

Modélisation du comportement du foudroyage par la méthode des éléments distincts : cas d'une longue taille

Marwan Al Heib, Jack-Pierre Piguet, Karim Ben Slimane

▶ **To cite this version:**

Marwan Al Heib, Jack-Pierre Piguet, Karim Ben Slimane. Modélisation du comportement du foudroyage par la méthode des éléments distincts : cas d'une longue taille. 1. Canadian Symposium on Numerical Applications in Mining and Geomechanics, Mar 1993, Montréal, Canada. pp.100-109. ineris-00971857

HAL Id: ineris-00971857

https://ineris.hal.science/ineris-00971857

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.

Modélisation du comportement du foudroyage par la méthode des éléments distincts : cas d'une longue taille

Al Heib M.M. : Ingénieur en thèse. Ecole des Mines de Nancy-INERIS
Piguet J.P. : Prof. Ecole des Mines de Nancy-INERIS
Ben Slimane K. : Ingénieur INERIS

RESUME

L'article porte sur la modélisation numérique du comportement d'une taille foudroyée en milieu stratifié, et sur son interaction avec le massif. La modélisation vise à étudier particulièrement le processus ou bien le déroulement du phénomène de foudroyage et non pas le mécanisme complet. On étudie le processus de la chute des blocs du foudroyage et ses conséquences pour le reste de l'environnement (affaissements, modifications de chargement etc...). La méthodologie suivante est adoptée en considérant que le calcul se fait en trois étapes principales :

1- une phase de consolidation sans excavation. Pendant cette phase, les joints verticaux ont un angle de frottement très élevé. 2 - une phase simulant l'avancement de la taille. 3 - la dernière phase correspond au foudroyage. Les joints dans la zone foudroyée se voient attribuer un angle de frottement très faible.

Une validation des résultats est établie entre les mesures d'affaissement in situ et le modèle. De plus, une comparaison avec les résultats d'un modèle continu a été réalisée.

ABSTRACT

The model simulates a longwall mining face. The behaviour of rocks mass can be studied by using Distincts Elements method. We are using numerical models for studying the interaction between the rock mass and the mining zone. The model particularly analyses the processus of the goaf phenomena but not the complete mechanism. We study the blocks movement and the consequences for the environment (subsidence, stresses modification, etc...). We analyse the conditions for the first movement of goaf, the evolution and the concerned volume of rock. The methodology adopted follows three main steps :
- a consolidation phase without excavation in which the induced joints have a very high friction angle - simulation of longwall mining excavation. - the third step is the goaf processus. The joints of the goaf zone have very small friction angle.
The validation of the results is set up between the curve of in situ subsidence measurements and the values of subsidence model. Thus, a comparison has been achieved between the results of finite elements models and distinct elements models. The results are encouraging for planification problems.

First Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics, Montréal, 27-30 mars 1993, pp. 100-109

1. Introduction

En général, les modélisations numériques des excavations minières par foudroyage ne prennent pas en compte la forme géométrique finale de l'assemblage de blocs constitué par le foudroyage des bancs du toit. La zone considérée par ce processus peut être assez importante et son extension dépend de la profondeur, des caractéristiques de la roche, de l'état de contrainte, etc... Plusieurs auteurs (1) ont déduit la forme du foudroyage à partir d'observations in situ et de modélisation physique (2, 3). Il s'agit de blocs plus ou moins séparés par des vides (4). Avant le foudroyage, ces blocs étaient délimités par des plans de stratification d'une part, par un réseau de fissures engendrées par la rupture des bancs du toit (Fig 1) d'autre part.

Nous nous proposons de simuler numériquement le processus du foudroyage et d'en étudier les interactions avec le massif. Une étude de sensibilité aux paramètres géométriques et géomécaniques a été conduite. Nous avons utilisé le code UDEC (ITASCA) pour notre modélisation; celui-ci avait déjà été utilisé par d'autres auteurs pour étudier l'influence d'une taille dans un milieu discontinu (5).

2. Présentation des modèles

2.1. Géométrie du modèle

Le modèle est présenté sur la figure 2. Nous avons considéré que le milieu est stratifié. Des joints horizontaux sont introduits au toit et au mur de la couche de charbon. La distance entre ces joints horizontaux est égale à 25 m pour le haut toit. On estime que l'épaisseur du bas toit est de l'ordre d'une dizaine de mètres et qu'il est composé de plusieurs bancs minces (6). Nous avons modélisé ici un bas toit de 20 m d'épaisseur avecdes bancs de 5 m.

Par ailleurs, le toit et le mur sont prédécoupés par des discontinuités verticales, formant avec la stratification des grands blocs de dimensions 25 x 25 m. Elles sont introduites au toit et au mur de la couche exploitée, sur une distance de 50 m seulement à partir de la couche.

La zone du foudroyage prévu est décomposée sous forme de petits blocs. Les dimensions de cette zone sont égales à 65 x 15 m. Des joints plus ou moins verticaux ($90° \pm 20°$) sont introduits et correspondent aux fissures engendrées par la rupture du bas toit. La distance entre ces joints est de 5 m. Les volumes des blocs dans cette zone varient entre 20 et 80 m^3 en considérant une épaisseur unitaire du modèle de 1 m, 80 % de ces blocs ont un volume de 25 m^3. Ce modèle comprend au total 128 blocs totalement déformables, 2195 éléments et 1874 noeuds. Les éléments au sein des blocs sont de type triangulaire à 3 noeuds.

2.2. Conditions aux limites

Nous avons empêché les déplacements verticaux à la partie inférieure du modèle, ainsi que les déplacements horizontaux aux deux bords du modèle, l'un à cause de la symétrie, l'autre parce qu'il est considéré comme très loin de l'excavation. Le bord supérieur a des

déplacements libres. La taille modélisée est située à 850 m de profondeur. Le modèle est chargé avec des contraintes verticales dues au poids des terrains sus-jacents.
Le rapport des contraintes Horizontales /Verticales est égal à 0.5.

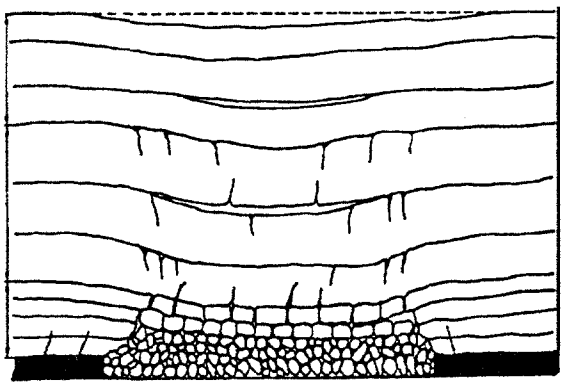


Fig. 1: Répartition des zones au-dessus la taille

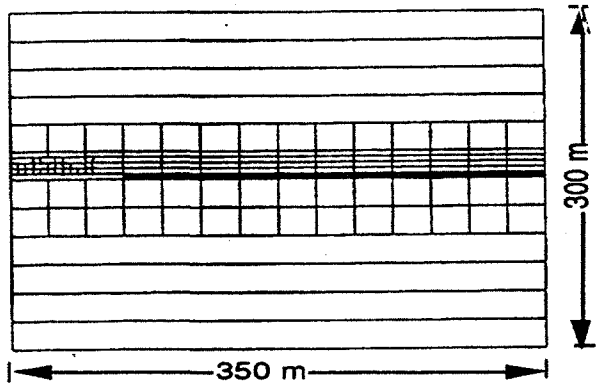


Fig. 2 : Modèle d'étude par la méthode des éléments distincts (UDEC)

2.3. Caractéristiques géomécaniques

Les caractéristiques géomécaniques des roches (le toit et le mur en calcaire et la couche de charbon) et des joints sont représentées dans le tableau 1. En ce qui concerne les joints, ils sont divisés en trois groupes de caractéristiques différentes :

- les joints horizontaux;
- les joints verticaux à large pas ;
- les joints horizontaux et verticaux dans la zone foudroyée à pas resserré.

Les raideurs normales (K_n) et les raideurs tangentielles (K_s) sont identiques pour les trois

MATERIAUX.	E (MPa)	ν	K (MPa)	G (MPa)	Kn (MPa/m)	Ks (MPa/m)	φi	φf
1 : Calcaire	10000	0,1	4500	4200				
2 : Charbon	2000	0,3	1700	770				
3 :Joints horizontaux					10000	10000	50°	50°
4 : Joints Verticaux					10000	10000	89°	50°
5 : Joints de foudroyage					10000	10000	89°	15°

Tableau 1 : Caractéristiques géomécaniques du modèle

familles. Nous avons considéré que les joints ne disposent ni de cohésion ni de résistance à la traction.

3. Phases du calcul

Nous avons adopté la méthodologie suivante en considérant que le calcul se fait en trois étapes principales :

1- une phase de consolidation sans excavation après laquelle nous devons obtenir les contraintes initiales dans le massif avant toute excavation. Pendant cette phase, les joints verticaux ont un angle de frottement initial très élevé égal à 89° ($\tan\phi i = 100$). Ils sont considérés en fait comme des joints fictifs. A la suite de cette phase, nous initialisons à nouveau les déplacements (dûs à la consolidation) à zéro ; les déplacements finaux seront donc uniquement dus à l'excavation.

2- une phase simulant l'excavation et l'avancement de la taille, pendant laquelle nous gardons les caractéristiques mécaniques initiales des joints. Une nouvelle distribution des contraintes s'établira dans les blocs du modèle.

3- la dernière phase correspond au foudroyage. Les fractures induites par l'exploitation commencent à apparaître au toit et au mur. Pour simuler cela, on modifie l'angle de frottement des fractures qui devient égal à 50° (angle final, $\tan\phi f = 1{,}25$).

Les fractures dans la zone foudroyée (joints horizontaux et verticaux) se voient attribuer un angle de frottement très faible de l'ordre de 15° ($\tan\phi f = 0{,}25$). Le calcul se poursuit (en augmentant le nombre de cycles) jusqu'à ce que l'on obtienne un nouvel équilibre de l'ensemble des blocs.

4. Résultats et analyses

4.1. Description du mouvement

Nous constatons qu'après le creusement de l'excavation (au terme de 3000 cycles de calcul), les blocs formant la zone foudroyée fléchissent ensemble. Les blocs formant le mur se déplacent vers le vide très rapidement et cessent de se déplacer dans la suite du calcul. Les premiers blocs du bas toit entrent en contact avec le mur après 7000 cycles. Les blocs du haut toit, à 25 m de la couche exploitée, suivent le mouvement. A 12000 cycles, le nombre de blocs qui reposent sur le mur augmente. Des vides apparaissent dans toute la zone de manière aléatoire. Les nouveaux vides sont surestimés car le foisonnement de blocs n'est pas introduit dans les calculs. En raison d'un fort confinement dans cette zone, certains blocs sont stables. Des arcs-boutements se forment par rotation des blocs. L'équilibre total est atteint après 33000 cycles. La forme finale du foudroyage est présentée sur la figure 3. Le déplacement final des blocs du bas toit est égal à l'ouverture de la couche de charbon. Cette forme du foudroyage est comparable à celle qui est observée dans la mine (Fig. 1).

Les fortes concentrations des contraintes de compression enveloppent un volume important. Elles se localisent aux bords de la taille jusqu'à 50 m au-dessus de la couche

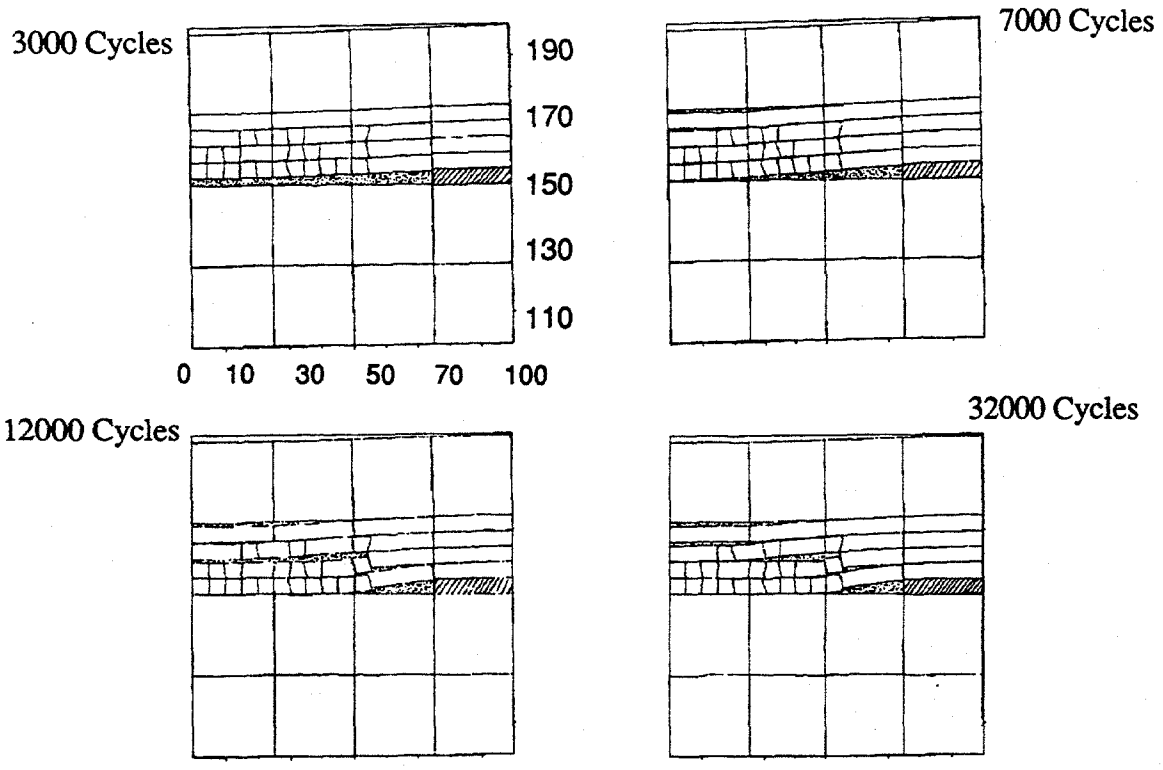


Fig. 3 : Etat des blocs dans la zone foudroyée en fonction du nombre de cycles

exploitée. Elles se trouvent aussi dans le haut toit à plusieurs niveaux (à 70 , 90 et 120 m de la couche exploitée), au milieu de la taille avec des valeurs moins importantes. Les contraintes principales de traction sont associées aux fortes contraintes de compression aux bords de la taille. Elles sont aussi très importantes dans les fibres inférieures des bancs de haut toit et à plusieurs niveaux. La contrainte de traction vaut environ 4 fois la contrainte horizontale initiale qui était en compression. L'extension de la zone détendue, qui peut intéresser pratiquement une grande surface d'un plan de faille ou une discontinuité, peut faciliter un cisaillement sur le plan de faille qui induira une sollicitation dynamique dans les chantiers pouvant se traduire en des coups de terrains, même dans le cas d'une taille isolée (7, 8, et 9). Dans la zone foudroyée, les contraintes de traction varient entre 1 MPa et 2,5 MPa. En revanche, les contraintes de compression varient entre 2 MPa et 25 MPa, pour une contrainte initiale verticale de 20 MPa.

4.4. Comportement d'un banc de stratification

Les bancs de stratification ont un comportement à la flexion semblable au comportement de poutres encastrées. Les contraintes horizontales sur la fibre inférieure sont des tractions. La

valeur maximale est au milieu de la taille. Aux bords de la taille, cette contrainte horizontale s'annule. A la fibre supérieure, entre le bord de la taille et une distance de 100 m, de part et d'autre les contraintes horizontales sont en traction. A partir de 250 m du milieu de la taille, les contraintes horizontales retrouvent leur valeur initiale soit 10 MPa. Les contraintes de traction vont jusqu'à la surface du modèle. Il faut envisager des risques de rupture soit par traction dans la partie inférieure des bancs et aux bords de la taille, soit par cisaillement dans la partie supérieure.

4.5. Courbe d'affaissement

L'affaissement maximal à la surface du modèle, à 170 m de la couche exploitée, est égal à 2 m, soit 40 % de l'ouverture de la couche exploitée (Fig. 4). Cette valeur est nettement plus importante que celle trouvée par la méthode des Eléments Finis (30 cm). Le rapport entre les deux modèles (Eléments Distincts / Eléments Finis) est égal à 7. L'affaissement est nul à une distance égale à 200 m du milieu de l'excavation en Eléments Distincts, alors que cette distance est de 300 m en Eléments Finis. Cette différence s'explique par la présence de la stratification dans le modèle en Eléments Distincts pour lequel on modélise plusieurs bancs qui ont la possibilité de fléchir de façon plus importante que dans le cas des Eléments finis où un seul banc est modélisé.

5. Influence des dimensions du modèle

Le modèle présenté ci-dessus a les dimensions d'un modèle continu étudié par la méthode des Eléments Finis. En modélisation, les dimensions du modèle doivent assurer des résultats indépendants des effets de bords. Pour valider nos calculs à partir de l'affaissement à la surface, nous avons été obligés de construire deux autres modèles numériques avec des limites jusqu'à la surface appelés modèle B et modèle C. Ceux-ci permettent d'étudier l'influence de la hauteur et de la largeur du modèle initial (fig. 2), appelé désormais modèle A.

Les dimensions du modèle B sont égales à 350 x 1000 m, 700 m correspondant aux terrains sus-jacents. Cette partie (350 x 700 m) est supposée homogène, isotrope et sans stratification. Les dimensions du modèle C sont égales à 1000 x 1000 m. Pour les autres données, les deux modèles B et C sont identiques au modèle A.

La comparaison entre les modèles nous permet de constater que les contraintes et les déplacements sont plus importants dans le modèle A (Tableau 2). Les contraintes sont pratiquement multipliées par 2.

L'affaissement au milieu de la taille, à 150 m au-dessus de la couche exploitée (Fig. 4), est 2 et 4 fois l'affaissement maximal des modèles B et C respectivement.

L'affaissement maximal à la surface des modèles B et C est égal à 29 et 14 cm respectivement. L'affaissement est nul à une distance égale à 125 m du bord de la taille pour

Modèle	σ max compression (MPa)	σ max traction (MPa)	Amax (m)
A	172	48	2
B	105	19	1
C	95	29	0,5

Tableau 2 : Contraintes maximales et affaissement maximal à 150 m au toit de la couche

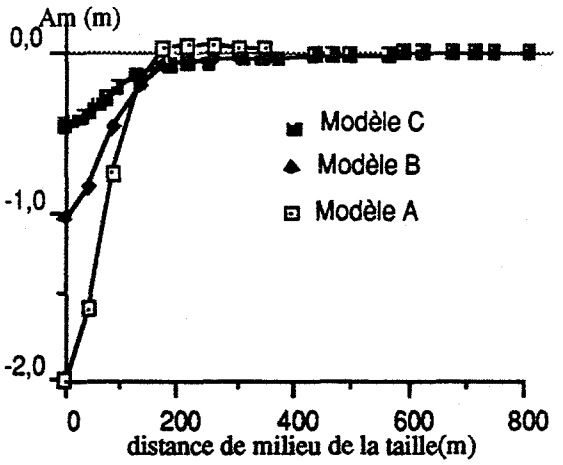


Fig. 4 : Courbes d'affaissement à une distance verticale de la couche de 150 m

le modèle initial, alors qu'il est à une distance de 625 m du bord de la taille pour le modèle C. En revanche, l'affaissement est pratiquement constant sur toute la limite supérieure dans le cas du modèle B.

En analysant les valeurs d'affaissement en fonction du rapport (largeur / profondeur)[1], celui-ci s'avere différent dans les modèles A, B et C. Pour le modèle A, il est égal à 1 contre seulement 0,18 pour le modèle B. On dépasse donc la largeur critique égale 0,4 H, pour le premier modèle, ce qui n'est pas le cas pour le modèle B.

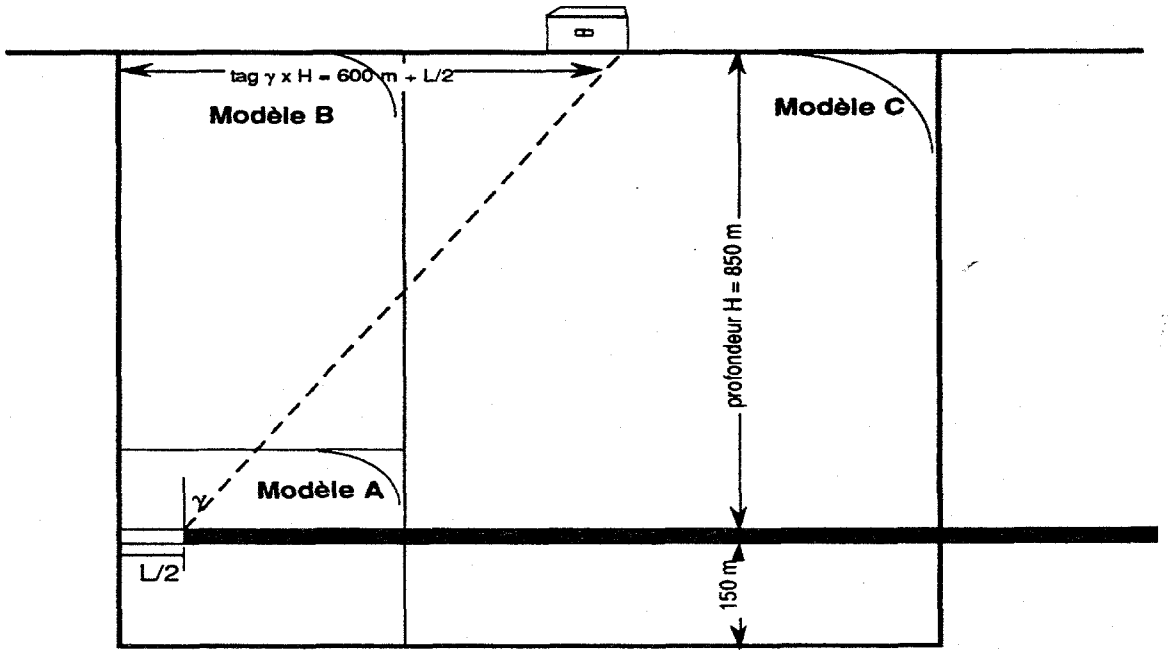


Fig 5 : Limites de 3 modèles en éléments distincts et affaissement induit par l'exploitation d'une taille de 150 m

La figure 5 permet d'expliquer la différence concernant l'affaissement entre ces trois modèles. Si on choisit un angle d'influence "γ" égal à 45°, le modèle A devrait avoir un déplacement induit par l'exploitation nul au-delà d'une distance égale à 225 m. La valeur fournie par le calcul est égale à 200 m. En revanche, l'affaissement maximal à la surface du modèle est supérieur à la valeur qui pourrait être réellement mesurable à la surface du sol.

Nous ne constatons pas un déplacement nul dans le cas du modèle B (Fig. 6), cela correspond aussi aux mesures d'affaissement. La valeur de l'affaissement maximal y est surestimée parce que la largeur du modèle est inférieure à la largeur de la zone d'influence, lors de laquelle les terrains ne s'affaissent plus.

En conséquence, le modèle C permet une estimation de l'affaissement à la surface. L'affaissement maximal est égal à 15 cm soit 3% de l'ouverture de la couche exploitée. Cette valeur est tout à fait représentative d'une taille isolée à 850 m de profondeur.

6. Influence de la largeur du panneau.

On a fait varier la largeur exploitée dans le modèle de 100 m à 500 m. Le modèle employé correspond au modèle B (350x1000 m). La hauteur de la zone foudroyée varie en fonction de la largeur du panneau.

En ce qui concerne les contraintes maximales, la contrainte de traction maximale varie entre 6 MPa et 23 MPa, la première valeur correspond à une taille de 100 m de largeur, les autres valeurs de la contrainte de traction ne dépendent pas de la largeur exploitée. Ces contraintes vont peut-être provoquer une rupture plus ou moins violente dans le cas d'une roche intacte, qui ne résiste pas à des tractions aussi élevées, ou destabiliter des discontinuités existantes.

En ce qui concerne les contraintes principales maximales de compression obtenues dans

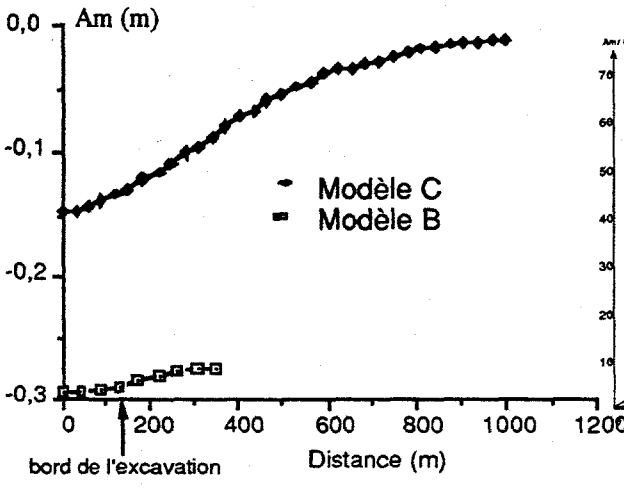


Fig. 6 : Courbes d'affaissements à la surface pour une taille de 150 m

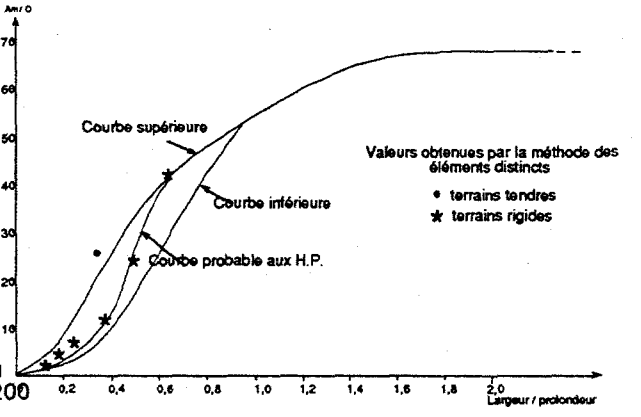


Fig. 7 : Affaissement pour différents rapports largeur/profondeur

les calculs, elles augmentent linéairement en fonction de la largeur du panneau, et varient entre 80 et 175 MPa. Leurs valeurs sont plus importantes que celles obtenues avec les modèles continus, notamment pour des tailles de petites largeurs.

Les résultats de la modélisation montrent que l'affaissement maximal (Am) à la surface du modèle varie en fonction de la largeur exploitée. Pour une taille de 100 m, l'affaissement maximal à la surface est égal à 10 cm, pour une largeur de 500 m, il est égal à 2,17 m soit 43 % de l'ouverture de la couche exploitée.

La coupe modélisée représente le cas d'une taille des Houillères de Provence (10). Nous avons présenté sur la courbe empirique, les rapports (affaissement maximal / ouverture) obtenus par la modélisation en milieu discontinu (Eléments Distincts) (Fig. 7). Nous constatons une bonne concordance entre les courbes de mesures et les valeurs de la modélisation.

7. Etude paramètrique

Des études de sensibilité sont réalisées sur les paramètres qui déterminent la forme prise par le foudroyage, tels que la taille des blocs dans la zone du foudroyage ou la distance entre les joints horizontaux dits de stratification. Suivent des études qui concernent les caractéristiques des joints comme l'angle de frottement, la raideur tangentielle et la raideur normale et enfin, l'influence du tenseur des contraintes initiales avec la présence d'un banc de caractéristiques différentes du reste du massif.

La densité de stratification influence les résultats. Deux familles sont mises en évidence : les modèles à bancs minces et les modèles à bancs d'une épaisseur importante. L'affaissement maximal est égal à 2,75 et 0,5 m pour des bancs de 5 et 150 m respectivement.

La taille des blocs dans la zone foudroyée semble avoir un effet qui se limite à cette zone et qui pratiquement disparaît à l'échelle du massif.

L'angle de frottement ainsi que le tenseur initial des contraintes modifient le mode de foudroyage et surtout la contrainte horizontale. Trois modes de foudroyage ont été observés selon la valeur du rapport des contraintes initiales (K). L'influence de l'angle de frottement se manifeste dans la zone entourant la région foudroyée où les contraintes dépassent le critère de rupture et dépendent donc de la valeur choisie pour l'angle de frottement.

Les raideurs normale et tangentielle sont aussi des paramètres qui modifient le comportement du massif après l'excavation. Des raideurs normale et tangentielle très élevées empêchent la formation du foudroyage localement et la continuité des bancs est assurée. L'affaissement à la surface du modèle diminue jusque quasiment zéro dans les cas où ces valeurs sont très élevées. La raideur tangentielle a un rôle moins important que la raideur normale.

Dans notre cas, il apparaît que certains paramètres tels que la raideur tangentielle et la taille des blocs dans la zone de foudroyage ne nécessitent pas d'être estimés avec une grande précision. En revanche, le tenseur initial de contraintes, la densité de stratification et la raideur normale nécessitent une investigation plus importante pour pouvoir obtenir des résultats

8. Conclusion

La méthode des Elément Distincts employée semble particulièrement adaptée à ce problème de modélisation. Nous avons pu montrer l'efficacité de cette méthode de modélisation surtout en ce qui concerne l'affaissement à la surface de l'exploitation. Les modèles permettent d'estimer la courbe d'affaissement. Ce qui était impossible dans le cas des modèles en milieu continu malgré les hypothèses sur les caractéristiques mécaniques des terrains. De plus, nous avons décrit les mouvements des blocs et de bancs de stratification qualitativement. La distribution des contraintes dans le massif, peut correspondre à celle engendrée après l'exploitation dans un milieu stratifié.

Il faut signaler que les résultats de ces modèles sont très différents des résultats obtenus à partir d'un modèle en milieu continu, principalement pour les trois points suivants :

1- les valeurs des contraintes maximales aux bords et au milieu de la taille; 2- la distribution des contraintes après l'exploitation; 3- l'affaissement à la surface.

Les dimensions du modèle sont très importantes pour la qualité des résultats. Elles jouent un rôle essentiel sur le comportement du foudroyage, les contraintes et l'affaissement à la surface.

---

[1]Largeur : la largeur du front de la taille.

Profondeur : la profondeur à laquelle se trouve la taille.

[2] Cette courbe résulte de nombreuses études statistiques effectuées entre 1977 et 1980 à partir des données issues de mesures le long du canal de Provence.

Bibliographie :

1. **LABASSE H. 1973** : Les pressions de terrains dans les carrières souterraines. Coups de toit et coups de charge. Rev. Industrie Minérale, 3 : 141-160.

2- **LINGLI Z. 1990** : Contribution à l'étude du foudroyage en travaux miniers par modélisation physique en matériaux équivalents INPL-NANCY.

3. **WOLD M.B. 1985** : A blocky physical model of longwall caving under strong roof conditions 26Th US Symposium on Rock Mechanics / Rapid City p.p. 1007-1015.

4. **PENG S.S. & CHANG H.S. 1984** : Longwall Mining New York Wiley.

5. **CHOI S.K. & COULTHARD M.A. 1990** : Modeling of jointed rock masses using the distinct element method. CSIRO Division of Geomechanics, Melbourne AUSTRALIA p.p. 471-477.

6. **CHAMBON C. 1985** : A la recherche d'un critère pour le calcul de la force portante du soutènement dans une taille, Rapport interne, Laboratoire de Mécanique des Terrains, France.

7. **BEN SLIMANE K. 1990** : Sismicité induite et exploitation. Etude CECA n°7220-AF/308. Rapport Final 45p.

8. **REVALOR R. 1991** : La maîtrise des coups de terrains dans les exploitations minières. Thèse INPL 135 p.

9. **KNOL P. & KUHNT W. 1988** : Seismological and geotechnical investigations of the mechanics of Rockbursts. Proc. 2nd Int Symp. "Rockbursts and sismicity in mines", Minneapolis.

10. **ARCAMONE J. 1980** : Méthodologie d'étude des affaissements miniers en exploitation totale et partielle. Thèse INPL. 100 p.