



Modélisation des cavités de stockage et prise en compte des discontinuités des massifs rocheux

Hafid Baroudi, Jack-Pierre Piguet, I. Arif, Jean-Pierre Josien, P. Lebon

► To cite this version:

Hafid Baroudi, Jack-Pierre Piguet, I. Arif, Jean-Pierre Josien, P. Lebon. Modélisation des cavités de stockage et prise en compte des discontinuités des massifs rocheux. 7. International Congress on Rock Mechanics (ICRM 1991), Sep 1991, Aix-la-Chapelle, Allemagne. pp.675-678. ineris-00971827

HAL Id: ineris-00971827

<https://ineris.hal.science/ineris-00971827>

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 des cavités de stockage et prise en compte des discontinuités des massifs rocheux

Modelling of underground cavity storage and consideration of rock mass discontinuities

Herstellung von Modellen über Einlagerung Höhlungen und Berücksichtigung von Unterbrechung der Bergmassiven

H. BAROUDI, Laboratoire de Mécanique des Terrains, INERIS, Ecole des Mines de Nancy, France

J.P. PIGUET, Laboratoire de Mécanique des Terrains, INERIS, Ecole des Mines de Nancy, France

I. ARIF, Laboratoire de Mécanique des Terrains, Ecole des Mines de Nancy, France

J.P. JOSIEN, Groupe Géotechnique et Atmosphères Industrielles, INERIS, Verneuil-en-Halatte, France.

P. LEBON, Division Etude des Sites, ANDRA, France.

RESUME : L'article cherche à établir les bases d'une méthodologie de modélisation, en vue du dimensionnement et de la prévision du comportement de cavités de stockage, dans le cas de massifs rocheux traversés de discontinuités. On utilise et compare plusieurs méthodes de calculs (éléments finis, modèles de blocs) et on confronte leurs résultats avec des données réelles.

ABSTRACT : The aim of this paper is to establish the basis of a modeling methodology, in view of the design and the prediction's behaviour of underground storage cavities, in jointed rock masses. Several methods for calculation (finite elements, discontinuum modeling ...) are used and compared, and their results are compared with actual data.

ZUSAMMENFASSUNG : Dieser Artikel stellt die Basis einer Anfertigungsmethodologie auf, angesichts der Verhaltensvorhersage von Höhlungeneinlagerungen betreffend Bergmassiven mit Unterbrechungen.

Verschiedene Rechnungs Methoden sind verglichen (FEM, DEM, Blockmodellen), und die Resultaten sind mit realen Angaben konfrontieren.

I - INTRODUCTION

Le dimensionnement des cavités de stockage et la prévision de leur comportement peuvent s'appuyer sur des modèles numériques, à condition que les données à introduire soient soigneusement calées. Cet étalonnage est effectué au moyen de la comparaison entre le comportement réel d'une cavité de référence instrumentée, et la réponse des modèles appliqués à cette même cavité.

L'avantage bien connu de la modélisation numérique est qu'elle permet des études paramétriques poussées, non seulement pour évaluer différentes géométries de cavités, mais aussi pour juger de l'importance relative des propriétés de la roche elle-même, notamment leurs classiques caractères hétérogène, anisotrope, discontinu. Des méthodes nouvelles de modélisation ont récemment permis de franchir un pas important pour la prise en compte des discontinuités des massifs rocheux. Il s'agit d'outils élaborés de représentation géométrique tridimensionnelle des massifs et des cavités, associée à l'analyse de la stabilité de blocs isolés (logiciel RESOBLOK et commande Block-Stability Analysis BSA). Il s'agit également de la méthode des éléments distincts (logiciel UDEC) qui permet d'étudier un assemblage de blocs. Ces modèles ont été mis en oeuvre, aux côtés de calculs par éléments finis, dans le cadre d'une étude comparative de méthodes, et validés sur un cas de cavités étudiées dans un autre contexte industriel.

II - APPROCHE METHODOLOGIQUE ET ETUDE PARAMETRIQUE

L'exemple étudié, situé à 500 m de profondeur, est constitué d'un ensemble de cavités creusées dans des terrains fortement anisotropes et traversés de discontinuités naturelles très inclinées sur l'horizontale. Les cavités ont une forme grossièrement parallélépipédique, de 45 à 35 m de côtés avec une hauteur variable de 4 à 40 m. L'anisotropie, de type isotrope transverse, correspond à des plans de schistosité sub-verticaux, parallèles aux parois des cavités. Une étude structurale précise a été conduite sur le site, accompagnée de mesures de déformations et de contraintes.

Les calculs numériques ont été effectués par les trois familles de méthodes citées dans l'introduction (éléments finis, RESOBLOK + BSA, éléments distincts).

1) Calculs par éléments finis

Les calculs ont été effectués en deux dimensions pour une cavité de 4 m de hauteur et 35 m de large, dans un plan de coupe vertical perpendiculaire aux directions des plus grandes discontinuités naturelles. Le code utilisé (ELFI3F) (DEJEAN, 1977) permet de tenir compte, sous l'hypothèse élastique, de l'anisotropie des terrains et, dans une certaine mesure, des discontinuités, en introduisant des éléments joints. La raideur de ces joints peut varier au cours du calcul en fonction du déplacement, (GOODMAN, 1976).

Deux joints correspondant à deux structures importantes ont été introduits dans un maillage serré d'éléments triangulaires (800 éléments, 1764 noeuds).

L'influence de l'anisotropie est testée en comparant les résultats en contraintes et en déplacement au toit et en paroi, dans le cas d'une anisotropie mécanique caractérisée par un rapport de 2,75 entre les modules élastiques respectivement parallèles et perpendiculaires aux plans de schistosité. Dans le cas isotrope, le matériau a un module intermédiaire (68000 MPa environ).

La déflexion du toit, ainsi que les contraintes de traction horizontales sont plus faibles dans le cas anisotrope (1,3 cm), tandis qu'en parois les contraintes de compression verticales qui y règnent sont au contraire plus fortes.

L'influence des discontinuités est visible sur la figure 1, en termes de déplacements qui atteint au centre 2 cm. En même temps, ce compartimentage du toit y réduit les contraintes de flexion (raideurs 10.000 MPa/m et 1000 MPa/m).

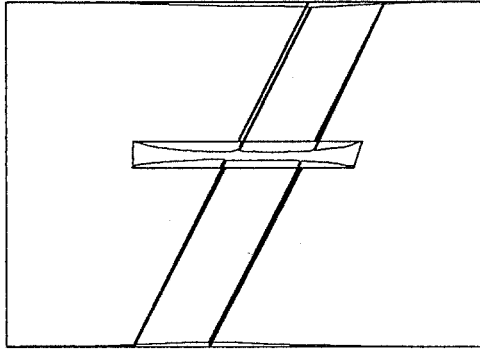


Fig. 1 : Déformée de la cavité en éléments finis (2 joints, anisotropie)

2) Calculs avec RESOBLOK et BSA

Les hypothèses simplificatrices nécessaires pour la mise en oeuvre du calcul précédent par éléments finis sont restrictives. En particulier, elles réduisent la prise en compte des discontinuités à l'introduction de deux joints, non sécants, dans une modélisation bidimensionnelle en déformation plane. La réalité beaucoup plus complexe a pu être appréhendée grâce à la collecte des données structurales, au traitement statistique de leurs caractéristiques essentielles et à leur introduction dans le logiciel de modélisation géométrique RESOBLOK (reconstitution et visualisation du massif fracturé) (HELIOT, 1988).

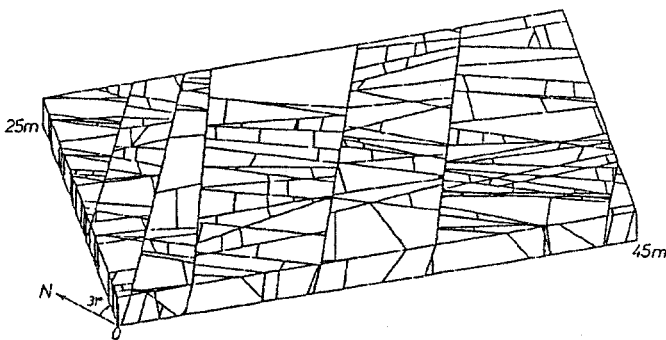


Fig. 2 : Résultat d'une simulation par RESOBLOK

Outre ses potentialités graphiques intéressantes, illustrées par la figure 2, RESOBLOK offre deux particularités essentielles qui permettent de pallier la connaissance presque toujours incomplète et incertaine du réseau de fractures.

D'abord, le progiciel permet que la reconstitution de l'assemblage rocheux fracturé soit guidée, de façon conviviale, par la prise en compte d'un scénario géologique plausible.

D'autre part, les paramètres géométriques de la fracturation (espacement, orientation...) peuvent être considérés comme des variables aléatoires dont les caractéristiques statistiques sont attachées à chaque famille de fractures. Ceci permet de proposer plusieurs états possibles du massif rocheux fracturé, obtenus par tirage au sort des espacements et orientations des fractures individuelles au sein d'une distribution statistique, elle-même établie à l'issue de l'analyse structurale. Chacun de ces états possibles est appelé "simulation". Toutes les simulations peuvent être visualisées en perspective ou selon des coupes, mais, surtout, il est possible de repérer les blocs individualisés par les fractures et d'étudier, comme un résultat, leurs caractéristiques géométriques (distribution des volumes des blocs pour une simulation, ou distribution des volumes moyens ou maximaux pour plusieurs simulations etc...).

On peut concentrer l'analyse sur ceux des blocs qui paraissent instables, grâce à la commande Block Stability Analysis (BSA) qui inventorie systématiquement les possibilités de chute libre, et de glissement sur une ou plusieurs faces, des blocs proches de l'excavation. Les algorithmes fondamentaux sont ceux de (WARBURTON, 1982) et de (LIN et al, 1988). Le calcul de stabilité peut être répété, après élimination des blocs susceptibles de tomber (calcul itératif).

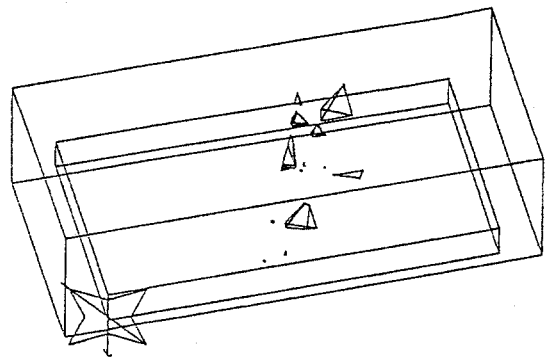


Fig. 3 : Blocs instables avec RESOBLOK et BSA (zone délimitée entre deux grandes failles)

Les figures 3 et 4 illustrent visuellement les résultats pour un calcul, et, sous forme d'histogrammes, pour plusieurs simulations (blocs de volume supérieur à 0,01 m³).

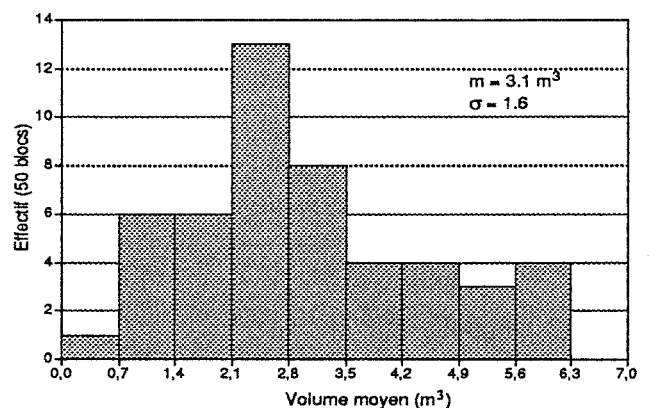


Fig. 4 : Distribution des volumes moyens de blocs instables

La sensibilité de plusieurs points propres à cette méthode a été examinée :

- Les erreurs relatives ou imprécisions des mesures et relevés expérimentaux induisent une incertitude de même

amplitude sur les histogrammes de résultats, ce qui témoigne d'une certaine "robustesse" de la méthode. On démontre (BAROUDI et al, 1990) en outre que le nombre de simulations utiles pour balayer la quasi totalité des situations réelles est inférieur à 50 (sous les hypothèses de départ et avec une précision et une qualité de mesures données).

- La stabilité d'un bloc mécaniquement garantie s'il est monolithique, peut être parfois brusquement remise en cause si un des fragments est enlevé à l'issue d'une itération.

- L'effet confinant des composantes contraintes parallèles à la paroi de l'excavation est souvent déterminant pour la stabilité des blocs isolés. Un confinement de l'ordre de 100 bars conduit à une stabilité de tous les blocs.

3) Calculs avec la méthode des éléments distincts

La méthode des éléments distincts est développée depuis quelques années pour étudier le comportement de massifs fracturés assez fortement pour être considérés comme un assemblage de blocs, sans pour autant être déconsolidés au point qu'ils soient assimilables à un milieu continu équivalent (CUNDALL, 1987).

Le code UDEC (Universal Distinct Element Code) présente, par rapport aux éléments finis, des avantages a priori intéressants dans le cas des grandes cavités étudiées ici. En particulier, il permet de prendre en compte des discontinuités qui se recoupent entre elles, et de traiter des déplacements relatifs des contacts de grande amplitude (sans rester astreint aux conditions de connectivité des noeuds). Les blocs et les contacts sont déformables.

Enfin, la méthode de résolution numérique utilisée permet de suivre le mouvement des blocs au-delà de leur désolidarisation du massif environnant. Elle reflète ainsi un processus de passage d'un état à un autre, sans être assujettie à chaque instant au respect des conditions d'équilibre statique (méthode dite parfois "dynamique").

Les calculs ont été effectués en deux dimensions, avec la même géométrie, dans la même coupe verticale et les mêmes conditions aux limites que le calcul aux éléments finis ; mais a été introduit un réseau de failles et de joints issus d'une coupe effectuée avec le logiciel RESOBLOK, décrit au paragraphe précédent (10 discontinuités découpent ainsi le massif).

L'étude paramétrique a porté essentiellement sur l'influence des valeurs de raideurs normales et tangentielles, K_n et K_t . Un exemple de résultat est présenté figure 5.

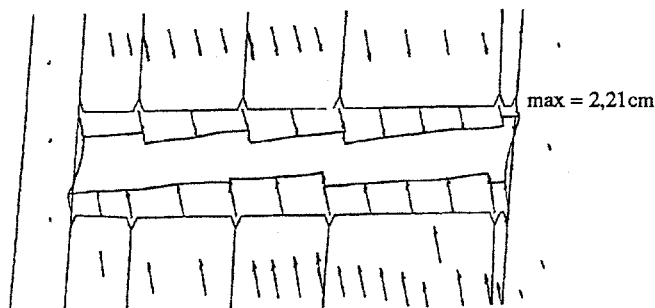


Fig. 5 : Déplacements autour de la cavité (UDEEC)

On constate que plus la raideur tangentielle augmente dans la gamme 100 MPa/m à 10.000 MPa/m, plus le massif se "soude" et plus le comportement est gouverné par les propriétés de déformabilité de la matrice rocheuse (au-delà de 10.000 MPa/m, on ne note plus d'influence très nette de K_t).

Dans le cas de figure étudié, l'influence de la raideur normale K_n , dans la gamme 1000 à 30 000 MPa/m est moins sensible : son augmentation réduit les déplacements tangentiels relatifs, mais ne change guère le déplacement maximal. Elle limite les phénomènes de basculement de blocs, mais ne soude pas l'assemblage aussi fortement que le fait l'augmentation de K_t . Le comportement reste gouverné par les discontinuités plus que par les propriétés de la matrice.

L'angle de frottement limite des joints est également susceptible de jouer un rôle dans le déplacement des blocs (lorsque le frottement est intégralement mobilisé).

La sensibilité à ce paramètre (étudié dans la gamme 10° à 30°) n'est plus perceptible au-delà de 25°, domaine où se situent probablement les valeurs les plus courantes.

Selon les valeurs des paramètres de raideurs (tangentielles et normales), de l'angle de frottement limite et surtout du nombre de discontinuités introduites dans le modèle, les valeurs de déplacements du toit varient de 0,8 à 2,9 cm (à rapprocher de l'ordre de grandeur des déplacements obtenus par les modèles aux éléments finis, soit environ 1 à 1,3 cm).

Des calculs avec des lois de comportement non linéaires seront effectués pour préciser les études de sensibilité des paramètres précédents.

III COMPARAISON DES METHODES ET ESSAI DE CONFRONTATION AVEC DES MESURES IN SITU

Des mesures sont réalisées au moyen d'extensomètres de précision, à différents niveaux à l'intérieur d'un massif, au toit et aux parements d'une cavité. Pour l'instant, nous avons limité l'analyse aux résultats d'un seul extensomètre au toit, obtenus pendant une phase de travaux au cours de laquelle la hauteur de la cavité ouverte est passée de 5 m à 10 m environ. Les mesures sont donc à comparer aux différences entre les résultats des modèles, calculés pour une cavité de 5 m de hauteur et des modèles représentant une cavité de 10 m.

On trouve une similitude d'évolution de l'expansion vers l'intérieur du massif mesurée, et calculée (avec les éléments finis et les éléments distincts), mais avec une grande différence d'amplitude (rapport de 1 à 10 environ).

En même temps, les déplacements globaux calculés au toit sont beaucoup plus importants que les valeurs des expansions : de l'ordre de 1 à 2 cm, selon les modalités des facteurs évoqués précédemment. C'est donc la plus grande partie du massif qui est concernée dans les calculs par un mouvement d'ensemble, mais ce point ne peut malheureusement pas être vérifié expérimentalement, faute de mesures des déplacements absolus. D'autre part, la méconnaissance des états de contraintes originels limite encore la portée du calage.

IV CONCLUSION

Toutefois, cette première comparaison des méthodes avec des mesures incite à approfondir plusieurs questions. L'introduction d'un réseau de discontinuités aussi complet que celui permis par les éléments distincts, n'a d'intérêt que si la fissuration de celui-ci n'est pas trop intense. La poursuite de la comparaison montrera s'il convient de prendre en compte, et jusqu'à quel point, des propriétés de déformabilités équivalentes pour le massif et/ou pour les blocs. D'autre part, on se persuade aisément, à l'examen de ce cas, de la nécessité d'introduire le comportement anisotrope dans la méthode des éléments distincts

(développement achevé en 1991). Enfin, reste fondamental le problème des valeurs à attribuer aux raideurs des joints et de leurs variations possibles le long d'une même discontinuité et aussi en fonction du processus de déformation.

La tridimensionnalité de la structure est, pour terminer, un élément essentiel pour l'analyse de stabilité.

REFERENCES

Dejean, M. 1977. Utilisation du programme ELFI3F, Laboratoire de Mécanique des Terrains - Ecole des Mines de Nancy, CERCHAR, Mai 1977.

Goodmann, R.E. 1976. Methods of geological engineering in discontinuous rocks, West Publishing Company.

Cundall, P.A., Hart, R.D. 1987. Numerical modeling of discontinua Keynote address, 1st U.S. Conference on Discrete Element Methods (DEM), USA.

Héliot, D. 1988. Conception et réalisation d'un outil intégré de modélisation des massifs rocheux fracturés en blocs. Thèse INPL, Laboratoire de Mécanique des Terrains, Ecole des Mines de Nancy.

Baroudi, H., Piguet J.P., Chambon C., Asof M. 1990. Utilization of the block generator "RESOBLOK" to complex geologic conditions in an open pit mine. International Conference on Mechanics of jointed and faulted Rock. Vienne, Austria. Balkema, pp 529- 536.

Warburton, P.M. 1981. Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces. Int. Journal Rock Mechanics, Vol 18.

Lin, D., Fairhurst, C., 1988. Static analysis of the stability of three-dimensional blocky systems around excavation in rock. Int. Journal Rock Mechanics, Vol 23 n° 3.