

Influence des conditions géostructurelles et géomécaniques sur les phénomènes de rupture dans la calotte du tunnel

The influence of the geostructural and geomechanical conditions
on the yielding phenomena at a tunnel crown

P. Lunardi

University of Parma, Italy

P. Froidi

Rocksoil Ltd, Milan, Italy

RÉSUMÉ: sur la base des expériences des auteurs, l'un des problèmes les plus graves qui se présentent au cours de l'excavation des tunnels dans les formations sédimentaires sub-horizontales est l'instabilité de la voûte qui constitue fréquemment un danger et un empêchement de l'avancement des travaux d'excavation.

On a pu observer qu'à l'intérieur de ces formations sédimentaires, les conditions géostructurelles et géomécaniques sont généralement constantes et bien définies. L'analyse des états de contrainte en champ élastique autour de la cavité a montré des réponses de déformation différentes du massif rocheux sur la voûte, selon les différents états de contrainte originaires dans le massif.

Si on compare l'analyse théorique figurant dans les bibliographies, expressément développée pour les conditions structurelles examinées avec les observations expérimentales de chantier, on constate trois différentes modalités de rupture de la voûte. Pour une d'elles, on développe une analyse préliminaire destinée à découvrir les "zones minimum de glissement" au-dessus de la cavité.

ABSTRACT: In the experience of the authors, one of the major problem areas to be faced when driving tunnels in near horizontal sedimentary formations is the instability of the roof arch. This frequently constitutes a danger and an obstacle to normal tunnel advance.

It has been observed that in such sedimentary formations the structural and mechanical conditions of the geology are generally constant and well defined; an analysis of stress states in the elastic field surrounding the cavity, at points with different original stress states, showed different deformation responses of the rock mass on the roof arch.

A theoretical analysis, based on the literature available and appropriately developed to fit the particular structural conditions under examination, was compared with experimental observations made on site: three different types of roof arch failure were identified. A preliminary analysis aimed at identifying "minimal potential slip zones" above the cavity was carried out for one of these types of failure.

1. INTRODUCTION

La définition des conditions structurelles et des états de contrainte du massif rocheux traversé qui influencent fortement les conditions de stabilité de la cavité est l'une des tâches les plus importantes qui incombent à la géologie de l'ingénieur au niveau des problèmes liés aux excavations souterraines.

Les caractéristiques structurelles du milieu géologique doivent être toujours

prises très sérieusement en considération, notamment en présence de structures pouvant influencer les mécanismes de déformation et de rupture qui peuvent se produire sur le contour de l'excavation. Les états de contrainte naturels présents dans le massif à l'intérieur duquel est réalisée l'excavation influencent fortement les phénomènes de déformation correspondant à la redistribution des contraintes après l'excavation et, par voie de

conséquence, les phénomènes éventuels de rupture.

Dans le cas de la réalisation d'un tunnel à section subcirculaire, les problèmes les plus importants au niveau de la conception et de l'exécution concernent la prévision et l'étude des phénomènes de déformation dans la calotte qui évoluent parfois vers l'effondrement de celle-ci selon des plaques constituées de bancs de couche.

L'analyse des conditions de stabilité de la calotte dans ces conditions géostructurales a été abordée, historiquement, pour les problèmes d'ingénierie minière dans les cas d'exploitation le long de la couche et repose donc sur des conditions de distribution des contraintes autour de la cavité découlant de sa géométrie, souvent rectangulaire.

La présence de différents états de contrainte originaires dans le massif, la géométrie subcirculaire d'un tunnel - autoroutier ou ferroviaire - les différentes configurations de contrainte en champ élastique ainsi que la nature du massif rocheux traversé et du réseau structurel de discontinuité nous amènent à définir différentes typologies de déformation et d'instabilité, résultant de la combinaison des différents facteurs cités.

Nous nous proposons de présenter ces principales typologies sur la base des analyses développées dans la littérature et selon une approche que nous avons mis au point. Nous présenterons également des cas réels que nous avons pu observer au cours de la réalisation d'ouvrages souterrains.

2. CARACTERISTIQUES GEOSTRUCTURELLES DES FORMATIONS SEDIMENTAIRES

Les cas pris en considération sont représentés par des massifs rocheux appartenant à des formations sédimentaires de type flyschioïde aussi bien que de type calcaire stratifié qui de par leur genèse présentent les caractéristiques principales suivantes (FROLDI, 1993) :

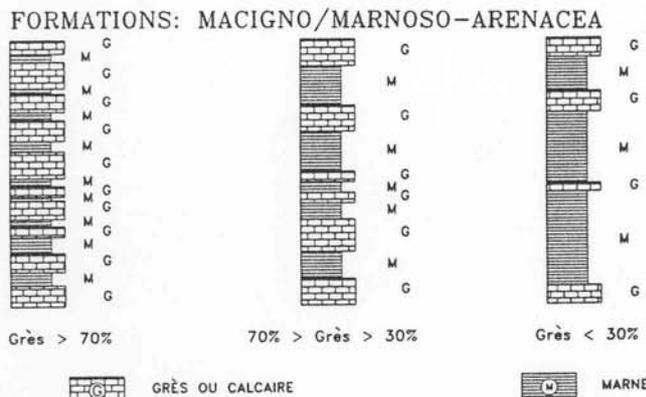


Fig. 1 - Exemples de séquences flyschioïdes.

- présence de stratification bien distincte et évidente constituant le plan d'asymétrie principale;
- alternance de couches ayant des caractéristiques lithologiques et donc géomécaniques de résistance et de déformabilité différentes (Fig. 1);
- présence de discontinuités conjuguées en général disposées perpendiculairement aux plans de stratification et réciproquement suborthogonales.

En particulier, les complexes sédimentaires qui conservent leur position initiale autrement dit subhorizontale, présentent des caractéristiques géostructurales très particulières, dépendant étroitement du champ de contraintes auquel le massif rocheux a été soumis. Il est question de champ de contraintes "andersonien" lorsque la contrainte principale la plus grande (major) σ_1 se développe orthogonalement au plan de couche et les contraintes principales moyenne (σ_2) et mineur (σ_3) sont positionnées parallèlement à lui (Fig. 2).

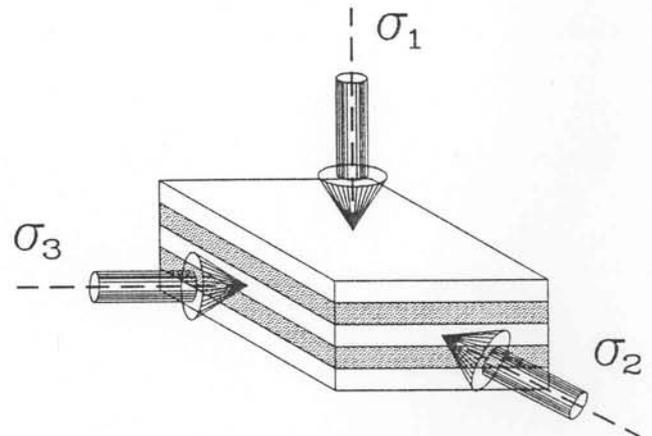
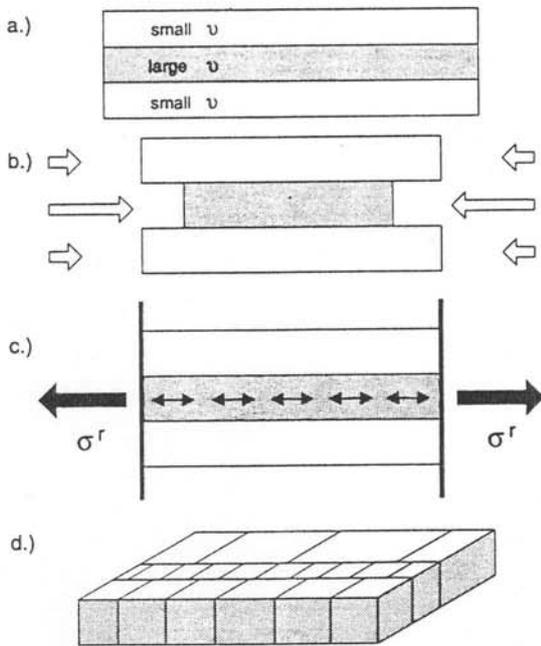


Fig. 2 - Etat des contraintes "andersonienne".

Dans ce cas, les failles et les fractures se développent en systèmes conjugués suborthogonaux au plan de couche et disposés plus ou moins symétriquement autour de l'axe de la σ_1 , en fonction de la différence entre les σ_2 et σ_3 (PEACOCK & SANDERSON, 1992).

De nombreuses études ont été menées sur la genèse mécanique des systèmes de fracture orthogonaux aux surfaces de couche. Certaines de ces études révèlent l'importance de la différence de déformabilité entre les différents niveaux lithologiques qui provoquerait l'apparition de fractures suborthogonales à la couche (Fig. 3) à la suite d'états tensionnels de traction à l'intérieur du niveau moins rigide au cours de la décharge de la contrainte principale plus grande (σ_1), due à des phénomènes d'éro-



Model for cross joint development in the Monterey Formation. (a) Beds at depth; (b) tendency for differential contraction due to variations in Poisson's ratio, ν ; (c) tensile stresses develop in middle bed since layers are welded together; and (d) cross joints propagate in response to tensile stress.

Fig. 3 - "Effet Poisson" pour érosion (d'après GROSS, 1993).

sion (GROSS, 1993). D'autres modèles montrent, sur les mêmes caractéristiques géomécaniques, la genèse de fractures de traction à l'intérieur de la couche la plus rigide et donc moins déformables transversalement, au cours de l'augmentation de la charge lithostatique verticale (σ_1) due à l'enterrement (Fig. 4) (NARR & SUPPE, 1991).

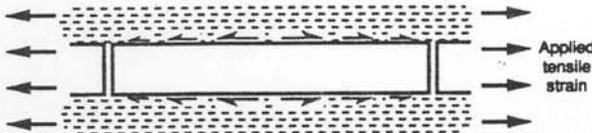


Fig. 4 - "Effet Poisson" pour enterrement (d'après NARR & SUPPE, 1991).

Dans les deux cas, le phénomène de déformation différenciée (par expansion ou par contraction) due à la variation de la charge lithostatique (σ_1) est appelé "effet Poisson" et engendre plusieurs systèmes de joints verticaux hiérarchiquement différenciés (Fig. 5) (GROSS, 1993) pour leur géométrie aussi bien que pour la phase de formation.

Pour résumer, disons simplement que nous pouvons conclure qu'à l'intérieur des massifs rocheux décrits, les systèmes de fractures subverticales, perpendiculaires aux plans de couche, dans le

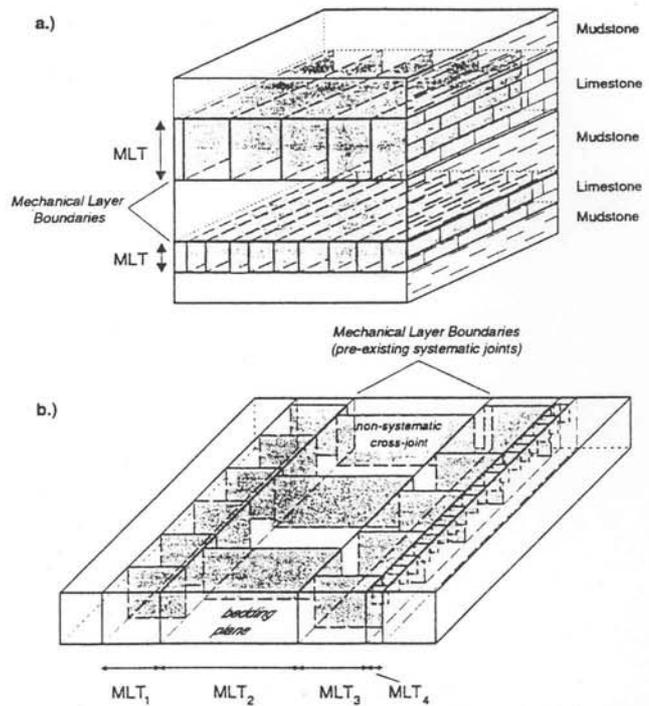


Fig. 5 - Hiérarchie des joints verticaux (d'après GROSS, 1993).

cas examiné subhorizontal, représentent des surfaces de discontinuité systématiques et persistantes. Ils peuvent être considérés comme les plans d'asymétrie les plus importants après les surfaces de couche. Ils influencent donc fortement le comportement mécanique du massif rocheux.

L'importance de ces plans de discontinuité sera expliqué ci-après lorsque nous traiterons le cas particulier d'une excavation souterraine dans un massif sédimentaire à stratification subhorizontale.

3. ETATS DE CONTRAINTE ELASTIQUE AUTOUR D'UNE CAVITE CIRCULAIRE

Les études sur la distribution des états de contrainte élastique autour d'une cavité circulaire effectuées selon différentes méthodes - analytiques, numériques et expérimentaux - ont mis en évidence les différentes configurations des efforts en fonction des états de contrainte initiaux, verticaux et horizontaux, à l'intérieur du corps dans lequel est pratiquée la cavité.

Sans entrer dans le détail de ces études, de leurs méthodes et de leurs limites, nous présentons sous une forme simplifiée, les résultats qu'elles ont fournis.

Compte tenu des différents états de contrainte initiales correspondant à des valeurs variables du rapport entre contrainte horizontale et la verticale (K), nous avons les états de contrainte tangentielle (σ_t) à la

qui s'ensuivent présentent des différences sensibles de même que les trajectoires sur lesquelles ils s'alignent.

Nous pouvons donc distinguer trois cas typiques :

- a) état de contrainte uniaxiale ($K = 0$)
- b) état de contrainte biaxiale ($0 < K < 1$)
- c) état de contrainte hydrostatique ($K = 1$)

Différentes formulations analytiques considérant une situation biaxiale sur un plan perpendiculaire à l'axe de la cavité fournissent les mêmes résultats. Sur les axes de symétrie de la cavité, verticale et horizontale, nous trouvons des distributions différentes des contraintes radiales et tangentielles :

- les efforts radiaux (σ_r) s'avèrent toujours nuls sur le bord de la cavité et variant au fur et à mesure qu'ils s'en éloignent en fonction du rapport K . Dans le cas particulier de $K = 0$, ils sont négatifs (de traction) sur le bord supérieur de la cavité (HERGET, 1988) (Fig. 6);
- les efforts tangentiels (σ_t) sont toujours les plus grands sur deux ou plusieurs points de la cavité en fonction de la valeur K (Fig. 7) (JAEGER, 1983):
 - si $K < 1$ (a, b) les points d'effort tangentiel maximum se trouvent sur le bord de la cavité à l'origine de l'axe de symétrie horizontale ($\sigma_t > 2\sigma_v$) (Fig. 7, a, b);
 - si $K = 1$ (c), tout le bord de la cavité possède $\sigma_t = 2\sigma_v$ (Fig. 7, c);
 - si $K > 1$ (cas non envisagé), la situation se retourne de 90 degrés par rapport à celle des cas a, b ($\sigma_t > 2\sigma_v$ sur l'axe de symétrie verticale).

En tout état de cause, lorsque $K < 1$, nous observons sur le bord de la cavité,

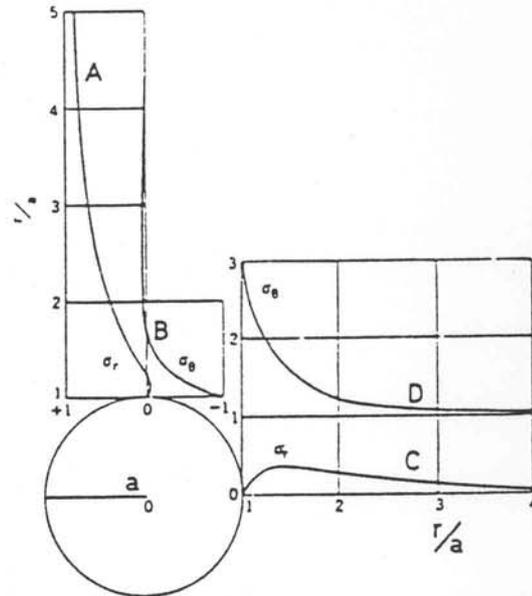
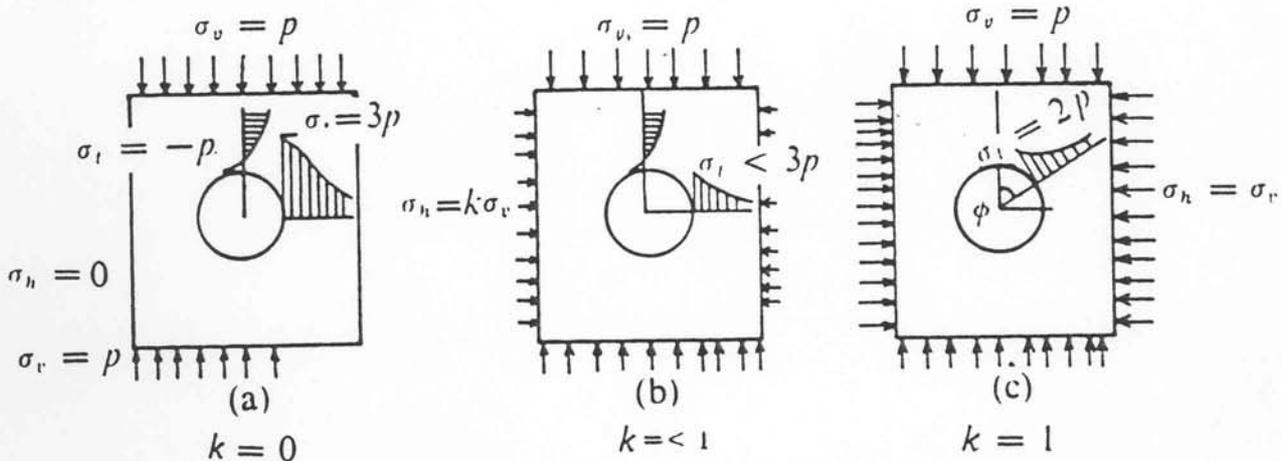


Fig. 6 - Contraintes sous charge monoaxiale (d'après HERGET, 1988).

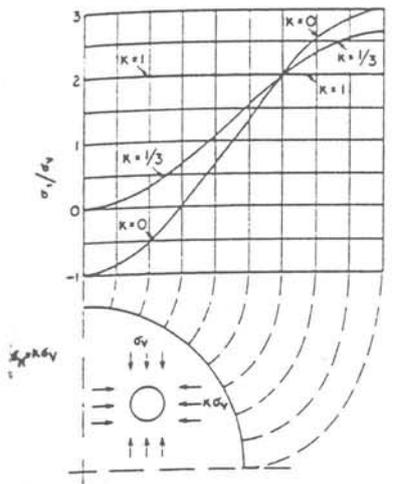
une variation considérable dans les σ_t qui passe du point supérieur au point latéral et entraîne des états de traction lorsque $K < 0.33$ (Fig. 8) (HERGET, 1988):

- les trajectoires des efforts principaux majeurs et mineurs, qui correspondent sur le contour de la cavité aux efforts tangentiels et radiaux, décrivent un réseau déformé à proximité de la cavité selon des géométries symétriques par rapport aux axes de symétrie ($K < 1$, $K > 1$) ou selon une géométrie circulaire symétrique, dans le cas de contrainte hydrostatique (K



(a) $\sigma_v = p$, $\sigma_h = 0$, $k = 0$; for $\phi = 0$, $\sigma_t = -p$; and for $\phi = 90^\circ$, $\sigma_t = 3p$. (b) $\sigma_v = p$, $\sigma_h = k\sigma_v$, $k < 1$; for $\phi = 0$, $\sigma_t > -p$; and for $\phi = 90^\circ$, $\sigma_t < 3p$. (c) $\sigma_v = p$, $\sigma_h = k\sigma_v$, $k = 1$; for any value of ϕ , $\sigma_t = 2p$.

Fig. 7 - Contraintes pour différents confinements (d'après JAEGER, 1983).



Tangential stresses for $k = 0$,
 $k = 0.33$, and $k = 1$

Fig. 8 - Contraintes tangentielles pour différentes (d'après HERGET, 1988).

= 1). Il est important de préciser que dans le cas de $K < 1$ (Fig. 7 a, b), la déviation des lignes de force donne lieu à une zone de traction dans les secteurs périmétraux supérieurs et inférieurs de la cavité (Fig. 9) (JUMIKIS, 1983).

Les considérations que nous venons d'exprimer sont fondamentales dans l'analyse qui suit.

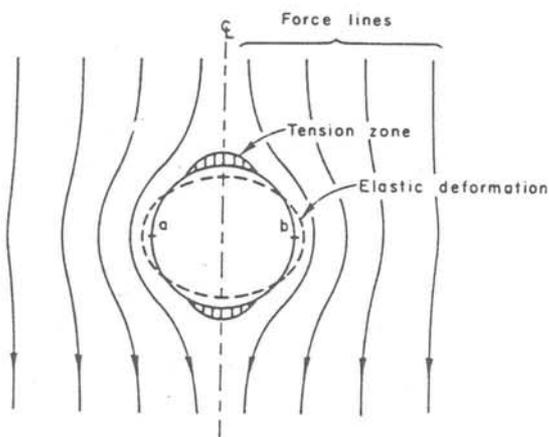


Fig. 9 - Déviation des lignes de force autour une cavité circulaire (d'après JUMIKIS, 1983).

4. EXCAVATION D'UN TUNNEL DANS DES ROCHES STRATIFIEES SUBHORIZONTALES

L'excavation d'une cavité souterraine dans des roches stratifiées subhorizontales de type flyschioïde ou calcaire comporte des réponses du massif rocheux tout à fait particulières qui dépendent de trois facteurs fondamentaux:

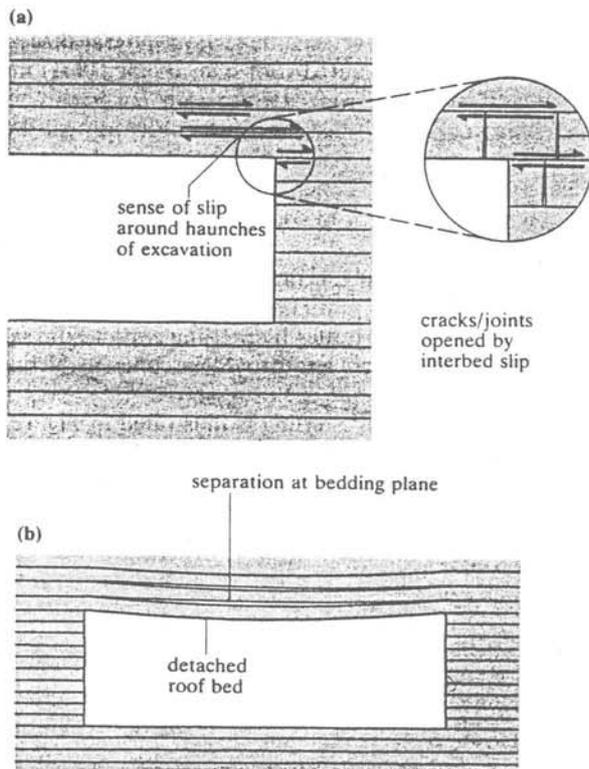
- présence de plans de discontinuité

subhorizontaux de faible résistance au cisaillement et de résistance à traction nulle;

- présence de plans de discontinuité subverticaux correspondant aux systèmes de fractures conjuguées, précédemment illustrées, dont les caractéristiques de résistance au cisaillement et à la traction dépendent des ponts de roche intacte disponible;
- état de contrainte initiale du massif.

Le réponse contrainte-déformation, du massif rocheux à l'excavation peut mener à la rupture selon le moyen considéré comme anisotrope ou au glissement le long des plans de discontinuité principaux qui, comme nous l'avons observé, sont extrêmement pénétrants.

Dans les problèmes d'ingénierie minière où l'excavation se fait le long du banc à exploiter, et donc rectangulaire, la distribution des états de contrainte suffit à provoquer le glissement potentiel inter-couche dans les zones correspondant aux arêtes de la cavité où se concentrent les efforts les plus grands de cisaillement (Fig. 10a). Ce phénomène s'explique particulièrement lorsque l'épaisseur des couches est réduite par rapport à la largeur de la cavité et lorsque les couches ne sont pas intéres-



The effects of slip and separation on excavation peripheral rock.

Fig. 10 - Contraintes aux arêtes d'une cavité rectangulaire (d'après BRADY & BROWN, 1985).

sées par des fractures verticales fréquentes. Dans ce cas, les plaques rocheuses tendent à se plier sous l'action de leur poids (BRADY & BROWN, 1985) (Fig. 10b) et éventuellement à se casser par fléchissement.

Il est très difficile que ce cas se produise dans les formations flyschioïdes ou calcaires car comme de nombreuses études l'ont souligné, l'espacement des fractures subverticales est proportionnel selon un facteur de plus ou moins 1.3 à l'épaisseur de la couche (NARR & SUPPE, 1991; GROSS, 1993).

Les études menées par Sterling (STERLING, 1980) sur le comportement proche de la rupture des couches rocheuses sous contrainte longitudinale, revêtent une très grande importance. Elles mènent à la formulation des principes suivants exprimés plus tard par Brady & Brown (B. & B., 1985) (Fig. 11):

a. les couches horizontales dans la calotte ne peuvent pas être simulées selon des plaques continues et élastiques car leur comportement est régi par les blocs isolés par les fractures verticales, naturelles ou induites (Fig. 11a);

b. le comportement des couches dans la calotte est déterminé par le contraste latéral provoqué par fléchissement sous le poids du banc en fonction du

confinement latéral dû aux états de contraintes originaires dans le massif (Fig. 11b);

c. les couches dans la calotte se déforment élastiquement (c'est à dire que les efforts latéraux et la flèche verticale sont linéaires et réversibles) jusqu'à la limite supérieure, correspondant à la résistance de pic transversale ou à la résistance limite de cisaillement à l'appui latéral de la plaque (Fig. 11c), en fonction de l'effort normal sur la surface verticale. Nous avons de même analysé trois possibilités de rupture auxquelles nous avons ajouté nos observations :

1. pour les plaques rocheuses de grande épaisseur par rapport aux dimensions de l'excavation, la modalité de rupture la plus probable comporte la rupture par glissement sur les bords de la cavité;

2. pour les plaques rocheuses d'épaisseur réduite par rapport aux dimensions de l'excavation, la rupture la plus probable peut être due au fléchissement ou au flambage en fonction de l'état de contrainte transversale à la plaque sur les bords de la cavité;

3. pour les matériaux très fortement fracturés ou pour tectonisations ou pour les épaisseurs très basses des couches, la rupture la plus probable peut être:

3a. effondrement par gravité du matériel qui s'est détaché le long d'une surface de couche au niveau de la zone de traction de la calotte dans les cas de confinement latéral bas ($K < 1$);

3b. effondrement par gravité du matériel rocheux de basse résistance fracturé pour avoir atteint les limites de rupture dans les cas de confinement latéral élevé ($K > 1$).

En ce qui concerne le cas 1, nous développons ci-après une analyse destinée à évaluer d'une manière très simple la possibilité de rupture le long des surfaces verticales sur le bord de la cavité définissant donc préliminairement les zones de rupture potentielle au niveau de la calotte.

5. UNE APPROCHE PRELIMINAIRE D'EVALUATION DE LA STABILITE DES PLAQUES ROCHEUSES EN CALOTTE

Si nous envisageons le cas de rupture 1 cité au chapitre précédent, nous remarquons que l'état de contrainte initiale du massif influence la distribution des contraintes sur les surfaces de fracture verticales qui se développent au-dessus de la cavité sur les bords de celle-ci. La combinaison de ces contraintes crée les conditions pour des glissements potentiels le long de ces surfaces.

Grâce au recours de la méthode numérique "Boundary Elements", Bray (HOEK &

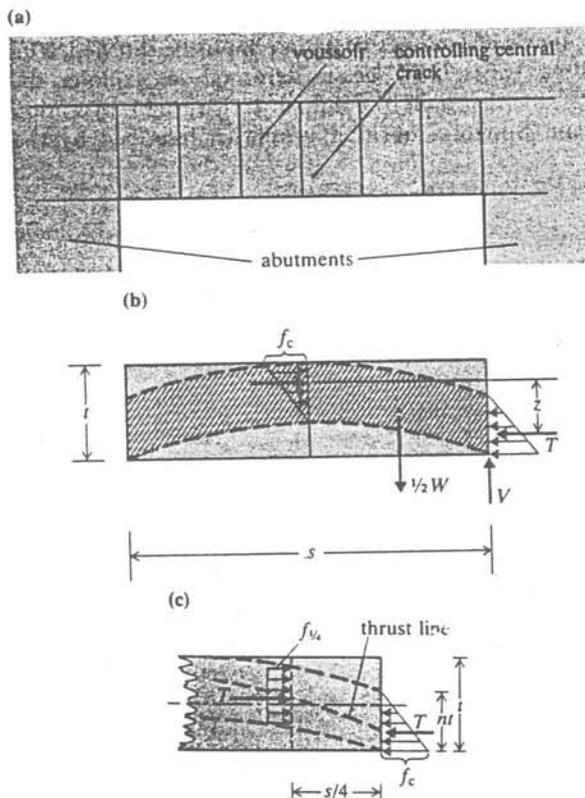


Fig. 11 - Géométrie et état des contraintes dans un banc de couche (d'après BRADY & BROWN, 1985).

BROWN, 1980) montre, dans le cas d'un tunnel à section subcirculaire, dans des conditions biaxiales, l'état des efforts principaux distribués autour de la cavité et les orientations s'y rattachant. L'analyse est faite en champ élastique et pour trois états de contrainte naturels originaires dans le massif ($K = 0.5$, $K = 1$, $K = 2$) (Fig. 12, exemple avec $K = 0.5$).

L'analyse des efforts principaux majeurs (σ_t) et mineurs (σ_r), normalisés sur la contrainte principale maximum, le long des deux lignes verticales périmétrales de la cavité et correspondant potentiellement à des surfaces de fracture (Fig. 13) a démontré:

- cas de régime de détente d'efforts $K = 0.5$. Les efforts sont altérés sur une hauteur de la calotte de $d/R=2.5$ point au-dessus duquel ils se révèlent inchangés par rapport à l'original dans le massif. Les efforts tangentiels équivalent à $2.2 \sigma_v$ au point sur le bord de la cavité placé sur le diamètre horizontal ($d/R = -1$). Les efforts tangentiels (σ_t) augmentent fortement dans la zone entre la hauteur calotte et le point diamétral;
- cas de régime d'efforts hydrostatique $K = 1$. Les efforts sont altérés autour de la cavité jusqu'à une hauteur de $d/R = 2.5$ sur la calotte.

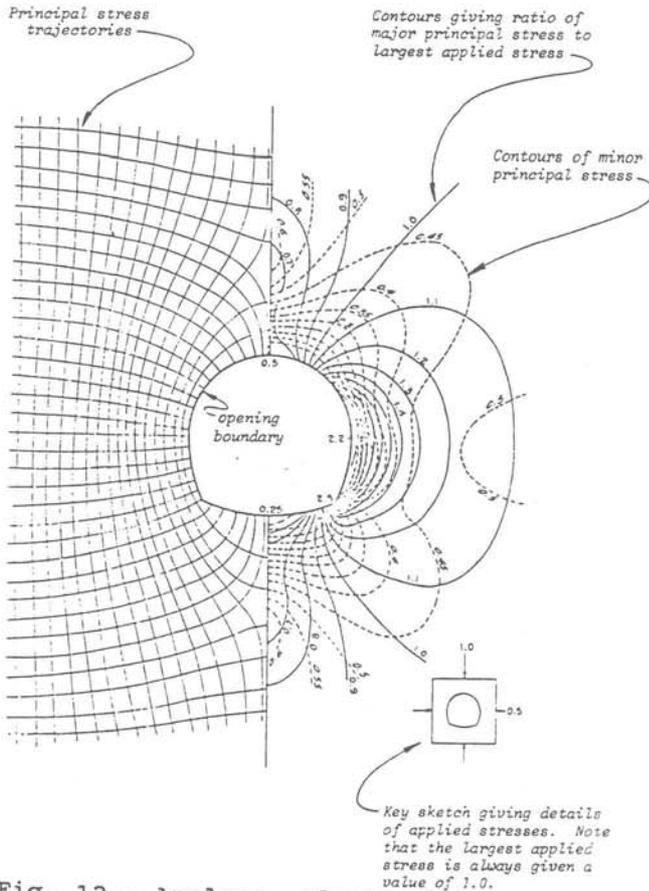


Fig. 12 - Analyse élastique aux "boundary elements" (d'après HOEK & BROWN, 1980).

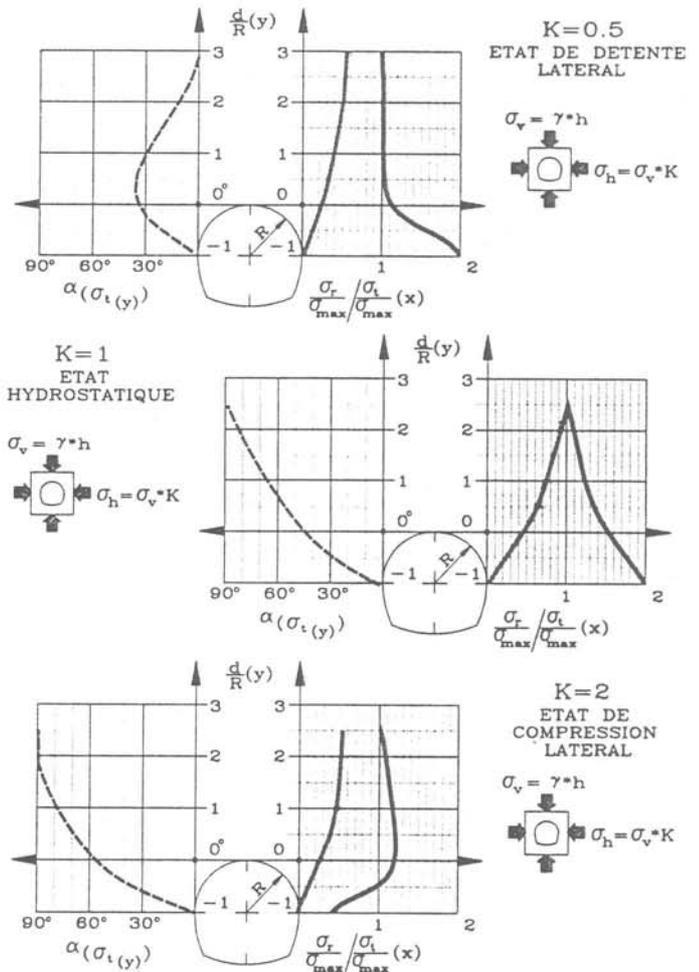
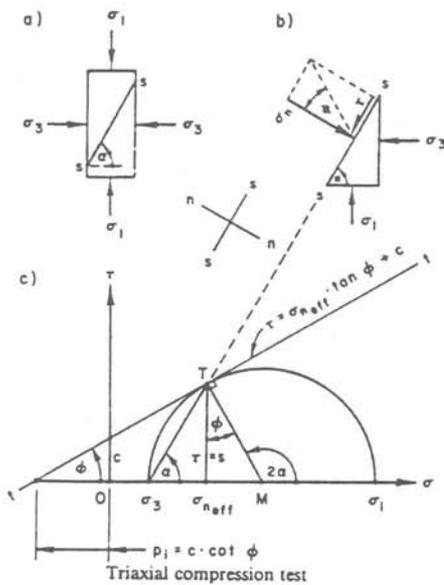


Fig. 13 - Schéma géométrique des contraintes principales sur les surfaces latérales verticales.

Le comportement des efforts radiaux aussi bien que tangentiels (σ_r , σ_t) apparaît spéculaire dans la mesure où il révèle une symétrie circulaire dans la distribution des efforts. La σ_t maximum, sur le point diamétral ($d/R = -1$) est égal à $\sigma_t = 2\sigma_v$;

- cas de régime d'efforts de compression $K = 2$. La distribution des efforts apparaît altérée jusqu'à une hauteur égale à plus ou moins $d/R = 2.5$ sur la hauteur de la calotte. Les contraintes σ_r et σ_t tendent toutes deux à augmenter en passant du point diamétral à la hauteur de calotte avec un gradient sensible dans le cas de σ_t qui part d'une valeur de plus ou moins $0.4 \sigma_h$ sur le bord diamétral ($d/R = -1$).

L'analyse des efforts principal major ($\sigma_t = \sigma_1$) et mineur ($\sigma_r = \sigma_3$) sur le plan de Mohr ($\sigma - \tau$) permet, connaissant son orientation, d'obtenir par analogie les efforts de cisaillement (τ) et orthogonaux (σ_n) aux surfaces verticales prises en considération (Fig. 14) (JUMIKIS, 1983). Si nous considérons l'angle alpha (α) compris entre les surfaces de glissement potentiel et la direction des efforts principaux mineurs (σ_r) (le com-



a) Failure of rock specimen in triaxial loading
 b) Free-body diagram of rock element
 c) MOHR'S stress diagram and COULOMB'S shear strength envelope ($\tau - \sigma$)

Fig. 14 - Analyse des efforts sur le plan de Mohr (d'après JUMIKIS, 1983).

plementaire de la Fig. 13 côté gauche), nous obtenons les formules suivantes :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \cos 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (2)$$

$$\text{ou } \begin{cases} \sigma_1 = \sigma_t \\ \sigma_3 = \sigma_r \end{cases}$$

La distribution des efforts normaux (σ_n) et de cisaillement (τ) normalisés sur la contrainte principale maximum le long des surfaces de glissement potentiel permet d'obtenir, dans les trois régimes d'efforts pris en considération (Fig. 15):

- $K = 0.5$ (effort de détente): les efforts de cisaillement, nuls au point diamétral ($d/R = -1$) semblent augmenter avec un gradient élevé jusqu'à atteindre la valeur de $\tau = 0.5 \sigma_v$ et se maintenir sur la même valeur en procédant vers la hauteur de la calotte ($d/R = 0$) à partir d'où, vers le haut, ils diminuent jusqu'à 0 à plus ou moins $d/R = 2.5$. Les efforts normaux (σ_n) atteignent la valeur de $0.5 \sigma_v$ autour de la hauteur de calotte à partir d'où il ne varie plus en procédant vers le haut.
- $K = 1$ (effort hydrostatique). Les efforts de cisaillement montrent le pic ($\tau = 0.5 \sigma_v$) dans la zone d/R plus ou moins -0.3 un peu au-dessous de la hauteur de la calotte alors que les efforts normaux augmentent jusqu'à

plus ou moins $d/R = 0.5$ à partir d'où ils restent sur la valeur de $\sigma_h = 1.1 \sigma_v$ pour diminuer lentement vers $\sigma_n = \sigma_v$ à $d/R = 2.5$ point où le cisaillement est nul.

- $K = 2$ (effort de compression). Le pic des efforts de cisaillement (τ plus ou moins $0.5 \sigma_h = \sigma_v$) apparaît pratiquement positionné exactement comme dans le cas précédent ($d/R = -0.2$ au lieu de -0.4) à partir d'où les efforts diminuent jusqu'à 0 à $d/R = 2.5$. Les efforts normaux également similaires dans la distribution au cas précédent atteignent une valeur maximum de $1.2 \sigma_h = 2.4 \sigma_v$ pour diminuer à $2 \sigma_v$ à $d/R = 2$.

Si nous établissons sur le plan $\sigma - \tau$ de Mohr le rapport entre les contraintes τ et σ_n , autrement appelé angle de frottement mobilisé (ϕ_{mob}), il est possible d'obtenir les graphiques de la Fig. 15 côté gauche.

Une simple analyse comparative avec l'angle de frottement disponible le long des surfaces de glissement potentiel, permet de définir jusqu'à quel point se propage la rupture par cisaillement le long des mêmes surfaces dans la phase de distribution élastique des contraintes. Cette zone est appelée "zone minimum de rupture potentielle" Nous n'analysons pas la situation au niveau d'une redistribution des contraintes à la suite de la plasticisation par cisaillement le long des surfaces verticales.

Si nous observons les trois diagrammes des différentes conditions de confinement tensionnel ($K = 0.5, 1.2$) et si nous supposons une résistance le long des surfaces de friction seulement, selon un angle de $\phi = 30^\circ$, nous pouvons dire que :

- dans tous les cas de confinement, la variation de l'angle de mobilisé (ϕ_{mob}) décrit une fonction exponentielle ou de puissance négative en partant de 0 au niveau de la zone supérieure non perturbée ($d/R = 2.5$) pour arriver à une valeur conventionnelle maximum de 90° au point diamétral ($d/R = -1$);
- les cas avec $K = 1$ et $K = 2$ présentent une "zone minimum de rupture potentielle" située entre le point diamétral ($d/R = -1$) et la hauteur de la calotte ($d/R = 0$) et montrent la rupture potentielle des deux coins rocheux compris entre le bord de la cavité et ces points;
- le cas de $K = 0.5$ présente une "zone minimum de rupture potentielle" étendue jusqu'à une hauteur de plus ou moins $d/R = 0.5$ significative vis-à-vis de la stabilité de la calotte. Dans ce cas, pour une meilleure compréhension du comportement du massif à la suite de la redistribution des contraintes due aux glissements plastiques le long des fractures ver-

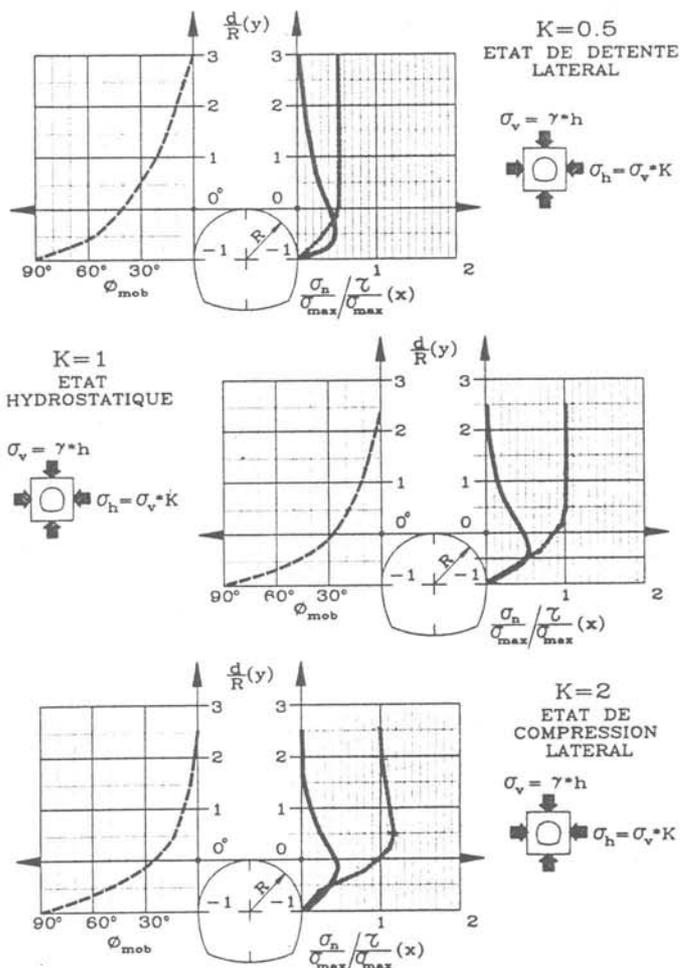


Fig. 15 - Schéma géométrique des contraintes orthogonales et tangentielles à les surfaces latérales verticales.

tiques, il s'impose de faire une analyse numérique aux éléments finis ou aux éléments distincts.

Dans les trois cas, la vérification du glissement doit être précédée de la rupture par fléchissement ou au flambage compte tenu des on à peine calculées.

6. CONCLUSIONS

Dans la réalisation de tunnels à l'intérieur de massifs montagneux constitués de formations flyschioïdes ou calcaires subhorizontales, la stabilité de la voûte d'excavation représente incontestablement le problème le plus important du point de vue de l'exécution.

La présence de bancs de couche subhorizontaux intéressés par des fractures orthogonales par rapport à eux et par voie de conséquence subverticales influence négativement la stabilité de la calotte.

Des relevés directs in situ de même que la collecte de données et d'informations bibliographiques nous ont permis

de mettre en évidence les caractéristiques géostructurelles principales de ces massifs rocheux :

- surfaces de couche à faibles caractéristiques de résistance au cisaillement et à la traction;
- présence systématique de deux familles au moins de fracturation orthogonales à l'état;
- fréquence des familles de fractures directement proportionnelle à l'épaisseur des couches.

Le comportement géomécanique de la voûte de la cavité dépend très fortement de l'état de contrainte originare dans la massif. Nous avons pu distinguer les situations type en fonction du rapport K (entre contrainte horizontale et verticale):

- $0 < K < 1$ correspond à des profondeurs basses du massif ou à des situations tectoniques de détente. Les cas de $K < 0.5$ peuvent correspondre à des tunnels creusés dans des situations corticales ou pariétales;
- $K = 1$ correspond à des recouvrements lithostatiques élevés et à des zones tectoniquement inactives;
- $K > 1$ correspond à des massifs avec des contraintes tectoniques résiduelles en cours.

Les études bibliographiques en la matière et les expériences acquises au cours de l'excavation de tunnels ont révélé trois modalités de rupture en fonction de la combinaison de certaines conditions géostructurelles et de contrainte.

a. effondrement de plaques rocheuses par glissement le long de fractures verticales sur les bords de la cavité. Il s'agit essentiellement de roches à bancs ayant une épaisseur élevée, avec des fractures associées pénétrantes et relativement peu fréquentes. Il prédomine dans les cas de $0 < K < 1$ surtout lorsque l'axe du tunnel correspond ou est semblable à la direction des fractures (Fig. 16a, 17);

b. effondrement de plaques rocheuses par rupture de fléchissement ou par flambage. Il se produit essentiellement au niveau de roches sédimentaires calcaires à stratification fine et faiblement fracturées, sous l'action d'états

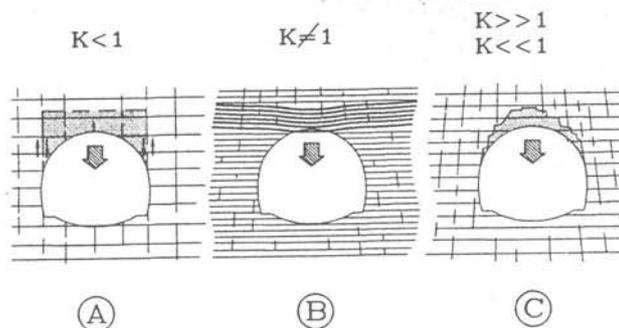


Fig. 16 - Typologies d'effondrement pour différents confinements.

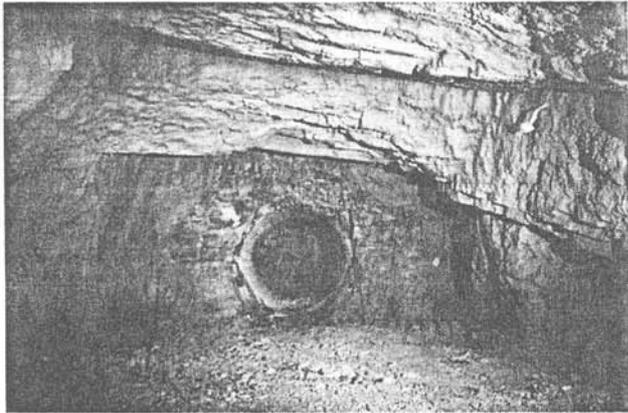


Fig. 17 - Effondrement de plaques rocheuses par glissement.

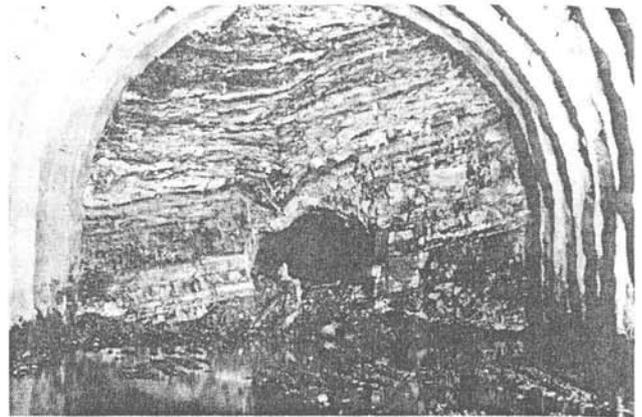


Fig. 19 - Effondrement de matières intensément fracturées.

de détente (fléchissement) ou de compression (flambage) ($K < 1$ et $K > 1$ respectivement) (Fig. 16b, 18);

c. effondrement de matières intensément fracturées. Il peut se produire si le matériel est initialement très fracturé pour des causes tectoniques ou du fait d'une épaisseur réduite des couches et de passages lithologiques fréquents, lorsque l'état de contrainte originaire est du type détente ($K < 1$ ou $K < 0.5$). Plus le coefficient K est réduit, plus il est important. Il peut au contraire se produire dans des formations normalement stratifiées mais avec peu de passages lithologiques (c'est à dire faiblement fracturées) lorsque l'état de tension est fortement compressif ($K \gg 1$) (Fig. 16c, 19).

En ce qui concerne le cas "a", une analyse préliminaire a été développée afin d'évaluer les "zones minimum de glissement potentiel" sur les surfaces de fracture verticale supposées être positionnées sur les bords latéraux de la cavité.

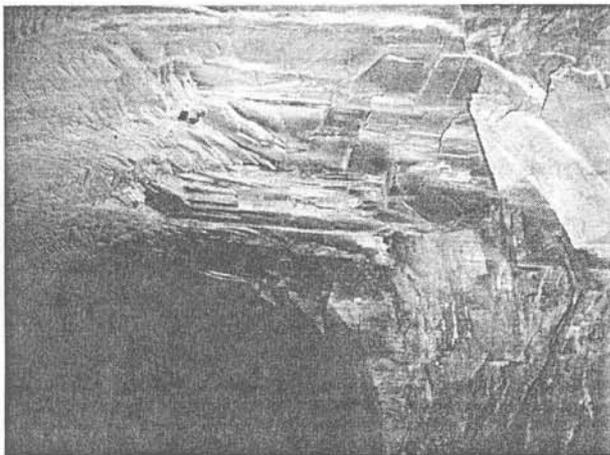


Fig. 18 - Effondrement de plaques rocheuses par fléchissement ou flambage.

REFERENCES

- BRADY, B.H.G. & Brown, E.T., 1985: Rock Mechanics For Underground Mining. George Allen & Unwin, London, pp. 209 ÷ 222.
- FROLDÍ, P., 1993: La Caractérisation Géomécanique des Flyschs des Apennins Septentrionaux en Italie. Compte-Rendus des Journées d'Etudes Internationales, AFTES, A.A. Balkema, Rotterdam, Reith, J.L., CETU, Bron, pp. 113 ÷ 123.
- GROSS, M.R., 1993: The Origin and Spacing of Cross Joints: Examples from the Monterey Formation, Santa Barbara Coastline, California. Journal of Structural Geology, Pergamon Press, Oxford, Vol. 15, Number 6, pp. 737 ÷ 753.
- HERGET, G., 1988: Stresses in rock. A. Balkema, Rotterdam, pp. 50 ÷ 60.
- HOEK, E. & BROWN, E.T., 1980: Underground Excavations in Rock. The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 467 ÷ 492.
- JAEGGER, C., 1972: Rock Mechanics and Engineering. Cambridge at the University Press, pp. 86 ÷ 90.
- JUMIKIS, A.R., 1983: Rock Mechanics. Trans Tech Publications, F.R. of Germany, pp. 191 ÷ 201, 318 ÷ 326.
- NARR, W. & SUPPE, J., 1991: Joint Spacing in Sedimentary Rocks. Journal of Structural Geology, Pergamon Press, Oxford, Vol. 13, Number 9, pp. 1037 ÷ 1049.
- PEACOCK, D.C.P. & SANDERSON, D., 1992: Effects of Layering and Anisotropy on Fault Geometry. The Journal of the Geological Society, Geological Society, London, Vol. 149, Part. 5, pp., 793 ÷ 803.
- STERLING, R.L., 1980: The ultimate load Behaviour of Laterally Constrained Rock Beams, the state of the Art in Rock mechanics. Proc. 21st US Symp. Rock Mech, D.A. Summers (ed.), pp. 533-42, Rolla: Univ. Missouri.