (1987). Une première modélisation géométrique de la fracturation du gisement de Sotiel à l'aide de Résoblok a ainsi permis de démontrer la nécessité et surtout l'efficacité du renforcement des

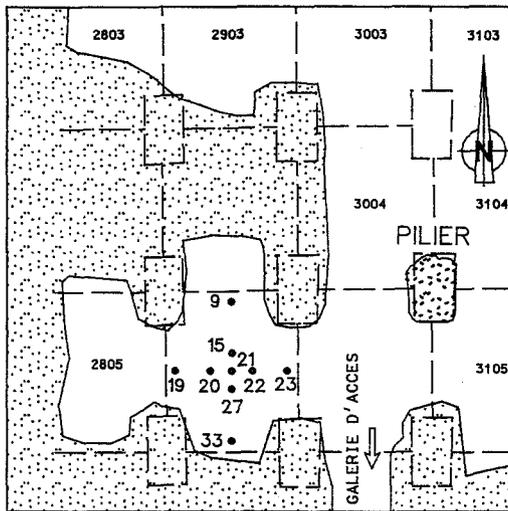


Fig.3 Implantation des câbles instrumentés

jours en février 1989 ; 64 jours, de février à avril 1990 ; 47 jours de juin à août 1990, et enfin 26 jours de août à octobre 1990. Les trois tranches de minerai ont été respectivement abattues en février 1989, février 1990 et en octobre 1990.

### 3 INTERPRETATION DES MESURES EFFECTUEES SUR LES CABLES D'ANCRAGE

La figure n° 5 représente, en fonction du temps et des principales phases de tirs d'abattage, l'évolution des efforts mesurés en trois points différents de chaun des câbles d'ancrage n° 22, 23 et 27. Notons que sur ces diagrammes, les ordonnées positives correspondent à une élongation de la jauge, donc du câble, soumis à des efforts de traction. Les jauges utilisées, de par leur conception, ne sont pas adaptées à la mesure du

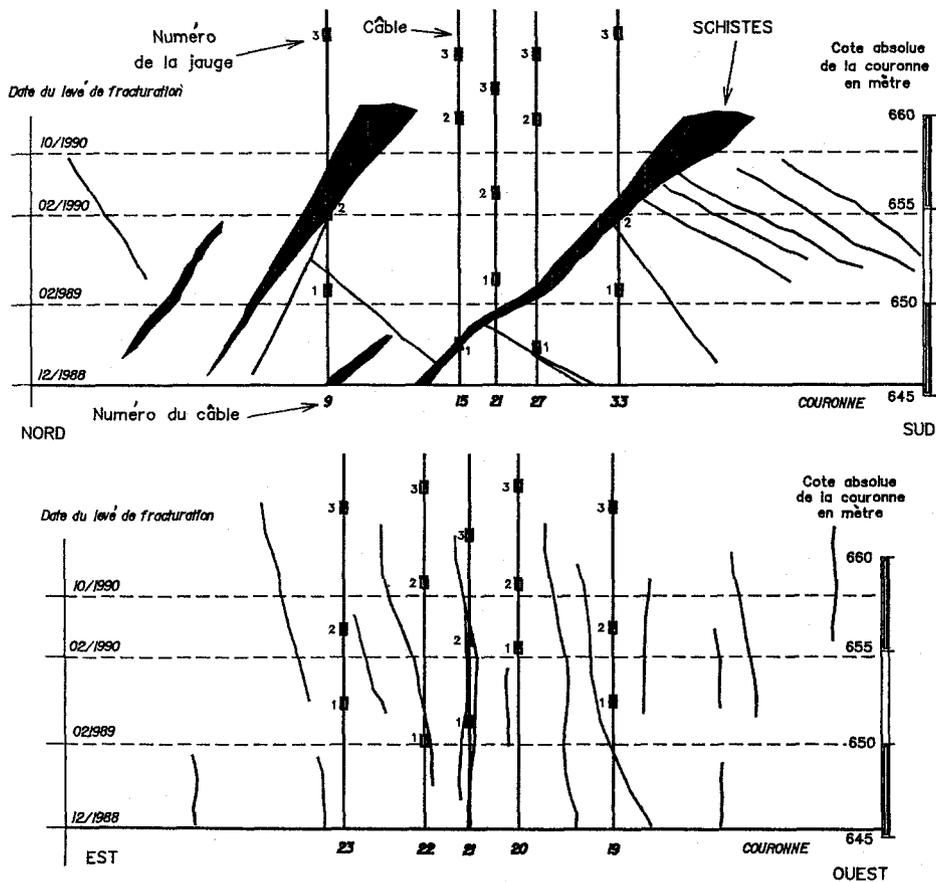


Fig.4 Coupes schématiques de la couronne du chantier minier expérimental

raccourcissement de la base de mesure dû par exemple à des efforts de compression : l'axe des ordonnées des diagrammes de la figure n° 5 ne comporte donc pas d'échelle pour les valeurs d'effort négatives.

De l'ensemble des mesures effectuées en conditions réelles d'exploitation sur les neuf câbles d'ancrage, il ressort que le comportement de chaque câble dépend d'un certain nombre de facteurs géométriques (tels que la position du câble dans le chantier d'exploitation : milieu de la couronne, entre piliers résiduels, etc), structuraux (tels que la fracturation naturelle et induite par les tirs d'abattage de la couronne), et de la présence d'importantes hétérogénéités lithologiques (écaillés schisteuses) au sein du minéral.

La répartition des efforts le long d'un même câble est rarement homogène et surtout elle évolue d'une phase d'abattage à l'autre. Rares sont les jauges qui indiquent, pendant pratiquement toute la durée de l'expérimentation, la même intensité d'effort. Il s'agit des jauges n° 2 des câbles n° 19, 20 et 27 et des jauges n° 3 des câbles n° 9, 20 et 22. Les efforts mesurés par ces jauges sont faibles et sont compris entre 0 et 30 kN.

Toutes les autres jauges indiquent par contre des forces dont l'intensité varie dans le temps. Les câbles subissent en effet des cycles de chargement et de déchargement d'amplitude et de durée variables. Les efforts qui s'exercent sur les câbles peuvent être localement très importants, supérieurs à 100 kN, voire atteindre la charge maximale admissible par le câble d'ancrage (250 à 270 kN) provoquant ainsi sa rupture et/ou celle de la jauge. Lorsque le câble est sollicité en deçà de sa limite de rupture, il est fréquent d'observer après un pic de charge une phase de déchargement du câble plus ou moins rapide (quelques jours) suivie d'une stabilisation des efforts s'exerçant sur le câble à une intensité comparable voire inférieure à celle précédant la phase de chargement.

L'examen détaillé des courbes de réponse des câbles d'ancrage fait apparaître une relation de cause à effet entre les tirs d'abattage dans les chantiers voisins et les efforts dans les câbles peu de temps après le tir. Pour confirmer cette observation purement qualitative, une analyse statistique en composantes principales a été réalisée sur les deux variables suivantes : les efforts mesurés par les jauges et les contraintes induites par les tirs en couronne du chantier minier expérimental. Pour tenter de corréler les efforts s'exerçant sur les

câbles lors des différents tirs, la distance du tir par rapport au chantier expérimental ainsi que la quantité d'explosif utilisée doivent être prises en compte. Jaeger et Cook (1979) mentionnent que Duvall et al. proposent de calculer la vitesse particulière maximum A à partir de l'équation suivante :

$$A = H \left( \frac{W^{1/2}}{r} \right)^n$$

dans laquelle H et n sont des constantes empiriques, W la masse en kg d'explosif utilisée et r la distance en m entre la position du tir et le centre du chantier instrumenté. A partir de cette vitesse particulière, la contrainte induite par le tir  $\sigma_{\text{tir}}$  (MPa) peut être calculée à l'aide de l'équation proposée par Jaeger et Cook (1979) :

$$\sigma_{\text{tir}} = \frac{-AE(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu) \left[ \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho g} \right]^{1/2}}$$

dans laquelle E est le module de Young,  $\nu$  le coefficient de Poisson et  $\rho$  la densité du massif rocheux. Le calcul des contraintes induites par les tirs n'a été effectué que pour les trois dernières phases d'acquisition, comprises entre le 19 février et le 17 octobre 1990, car, ce sont les seules qui présentent suffisamment de données pour un traitement statistique.

L'analyse en composantes principales confirme bien l'existence d'une relation entre les contraintes induites par les tirs d'abattage et les efforts s'exerçant sur les câbles, puisque le pourcentage expliqué par le premier axe principal est respectivement de 50,6 %, 43,2 % et 46,2 % pour les phases 3, 4 et 5. Pour une même phase d'abattage, cette analyse a permis également de corréler le comportement de certains câbles et de comparer les périodes de mise en tension des uns aux périodes de relâchement des autres. Enfin, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les données de la phase 5 en décalant les tirs d'un certain nombre d'intervalles de temps de manière à quantifier le délai de réaction des jauges à un tir donné. La corrélation entre les efforts mesurés et la contrainte induite par le tir est maximale pour un intervalle de temps de 7 jours.

Les résultats de mesures sur les câbles et de l'étude statistique nous permettent d'assimiler le comportement de la couronne

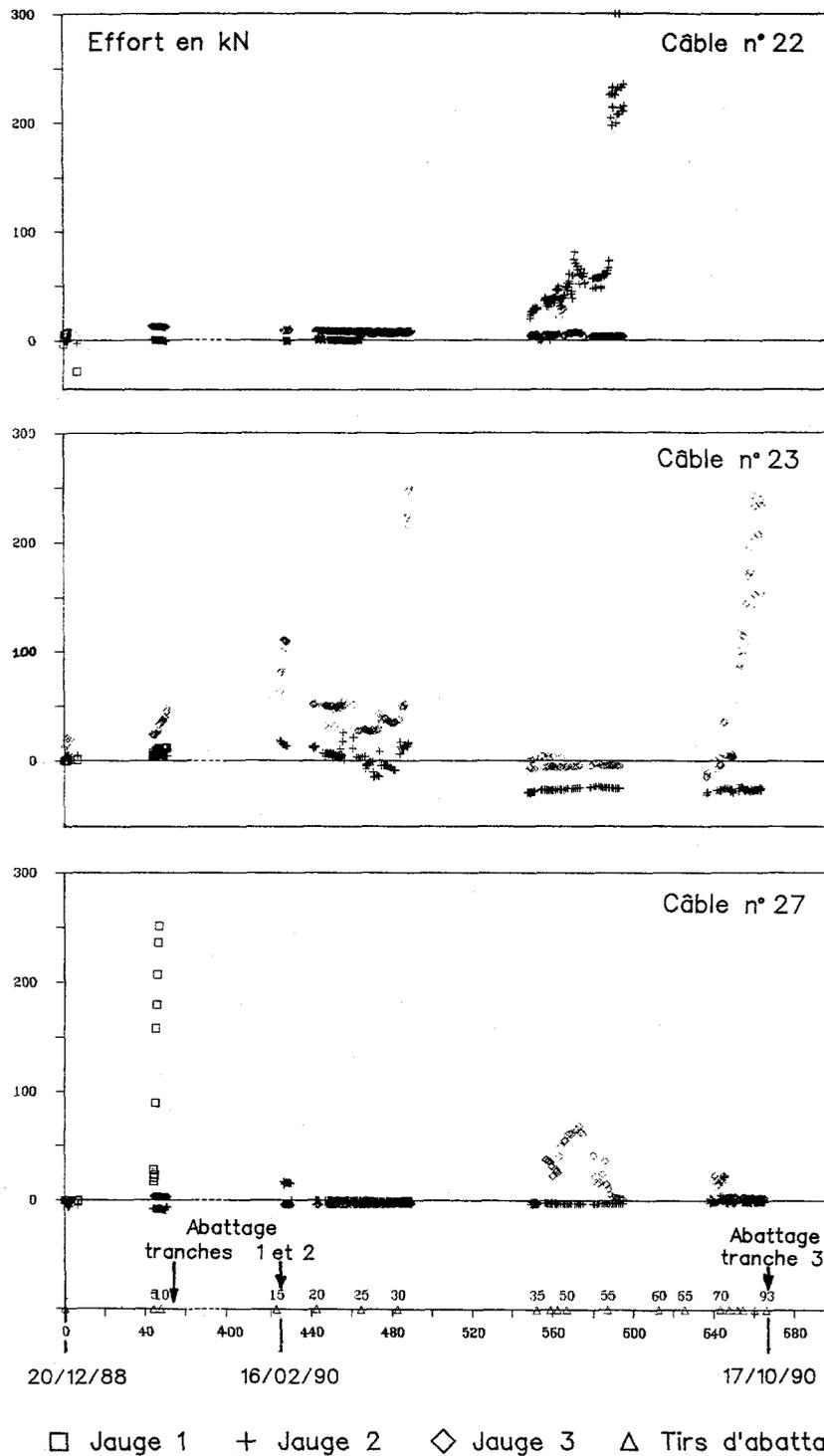


Fig.5 Répartition et évolution des efforts s'exerçant sur des câbles d'ancrage

du chantier minier à celui d'un assemblage de blocs rigides, délimités par les plans de discontinuités majeurs. Après chaque tir d'abattage dans les chantiers voisins, mettant en oeuvre une quantité d'explosif suffisante, des mouvements de réajustement de ces blocs les uns par rapport aux autres se produisent jusqu'à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre au sein de l'assemblage. Ceci se traduit en particulier par des variations importantes de l'intensité des efforts qui s'exercent, d'une part, d'un câble à l'autre et, d'autre part, le long d'un même câble. La mise en tension de certains câbles s'explique ainsi par une déstabilisation locale de l'équilibre de l'assemblage, due aux contraintes induites par le tir, la phase de déchargement de ces mêmes câbles témoignant au contraire d'un rééquilibrage de l'assemblage. Ainsi comme Fuller (1981) nous pouvons conclure que, dans le cas de la mine de Sotiel le soutènement par câbles à ancrage réparti a pour principal fonction de renforcer le massif rocheux fracturé et de maintenir l'intégrité de l'assemblage de blocs, condition bien sûr favorable à la stabilité et/ou à l'obtention rapide d'un nouvel état d'équilibre après chaque tir d'abattage.

#### 4 MODELISATION GEOMETRIQUE

Lorsqu'on veut renforcer un assemblage de blocs, il est nécessaire de connaître le nombre et la taille des blocs dont la stabilité n'est pas assurée, de manière à optimiser le dimensionnement de leur soutènement par boulonnage. A partir de levés de fracturation effectués dans plusieurs chantiers miniers et traités statistiquement afin de caractériser les principaux paramètres correspondant aux différentes familles de discontinuités préalablement identifiées, nous avons utilisé un générateur de blocs appelé Résoblok.

Ce logiciel est constitué de deux codes distincts dérivés de l'algorithme de base de Warburton (1987) qui décrit la déformation d'un massif rocheux fracturé comme étant un processus qui se passe exclusivement le long des discontinuités, les blocs proprement dits étant rigides et indéformables. Le premier code permet de reconstituer par simulation un réseau de discontinuités suivant l'algorithme défini par Héliot (1988). Le deuxième code analyse la stabilité de chacun des blocs suivant la théorie de blocs-clés proposée par Warburton (1987). Pour les blocs qui peuvent se déplacer, le type de mouvement est déterminé (chute libre, plan,

dièdre...) et un coefficient de sécurité vis à vis des risques de chute lui est assigné en fonction des caractéristiques mécaniques des discontinuités et des forces de confinement (Asof 1990).

L'analyse des résultats de Résoblok se fait à partir des statistiques de base (moyenne, écart-type...) et de la distribution du nombre et du volume total de blocs instables obtenue pour un ensemble donné de simulations.

De manière à juger de l'efficacité du soutènement par câbles d'ancrage, la stabilité du chantier minier a été étudiée en premier lieu sans soutènement, puis en tenant compte du schéma de boulonnage au câble pratiqué à Sotiel. En terme de cohésion, nous avons calculé la contribution d'un câble d'ancrage à la résistance au cisaillement d'un joint à partir de l'équation proposée par Rosengren (1987), en supposant un angle d'installation du câble de 30° avec la normale au joint, un angle de dilatance de 0° et un angle de frottement de 30° pour les joints. Une cohésion de 3 MPa a ainsi été calculée pour les joints renforcés.

79 simulations ont été effectuées pour chaque cas à savoir : excavation d'un chantier minier sans soutènement (cohésion nulle) puis avec soutènement (cohésion de 3 MPa pour les joints). Les principaux résultats de ces simulations sont récapitulés dans le tableau n° 1 ci-après. Avant de commenter ces résultats, signalons que, sans soutènement, 32 % seulement des simulations effectuées donnent plus d'un bloc instable avec une prépondérance (25 %) pour l'intervalle compris entre 1 et 10 blocs instables. 51 % de ces simulations ne donnent aucun bloc instable. Du point de vue du volume total des blocs instables, 50 % des simulations conduisent à un volume total inférieur à 0,001 m<sup>3</sup> mais près de 20 % correspondent à un volume total supérieur à 10 m<sup>3</sup>.

Avec un soutènement, 85 % des simulations n'indiquent aucun bloc instable. L'intervalle compris entre 1 et 10 blocs instables ne représente plus que quelques pourcents de l'effectif. En volume, près de 95 % des simulations obtiennent un volume total de blocs instables inférieur au m<sup>3</sup>. Ces premiers résultats démontrent, si besoin en était, l'effet bénéfique du renforcement par câbles d'ancrage sur la stabilité des couronnes.

Ceci dit, ce traitement préliminaire des résultats des simulations met essentiellement l'accent sur l'importance en effectif des blocs de très faible volume, inférieur à 0,001 m<sup>3</sup>. Lors des opérations de purge, la plupart de ces blocs sont éliminés et

présentent, dans tous les cas de figure, un facteur de risque beaucoup moins important que les blocs plus volumineux qui ne peuvent pas être éliminés par simple purge. Il faut donc mettre l'accent dans l'interprétation des résultats des simulations sur les blocs de plus grande taille, qui mettent véritablement en cause la sécurité du personnel et du matériel d'extraction, en les pondérant. La technique de pondération choisie a été décrite par Xu (1991). Elle consiste à diviser la somme des volumes compris dans un intervalle de volume préalablement choisi (par exemple, classe des blocs supérieurs à  $1 \text{ m}^3$  et inférieurs à  $10 \text{ m}^3$ ), par la somme de tous les volumes obtenus pour un ensemble donné de simulations, et de reporter la valeur cumulée en fonction de la racine cubique de la borne supérieure de la classe concernée. La courbe ainsi obtenue permet, au même titre qu'une courbe d'analyse granulométrique, de déterminer le volume cumulé des blocs représentant le passant à une certaine fraction du volume total des blocs instables. A titre d'exemple, dans le tableau 1, nous avons reporté le volume cumulé de ou des blocs représentant le passant à 35 %, 50 % et 65 % du volume total des blocs instables.

Tableau n° 1 : Résultats des analyses de stabilité de blocs

Blocs instables	Nombre		Volume total en $\text{m}^3$	
	sans câbles	avec câbles	sans câbles	avec câbles
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum	23,0	7,0	720,0	50,2
Moyenne	2,2	0,2	33,0	0,7
Ecart-type	4,1	0,9	120,0	5,7
V 35%			233,0	19,8
V 50%			343,0	31,3
V 65%			512,0	46,6

Avec le soutènement, on observe une augmentation considérable de la sécurité du chantier puisque le passant à 35 % du volume total des blocs correspond à un volume cumulé des blocs instables de l'ordre de  $20 \text{ m}^3$  au lieu de  $230 \text{ m}^3$  en l'absence de câbles d'ancrage. Notons qu'en avril dernier, un bloc de  $177 \text{ m}^3$  s'est détaché de la couronne non soutenue d'un chantier minier à la suite d'un tir d'abattage contigu au chantier. Ce volume est du même ordre de grandeur que les volumes de blocs instables déterminés par la modélisation

géométrique de la fracturation du gisement de Sotiel.

## 5 CONCLUSIONS

L'expérimentation menée dans la mine souterraine de Sotiel, en conditions réelles d'exploitation, a permis, en premier lieu, de valider un dispositif de mesure des efforts qui s'exercent sur des câbles à ancrage réparti soutenant la couronne d'un chantier d'extraction. La répartition et l'évolution des efforts ainsi mesurés dépendent bien sûr d'un certain nombre de facteurs géologiques et de la méthode d'exploitation, mais le comportement des câbles est sans aucun doute corrélé aux tirs d'abattage contigus. Ces tirs ont pour effet de perturber l'état d'équilibre du massif rocheux fracturé qui se comporte comme un assemblage de blocs renforcé par des armatures qui en assurent également l'intégrité. Le dimensionnement du soutènement par câbles d'ancrage suppose donc, dans le cas de la mine de Sotiel, une meilleure compréhension des interactions du massif rocheux et du soutènement. Pour ce faire, de telles expérimentations doivent se poursuivre dans d'autres contextes géologiques et miniers. Elles doivent aussi être menées parallèlement au développement de nouvelles approches pour la modélisation géométrique de la fracturation naturelle et du comportement mécanique des massifs rocheux, telles que les modèles de blocs qui fournissent déjà des résultats intéressants et directement exploitables par l'ingénieur.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Mrs C. Alvarez et J.A. Ros de la société minière Almagrera pour leur collaboration active et efficace dans l'expérimentation réalisée à Sotiel, et la Direction Générale "Science, Recherche et Développement" de la Commission des Communautés Européennes pour son soutien financier au projet.

## REFERENCES

- Alvarez, C.J. 1988. Sostienimiento con cables en la mina de Sotiel de Minas de Almagrera S.A. VIIIème congrès int. de la mine et de la métallurgie, Oviedo, Espagne.
- Asof, M. 1991. Etude du comportement mécanique des massifs rocheux fracturés en

- blocs (méthode à l'équilibre limite) : réalisation et applications. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 142 p.
- Choquet, P. et Miller F. 1988. Development and field testing of a tension measuring gauge for cables bolts used as ground support - CIM bulletin, vol 81, n° 919 p 53-59.
- Fuller, P.G. 1981. Pre-reinforcement of cut and fill stopes. Proceedings of the international conference on the application of Rock Mechanics to cut and fill mining. Swedish Institution of Mining and Metallurgy, pp. 55-63.
- Héliot, D. 1988. Generating a blocky rock mass. Int. J. Rock. Mech., Min. Sci and Geomech. Abstract, vol 25, n° 3, 1988, pp. 127-138.
- Jaeger, J.C. et Cook N.G.W. 1979. Fundamentals of rock mechanics. Chapman et Hall, 3ème édition, Londres, 1979, 593 p.
- Rosengren, K.J. et coll. 1987. Preplaced cable bolts for slope reinforcement in open cut mines - 6ème congrès international de mécanique des roches, Montréal, vol 1, pp. 491-495.
- Vinches, M. et Wojtkowiak F. 1991. Application combinée de l'analyse structurale et de l'instrumentation in situ au dimensionnement du soutènement par câbles d'ancrage. 7ème congrès international de mécanique des roches, Aachen, Allemagne, vol 2, pp. 1243-1246.
- Warburton, P.M. 1987. Implication of keystone action for rock bolt support and block theory, Int. J. Rock. Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstract, vol. 24, n° 5, pp 283-290.
- Xu, J. 1991. Simulation statistique de discontinuités et évaluation de la blocométrie de massifs rocheux. Application à l'analyse de l'écoulement et de la stabilité. Thèse de doctorat de l'Ecole des Mines de Paris, 146 p.