



HAL
open science

Paramètres nécessaires à l'utilisation d'un soutènement par câbles d'ancrage dans les excavations souterraines

D. Thibodeau

► **To cite this version:**

D. Thibodeau. Paramètres nécessaires à l'utilisation d'un soutènement par câbles d'ancrage dans les excavations souterraines. Journées de l'Association universitaire de Génie Civil, May 1992, Cachan, France. pp.183-90. ineris-00971842

HAL Id: ineris-00971842

<https://ineris.hal.science/ineris-00971842>

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.

Paramètres nécessaires à l'utilisation d'un soutènement par câbles d'ancrage dans les excavations souterraines.

Denis Thibodeau
Laboratoire de mécanique des terrains, INERIS, EMN

Mots clefs: Câbles d'ancrage, bloc clef, familles de joints, distribution statistique, modélisation, massif rocheux

1- Introduction

L'influence des câbles d'ancrage avec coulis de ciment sur la stabilité globale du massif rocheux n'est pas très bien cernée à l'heure actuelle. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre le comportement des câbles d'ancrage afin de développer un outil permettant de concevoir un schéma d'ancrage plus sûr et plus économique pour une configuration donnée.

En premier lieu, il faut connaître la structure du massif rocheux: les différentes familles de joints qui forment les blocs instables ou non, lors de l'excavation des galeries ou des chantiers. Le premier objectif de ce travail est donc de recueillir, de compiler et d'analyser les informations nécessaires pour générer et évaluer un modèle de blocs grâce au logiciel "RESOBLOK".

Les résultats de RESOBLOK montrent qu'au moment de l'interprétation, il faut pondérer les résultats des volumes instables pour accorder une plus grande importance aux "gros blocs" (ceux ayant une taille susceptible de causer des problèmes de sécurité) qu'aux petits blocs (ceux pouvant être éliminés lors d'une purge). Il faut donc intégrer dans l'interprétation des résultats des mécanismes permettant de mettre l'accent sur les blocs de taille plus importante.

Une analyse en composantes principales sur les résultats obtenus à partir des jauges installées sur des câbles dans une mine sera incluse. L'auscultation de câbles en place a été faite pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent le comportement des câbles d'ancrage.

Cette ACP montre le rôle stabilisateur des câbles pendant et après un tir jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre de blocs s'instaure au toit de l'excavation. Il semble que les tirs soient le principal moteur qui amorce le mouvement des blocs et mette ainsi en tension les câbles.

1.2- La mine de Sotiel

1.1.1- Description

La mine de Sotiel, appartenant à la société minière Almagrera S. A., est située en Andalousie, à une cinquantaine de km au NNE de la ville de Huelva qui elle-même se trouve à une centaine de km à l'Ouest de Séville (figure 1).

Le gisement fait partie de la ceinture pyritique de la péninsule ibérique. Six cent mille tonnes de minerai par an sont extraites avec des teneurs moyennes de 0,66% de cuivre, de 1,6% de plomb, de 4,2% de zinc et de 42% de soufre. L'exploitation s'effectue selon la méthode mécanisée dite des tranches montantes et remblayées (mechanized cut & fill).

1.1.2- Conditions géotechniques et d'exploitation

Le gisement est constitué d'une bande pyritique de 60 m d'épaisseur en moyenne qui pend à 45° vers le Nord (figure 2); La bande pyritique, compétente ($\sigma_c=140\text{MPa}$), est limitée au toit et au mur par des schistes. Au mur, après quelques mètres, des tufs volcaniques particulièrement compétents succèdent aux schistes.

Journées de l'Association Univ. de Génie Civil, 1
Caen, 14-15 mai 1992

Avant de pouvoir effectuer une génération de bloc, il faut connaître les paramètres statistiques définissant les différentes familles de joints. Une campagne de relevés structuraux a été effectuée en juillet 1991 dans la mine de Sotiel. Les tableaux 1 et 2 donnent les principaux paramètres statistiques des familles de joints établis grâce au logiciel FSTAT (Sadki, 1990).

Tableau 1: paramètres statistiques des familles de joints.(Bloc inférieur, Hueco 4704)

Famille	Nombre de joints	Orientation (Notation française)	Coefficient de Fisher	Espacement			
				Moyen (m)	Max. (m)	Ecart type	Type de distribution
1	53	094S84	24	0,78	4,6	0,105	Exponentielle $\lambda=1,2$
2	19	153B45	13	0,85	3,35	0,011	Lognormale $E=2,34 \sigma=0,017$
3	48	171W72	9	1,79	2,75	0,005	Normale
4	14	181E56	39	1,0	2,5	0,008	Exponentielle $\lambda=1,0$

Tableau 2 paramètres statistiques des familles de joints.(Bloc supérieur, Hueco 3310)

Famille	Nombre de joints	Orientation (Notation française)	Coefficient de Fisher	Espacement			
				Moyen (m)	Max. (m)	Ecart type	Type de distribution
1	71	182W67	29	0,66	3,4	0,008	Exponentielle $\lambda=1,51$
2	28	269N23	29	0,41	1,25	0,003	Exponentielle $\lambda=2,48$
3	32	269S61	30	0,44	1,65	0,005	Exponentielle $\lambda=2,28$

La première constatation faite à partir des tableaux 1 et 2 est que les familles de joints n'ont pas la même orientation partout dans la mine. En effet, une rotation de 90° entre les familles du bloc supérieur et celles du bloc inférieur est observée. De plus la dispersion est très grande au sein d'une même famille (coefficient de Fisher faible). Ces familles ont été utilisées pour la génération de discontinuité par le logiciel RESOBLOK.

2.2- Modélisation géométrique

Comme il a été mentionné antérieurement, deux géométries différentes ont été utilisées. Elles correspondent aux différentes caractéristiques des familles de joints du bloc inférieur et du bloc supérieur de la mine de Sotiel. En ce qui concerne la zone d'intérêt étudiée, la figure 6 montre le volume total pris en considération dans l'analyse ainsi que les dimensions de l'excavation étudiée. Elle montre aussi un exemple de simulation de blocs instables. La géométrie d'excavation représente le vide créé entre 4 post-piliers d'une chambre donnée. Le même type d'excavation a été utilisé pour les deux niveaux de la mine.

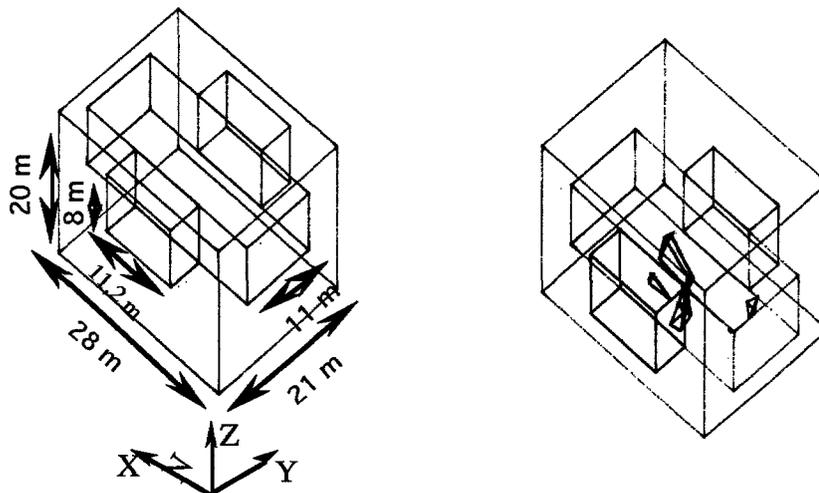


Figure 6: Zone d'intérêt avec excavation et résultat de la simulation no 15

Les résultats de l'étude des propriétés mécaniques des joints n'étant pas disponibles au moment de la rédaction de ce rapport, des valeurs conservatrices de 0 pour la cohésion et de 30° pour l'angle de frottement ont été utilisées. En plus, les contraintes de confinement sont considérées comme étant nulles. Ceci permet de faire une première approximation et d'éliminer tout problème rencontré lors des prochaines simulations effectuées avec les véritables propriétés mécaniques des joints.

Pour chaque cas, 79 simulations ont été effectuées.

2.3- Résultats

Seuls les résultats du bloc inférieur sont rapportés car ils ont une grande similitude avec ceux du bloc supérieur. L'analyse des résultats se fait à partir des statistiques de base (moyenne, écart-type, etc) et de la distribution de taille pondérée en volume total obtenue pour un ensemble de simulations données. La pondération se fait d'une manière similaire à celle décrite par Xu (1991). Il s'agit de diviser la somme des volumes compris dans un intervalle de volume préalablement choisi, 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.

$$G = \frac{\sum_{k=1}^G \sum_{i=1}^n V_i}{V_t}$$

où G représente la valeur cumulée après chaque classe donnée et V_i représente chaque volume compris dans une classe donnée et V_t et le volume total. Les classes suivantes comprenant le nombre de simulation pour un fichier scénario donné ayant un volume total de blocs instables ont été sélectionnées:

G1- inférieur à $0,001 \text{ m}^3$

G2- inférieur à 1 m^3 et supérieur à $0,001 \text{ m}^3$

G3- inférieur à 10 m^3 et supérieur à 1 m^3

G4- inférieur à 100 m^3 et supérieur à 10 m^3

G5- inférieur à 1000 m^3 et supérieur à 100 m^3

La figure 7 donne un exemple de distribution de taille pondérée en volume total de blocs.

Les intervalles suivants ont été choisis pour le nombre de blocs instables par simulation:

B1- aucun bloc instable

B2- 1 bloc instable

B3- Entre 1 et 10 blocs instables

B4- entre 10 et 100 blocs instables

Ceci permet, comme pour une analyse granulométrique, de trouver le volume total passant une certaine fraction (exemple volume passant 0,35, 0,5 et 0,65). La pondération est utilisée, comme Xu (1991) l'indique, pour diminuer l'importance accordée au nombre de simulation par classe volumique, et insister sur l'importance de la taille, ce qui amène une approche plus conservatrice de l'analyse de stabilité.

2.4- Bloc inférieur

Le tableau 3 donne les principaux résultats obtenus grâce aux simulations effectuées pour le bloc inférieur. Les figures 8 et 9 donnent les pourcentages de blocs instables et de volume par classe pour l'ensemble des simulations de l'excavation complète.

En ce qui concerne le nombre de blocs instables, les intervalles B1 et B3 sont prépondérants. B1 représente 51% de toutes les simulations et B3, 25%. Du point de vue du volume total par simulation, 50% des simulations se retrouvent dans l'intervalle G1 et pour le reste des classes soit G2, G3, G4 et G5 des pourcentages de 16%, 15%, 12% et 7% sont trouvés respectivement. La courbe des pourcentages cumulés en fonction des intervalles (figure 10) montre une distribution exponentielle. Le fait que 50% des simulations se trouvent dans la classe G1 explique qu'une pondération est nécessaire pour diminuer l'effet de nombre et accentué l'effet de taille afin d'obtenir une meilleure évaluation des blocs potentiellement dangereux et d'établir un schéma de boulonnage adéquat.

2.5- Effet des câbles

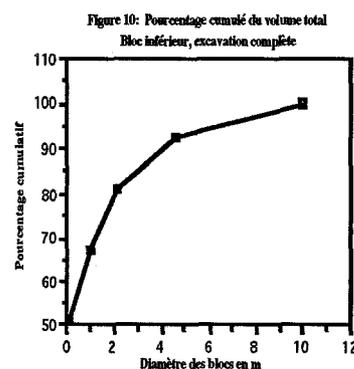
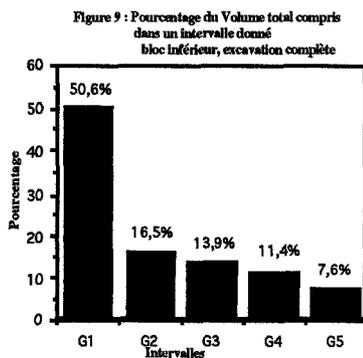
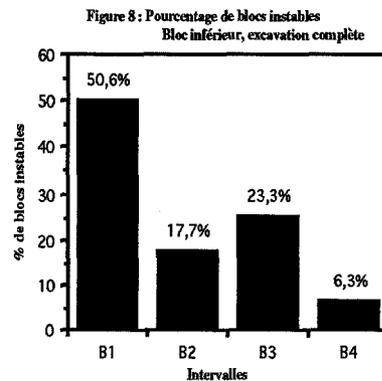
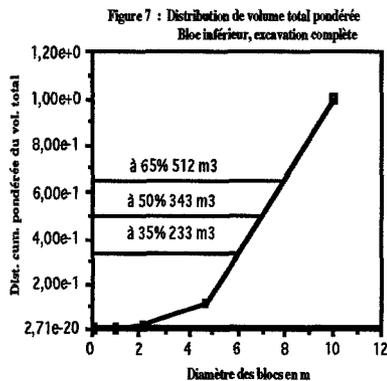
Pour essayer de tenir compte du schéma de câblage utilisé par Sotiel dans l'analyse de stabilité, une approche très simpliste a été utilisée. La cohésion des joints peut-être incluse comme paramètre dans BSA. Les analyses de stabilité précédentes avaient une cohésion de 0. Pour prendre en compte le boulonnage, une valeur arbitraire de cohésion de 3 MPa a été utilisée.

Les résultats obtenus (tableau 4 et figures 11, 12) pour le bloc inférieur montrent sans équivoque que le schéma de câblage utilisé à Sotiel est très efficace. En effet, les valeurs moyennes du nombre

de blocs instables et de volume total par simulation sont 10 fois moins importantes quand les câbles sont utilisés. De même, pour le nombre de blocs instables et le volume total par simulation, des pourcentages d'effectif de plus de 85% sont trouvés pour les classe B1 et G1. La valeur de volume

Tableau 3: Résultats d'analyse de stabilité pour le bloc inférieur

Statistiques	Excavation complète	
	Nombre de blocs instables	Volume total (m ³)
Minimum	0,00	0,00
Maximum	23,00	720,00
Moyenne	2,20	33,00
Ecart type	4,10	120,00
Médiane	0,00	0,00
G0,35		233,00
G0,50		343,00
G0,65		512,00



total passant G0,35 après pondération était de 233 m³ pour l'excavation sans soutènement et passe à 19,82 m³ avec soutènement. Tout cela démontre l'augmentation importante de la sécurité grâce à l'utilisation de câbles d'ancrage pour les conditions étudiées et toutes choses égales par ailleurs.

3- Traitement statistique des résultats de mesure d'effort sur les câbles

Afin de mieux discerner les différentes relations des câbles entre eux et avec les tirs plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées.

Cette étude statistique a pour principal objectif de voir s'il y a une relation directe entre les contraintes induites dans la sous-chambre 2905 par les différents tirs et l'effort enregistré par des jauges Tensmeg, mises au point par l'université Laval de Québec, au moment ou peu après le tir. Les variables utilisées sont les efforts mesurés par les jauges au cours des tirs et les contraintes induites par les tirs. Les phases d'acquisition de données correspondent aux périodes de non-production de la sous-chambre 2905.

De plus cette étude permettra de définir certains mouvements relatifs de blocs dans la chambre 2905 en comparant les périodes de tension de câbles aux périodes de relâchement d'autres câbles.

Pour tenter de corrélérer l'effort mesuré dans les câbles lors de différents tirs, la distance du tir à la chambre 2905 ainsi que la quantité d'explosif utilisée doivent être prises en compte. Jaeger & Cook (1979) mentionnent que Duvall et al. calculèrent une vitesse particulière maximum à partir de l'équation suivante:

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

A est la vitesse particulière maximum

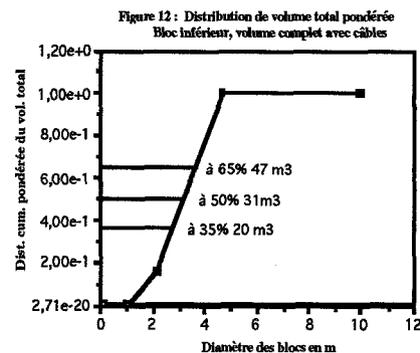
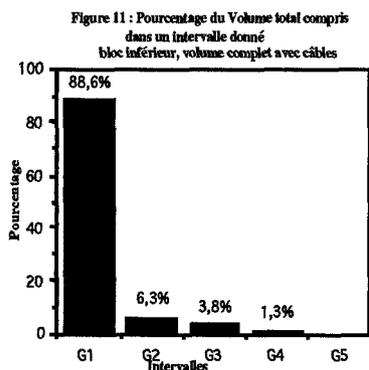
H et n sont des constantes empiriques

W est la masse en kg d'explosif et

r est la distance en m entre le centre de chambre 2905 et la position du tir.

Tableau 4: Résultats d'analyse de stabilité avec soutènement

Statistiques	Bloc inférieur	
	Nombre de blocs instables	Volume total (m3)
Minimum	0,00	0,00
Maximum	7,00	50,22
Moyenne	0,23	0,76
Ecart type	0,91	5,68
Médiane	0,00	0,00
G0,35		19,82
G0,50		31,33
G0,65		46,61



Une fois la vitesse particulière connue, nous pouvons calculer la contrainte due au tir σ (MPa), à l'aide de l'équation suivante (Jaeger & Cook, 1979):

$$\sigma_{\text{tir}} = \frac{-A * E(1 - \nu)}{\left\{ (1 + \nu)(1 - 2\nu) \left[\frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} \quad \text{ou}$$

E est le module de Young du massif rocheux

ν est le coefficient de Poisson

ρ est la densité du massif rocheux.

Après calcul de la contrainte induite dans la chambre 2905, des analyses en composantes principales sont faites pour faire ressortir les relations entre les tirs, les efforts mesurés dans les câbles et les relations entre les câbles. Les efforts mesurés par les jauges et les contraintes induites par les tirs

ont été utilisés comme variables. (Note: toute jauge ayant une valeur constante pendant la durée d'une phase d'acquisition de données ne peut pas être utilisée lors de l'analyse en composantes principales.)

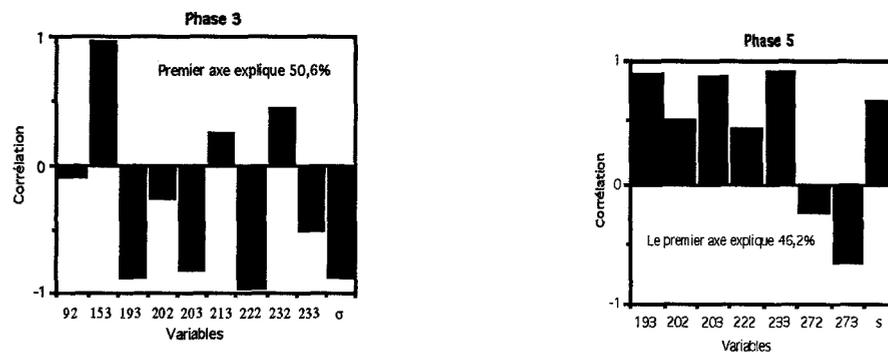
Les relations entre les tirs et les câbles seront décrites d'une manière qualitative car il est difficile à l'aide de l'analyse en composantes principales d'exprimer ces relations sous forme quantitative. Les corrélations entre variables pour la première composante principale seront étudiées. Le pourcentage expliqué par le premier axe principal est respectivement de 50,6%, de 43,2% et de 46,2% pour les phases 3, 4 et 5. Cela semble suffisant pour décrire qualitativement les relations entre les différentes variables. La figure 14 donne les corrélations entre les variables et le premier axe principal pour les phases 3 et 5.

3.1- Discussion

Il ressort de cette étude statistique qu'il y a une relation certaine entre les contraintes induites par les tirs et les tensions enregistrées par les jauges. En effet, plusieurs jauges montrent des phénomènes cycliques de tension-relâchement qui peuvent s'expliquer de la manière suivante: Lors d'un tir, une surcontrainte se produit qui occasionne une déstabilisation locale de l'équilibre des blocs, donc les câbles sont sollicités pour maintenir l'intégrité du toit. Par la suite, l'état de surcontrainte s'estompe, les blocs se rééquilibrent les uns par rapport aux autres jusqu'à l'obtention d'un nouvel état d'équilibre quasi stable qui permet un relâchement des efforts dans les câbles. Aux tirs suivants, le phénomène d'ajustement des blocs se reproduit.

Certaines jauges se relâchent graduellement lors des phases d'acquisition de données, pendant que d'autres se tendent progressivement. Ce phénomène peut s'expliquer par un rééquilibre à plus grande échelle des blocs où certains câbles permettent la redistribution des contraintes de confinement et la stabilisation de blocs qui agissent et soutiennent d'autres blocs dans lesquels les câbles se relâchent totalement ou partiellement.

Figure 14: Représentation graphique des corrélations entre les variables et le premier axe principal



* Les nombres correspondent aux numéros de jauge sur le câble et σ aux contraintes induites par le tir.

Le fait que dans une même phase d'acquisition de données, il se trouve des jauges dont les efforts s'opposent (tension-relâchement) indique probablement la présence de blocs adjacents qui interagissent les uns avec les autres. Pendant qu'un bloc induit un effort sur les câbles, le bloc adjacent se stabilise, ce qui induit un relâchement dans les câbles de ce bloc (exemple: phase 3, jauges 193 et 153).

Fuller, en 1981 a trouvé des résultats similaires et a conclu que le soutènement par câbles dans le toit d'un chantier a pour principal fonction de renforcer et de stabiliser le massif rocheux immédiatement après un tir jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre soit atteint. Dans l'ensemble ces résultats préliminaires semblent confirmer la théorie du bloc-clé par le fait que les blocs interagissent entre eux, se rééquilibrent et se supportent les uns les autres avec l'aide des câbles.

4- Conclusion

Cette partie a pour but de faire ressortir et de développer les principaux points mentionnés dans les sections précédentes.

La section 3 s'attarde sur le rôle stabilisateur des câbles pendant et après un tir jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre de blocs s'instaure au toit de l'excavation. Il ressort de cette analyse qu'une connaissance de l'action de l'énergie dégagée lors d'un tir sur les discontinuités est très importante. Il semble que se soit le principal moteur qui amorce le mouvement des blocs et mette ainsi en tension les

câbles. Pour mieux saisir le phénomène de variations des contraintes et leurs effets sur la stabilité de l'ouvrage, l'état de contrainte autour de l'excavation avant, pendant et après un tir doit être connu. De plus une série de tirs successifs peut initier une réponse du massif équivalente à un phénomène de fatigue avec mise en tension et relâchement des câbles ou du massif se succédant plus ou moins rapidement.

Les résultats de RESOBLOK de la section 2 montrent qu'au moment de l'interprétation, il est nécessaire de tenir compte des effets de nombre et de taille pour amplifier l'importance des blocs présentant une taille susceptible de causer des problèmes de sécurité. Le traitement préliminaire des résultats indique clairement un pourcentage des effectifs inférieur à 0,001 m cube très important de 45% à 50% pour l'excavation. Lors des opérations de purge, la plupart de ces blocs sont éliminés et présentent un facteur de risque beaucoup moins important que les blocs plus volumineux qui ne peuvent pas être éliminés par purge. Il faut donc intégrer dans l'interprétation des résultats des mécanismes permettant de mettre l'accent sur les blocs de taille plus importante qui causent les problèmes de sécurité. Un de ces mécanismes, déjà mentionné, est la pondération qui a permis de trouver que le volume de blocs instables inférieur à 0,35 du volume total est d'environ 225 m cube pour toutes les simulations. Il y a donc beaucoup plus de chance d'avoir un bloc ou un ensemble de blocs totalisant 225 m cube ou moins qui se détache du toit de l'excavation. Un événement observé en avril 1991 à la mine de Sotiel vient étayer ce résultat. Un bloc de 177 m cube situé dans le "hueco" 3105 de la chambre 1350 du bloc inférieur s'est détaché du toit à la suite d'un tir contigu, (ceci joue également en faveur de l'importance des tirs sur les mouvements de blocs). Cette valeur de 177 m cube se trouve comprise dans le champ des valeurs obtenues par le modèle utilisé pour les deux niveaux sans soutènement.

La principale limitation de RESOBLOK qui est également son principal avantage, est l'approche simpliste utilisée qui tient compte d'une seule valeur pour respectivement l'angle de frottement et la cohésion, qu'elles que soient les familles de joints considérées et pour une géométrie donnée, ce qui limite vraiment la portée de l'analyse des résultats.

Ce travail a permis de déterminer les paramètres nécessaires pour générer une série de simulations et d'analyses de stabilité à l'aide des logiciels RESOBLOK et BSA. Ces paramètres sont, entre autres: l'orientation, l'espacement pour différentes familles de fractures et les caractéristiques géomécaniques des joints.

Finalement, bien que les caractéristiques géomécaniques des joints n'étaient pas connues, le travail accompli a permis de valider l'approche utilisée, car la comparaison entre les résultats obtenus sans tenir compte de la cohésion semble s'accorder aux conditions rencontrées dans la mine en l'absence de soutènement. La simulation du soutènement par câbles par l'introduction d'une cohésion dans BSA montre une diminution spectaculaire du nombre et du volume total de blocs instables obtenus par simulation, ce qui correspond à la réalité quand un système de renforcement du massif rocheux est mis en oeuvre.

5- Bibliographie

- 1- Alvarez, C. J.; Sostenimiento con cables en la mina de Sotiel de Minas de Almagrera S. A., VIII ième congrès international de la mine et de la métallurgie, Oviedo, octobre 1988.
- 2- Asof, M.; Effet d'une contrainte de confinement dans le calcul de la stabilité de blocs isolés, Laboratoire de mécanique des terrains, Ecole des mines de Nancy, Inéris, rapport interne, avril 1990, 26 pages.
- 3- Baroudi, H. et coll.; Utilisation du générateur de blocs RESOBLOK dans des conditions géologiques complexes dans une mine à ciel ouvert, Proceedings International Conference of Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienne, 1990.
- 4- Fuller, P. G.; 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, 1981, pp. 55-63.
- 5- Fuller, P. G.; Cable Support in Mining. A Keynote Lecture, Proceedings of the Symposium on Rock Bolting, Abisko, 1983, pp. 511-523.
- 6- Heliot, D.; Generating a Blocky Rock Mass, Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstract, vol. 25, no 3, 1988 pp. 127-138.
- 7- Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W.; Fundamentals of Rock Mechanics, Chapman and Hall, third edition, London, 1979, 593 pages.
- 8- Morales, J. R.; The Sotiel Mine, Mining Magazine, février 1986, pp. 132-136.
- 9- Pine, R.-J. et Wojtkowiak, F.; Stabilité et confortement d'ouvrages miniers. Application au boulonnage par câbles, BRGM, rapport interne, 1990.
- 10- Pine, R.-J. et Wojtkowiak, F.; Stabilité et confortement d'ouvrages miniers. Application au boulonnage par câbles, BRGM, rapport interne, 1991.
- 11- Sadki, H.; Traitement statistique de la fracturation, algorithmes de base, Laboratoire de mécanique des terrains, Ecole des mines de Nancy, Inéris, rapport interne, 1990, 47 pages.
- 12- Warburton, P. M.; Application of a New Computer Model for Reconstructing Blocky Rock Geometry- Analysing Single

Block Stability and Identifying Keystones, Proceedings of the 5th International Congress of Rock Mechanics, Melbourne, vol. 2, 1983, pp. F225-F230.

13- Warburton, P. M.; Implication of Keystone Action for Rock Bolt Support and Block Theory, Int. J. Rock Mech., Min. Sci. & Geomech. Abstract, vol. 24, no 5, 1987, pp. 283-290.

14- Xu, J.; Simulation statistique de discontinuités et évaluation de la blocométrie de massif rocheux. Application à l'analyse de l'écoulement et de la stabilité, Thèse soutenue à l'Ecole des mines de Paris, 1991, 146 pages.