



HAL
open science

Types de ruptures associés à l'orientation des contraintes principales dans des ouvrages souterrains

Marwan Al Heib

► **To cite this version:**

Marwan Al Heib. Types de ruptures associés à l'orientation des contraintes principales dans des ouvrages souterrains. Journées de l'Association universitaire de Génie Civil, May 1992, Cachan, France. pp.19-26. ineris-00971843

HAL Id: ineris-00971843

<https://ineris.hal.science/ineris-00971843>

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.

Types de ruptures associés à l'orientation des contraintes principales dans des ouvrages souterrains

AL HEIB M.M : chercheur, Laboratoire de Mécanique des Terrains
 INERIS, Ecole des Mines de Nancy

Résumé : Les observations récentes concernant les ruptures de roches autour des ouvrages souterrains ont montré l'existence de plusieurs mécanismes de rupture. L'évaluation de la stabilité et la conception du renforcement et du soutènement de toutes les excavations passent par la connaissance des mécanismes et des modes de rupture. Dans cette communication, nous développons trois idées inspirées par des observations effectuées dans les puits pétroliers, les galeries minières et les chantiers d'exploitation. Celles-ci sont confrontées à des calculs analytiques et numériques. Les modes de rupture dépendent du tenseur final des contraintes (somme du tenseur initial et du tenseur induit). Le tenseur des contraintes induites par l'excavation dépend à la fois de la géométrie de l'ouvrage (circulaire, quadrangulaire, vertical et horizontal) et du tenseur des contraintes initiales. Dans les analyses de rupture en deux dimensions (problème de déformation plane, contraintes planes, ...), on considère que la troisième contrainte (contrainte axiale) est une contrainte intermédiaire. Nous montrerons que cette contrainte pourrait être une contrainte majeure ou mineure en fonction des deux éléments introduits ci-dessus. Ces analyses permettent donc de comprendre beaucoup d'observations. En retour, elles donnent des indications précieuses sur le champ des contraintes in situ, et permettent notamment de mieux interpréter les mesures des contraintes. Dans le cas où les contraintes sont connues, nous pouvons tenter de prédire le ou les types de ruptures qui pourront se produire et donc les mesures nécessaires à prendre pour les éviter.

I- Introduction

Dans des exploitations minières, en Australie (Gale et al, 1987), au cours du creusement, des cassures sont apparues au toit et au mur des voies dont la hauteur est égale à 2,5 m. La position et l'importance des cassures dépendent de l'orientation de l'axe de la galerie par rapport à la plus grande contrainte horizontale. Ce type d'instabilité est aussi rencontré dans la majorité des bassins houillers aux USA où la contrainte horizontale naturelle est élevée (Hill et al). Les pétroliers se sont aperçus (Gough et al, 1982) que les puits de forage montrent des formes de rupture caractéristiques telles l'ovalisation, les hors-profils ("break outs"), qui contiennent toute une information sur le champ des contraintes en place, et l'anisotropie du champ horizontal. Cette méthode a été retenue pour l'établissement de la carte mondiale des contraintes (Zoback, 1985) surtout dans des domaines où les mesures directes sont très difficiles et très chères. On considère que la contrainte axiale (contrainte intermédiaire) n'intervient pas dans cette analyse. Nous étudierons ce problème dans le cas d'une galerie circulaire sur un champ de contraintes anisotrope. Ensuite nous analyserons le cas d'une galerie de forme rectangulaire. Pour pouvoir étudier les contraintes principales induites par l'excavation, il faudra dans ce cas employer des méthodes numériques parce qu'il n'existe pas de solutions analytiques.

Sourcées de l'association Univ. de Génie Civil.

Cachan. le 15 mai 1992

II- Fracturation autour des ouvrages souterrains

Les ruptures sont supposées provoquées par les contraintes extrêmes majeures et mineures (Jaeger, 1979). Mais on a montré qu'autour d'un puits pétrolier les contraintes extrêmes ne sont pas toujours radiales et tangentielles. Plusieurs modes de rupture par cisaillement sont observés in situ. Ils dépendent de l'ordre des trois contraintes principales, (Maury et al, 1987) (fig. 1) : le type "A1" est le mode classique le plus rencontré dans les ouvrages de génie civil où la contrainte horizontale n'est pas très élevée ; le type "A2" est beaucoup plus difficile à observer.

Type A1 : $\sigma_r < \sigma_z < \sigma_\theta$

Type A2 : $\sigma_\theta < \sigma_z < \sigma_r$

Il est tout à fait possible de se trouver dans des situations où c'est la contrainte tangentielle σ_θ qui devient intermédiaire et l'on obtient deux types :

Type B1 : $\sigma_r < \sigma_\theta < \sigma_z$

Type B2 : $\sigma_z < \sigma_\theta < \sigma_r$

Les modes "C1" et "C2" correspondent à une contrainte radiale intermédiaire. Ils sont les plus compliqués à saisir mais s'exprimeraient à la paroi par des cisaillements le long de spirales entrecroisées.

Type C1 : $\sigma_\theta < \sigma_r < \sigma_z$

Type C2 : $\sigma_z < \sigma_r < \sigma_\theta$

Quant à la rupture par extension, elle se produit perpendiculairement à la contrainte de traction tangentielle (cas de la fracturation hydraulique, ou au toit d'une galerie rectangulaire). Des études récentes ont montré qu'il y a une influence importante de la contrainte intermédiaire σ_2 (Mogi, 1979) sur le critère de rupture. Mais nous travaillons ici sans tenir compte de σ_2 . Nous représentons le tenseur

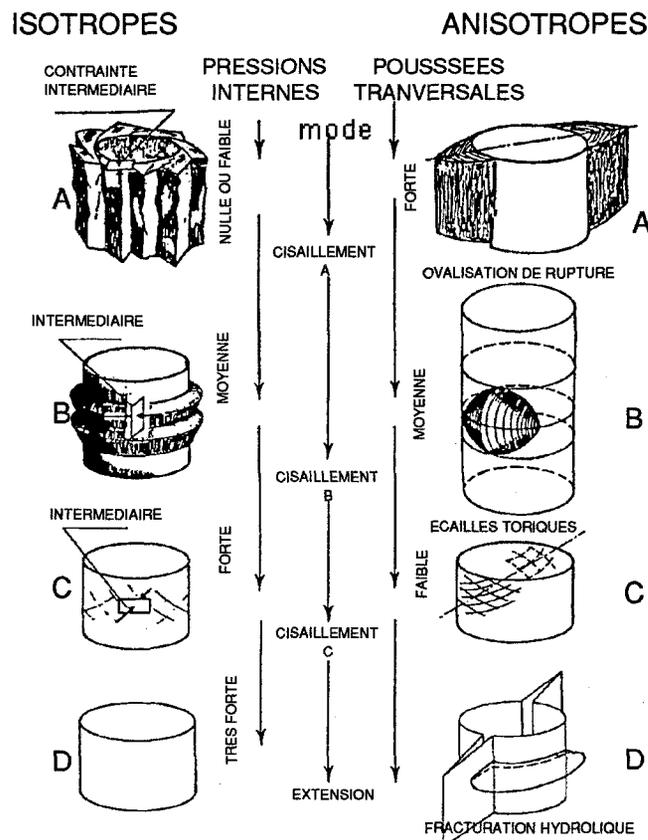


Fig. 1 : Modes de ruptures à la paroi d'un puits selon l'orientation de la contrainte intermédiaire (d'après Guénot, 1987 et 1989)

principal de contrainte ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) à l'aide du cercle de Mohr dans le plan (σ, τ). La rupture se produira lorsque le grand cercle sera tangent à la courbe intrinsèque (fig 2). Il existe un plan parfaitement défini, sur lequel la rupture par cisaillement se produit. La question que l'on peut se poser ici est : quelles sont les directions de ces deux contraintes majeure et mineure, et a fortiori l'orientation du plan de rupture dans le cas où l'on dépasse la courbe intrinsèque ?

III-Distribution des contraintes autour d'un ouvrage

III-1 Etat initial des contraintes

Avant de réaliser un ouvrage dans un massif rocheux, les terrains sont dans un état d'équilibre. Celui-ci correspond à une distribution des contraintes dites "naturelles" ou "initiales" (Asszonyi et al, 1979). En admettant que la déformation latérale est nulle et selon la loi de Hooke, le champ des contraintes horizontales (σ_x, σ_z) est lié à la contrainte verticale σ_y et aux caractéristiques de terrains :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_z = 0 \text{ et } \sigma_y = \gamma y \implies$$

$$\sigma_x = \sigma_z = K_o \sigma_y \text{ (} K_o = \nu / (1 - \nu) \text{)} : \nu \text{ coefficient de Poisson et } \gamma \text{ poids volumique}$$

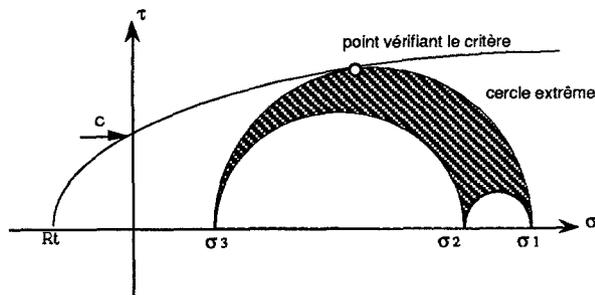


Fig 2 : Critère de rupture de Mohr-Coulomb et les trois cercles de contraintes principales.

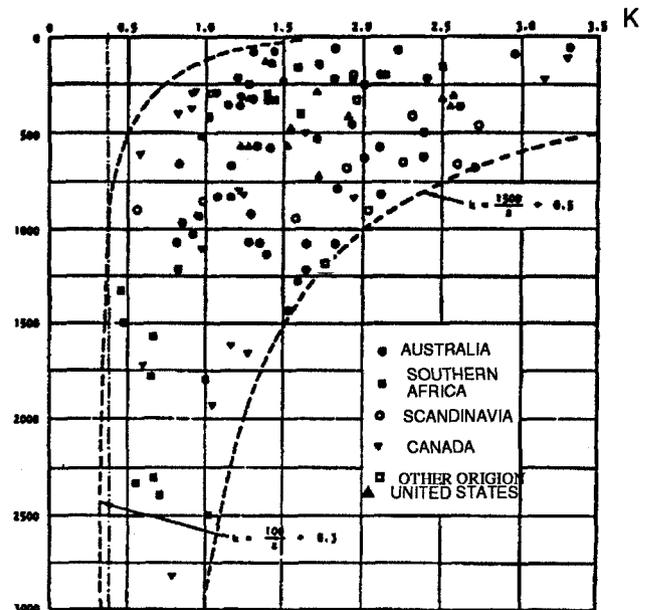


Fig 3 : Points montrant le rapport entre la contrainte horizontale moyenne et la contrainte verticale

Pour $\nu = 0,5$ les contraintes sont : $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma y$. Mais les mesures de contraintes ont montré, que la contrainte verticale en MPa est liée à la profondeur par la relation : $\sigma_y = 0,027 H$ (Hoek, 1978). Le rapport des contraintes verticales et latérales "K" dépend de nombreux facteurs : la profondeur H, les propriétés mécaniques des terrains, l'histoire tectonique, la configuration des terrains, etc ... La contrainte horizontale moyenne varie de 0,5 à 3,0 fois la contrainte verticale pour une même profondeur (fig.3). Les deux contraintes principales horizontales peuvent être totalement différentes.

III-2 Etat final des contraintes

Le fait de creuser un ouvrage dans un massif rocheux crée un nouvel état des contraintes (Piguet, 1983). Il en résulte des contraintes nouvelles de traction, de cisaillement, et de compression. Sous

l'action de ces nouvelles contraintes, les roches au voisinage de l'excavation se déforment, et éventuellement se fissurent. Pour connaître le ou les types de ruptures, ainsi que les plans dans lesquels les fissures se propagent, il faudra connaître les orientations des contraintes principales. Nous allons étudier le cas d'une galerie circulaire permettant de comprendre pourquoi la contrainte axiale peut être une contrainte majeure ou mineure et donc pourquoi un mode de rupture peut correspondre à l'un des modes cités auparavant A, B ou C. Ensuite, nous étudierons une galerie rectangulaire, puis l'orientation de la galerie par rapport à la direction des contraintes principales.

III-3- Galerie circulaire en milieu élastique

Supposons qu'une galerie de rayon "a" est excavée dans un milieu isotrope. Les pressions qui s'exercent dans le massif vierge à une profondeur "h" sont : P verticalement, Q horizontalement et q axialement. D'après la théorie de l'élasticité (Mandel, 1959) en supposant que ce problème obéit à l'hypothèse de déformation plane, les variations de contraintes produites par l'excavation sont définies en coordonnées cylindriques par :

$$\Delta\sigma_r = \left(\left(-\frac{P+Q}{2} \right) + \left(\frac{P-Q}{2} \right) \left(4 - 3 \left(\frac{a^2}{r^2} \right) \right) \cos 2\theta \right) \frac{a^2}{r^2}$$

$$\Delta\sigma_\theta = \left(\left(\frac{P+Q}{2} \right) + \left(\frac{P-Q}{2} \right) \left(3 \left(\frac{a^2}{r^2} \right) \right) \cos 2\theta \right) \frac{a^2}{r^2}$$

$$\tau_{r\theta} = \left(\left(\frac{P-Q}{2} \right) \left(2 - 3 \left(\frac{a^2}{r^2} \right) \right) \sin 2\theta \right) \frac{a^2}{r^2}$$

$$\Delta\sigma_z = \nu (\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta) = 2\nu(P-Q) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta$$

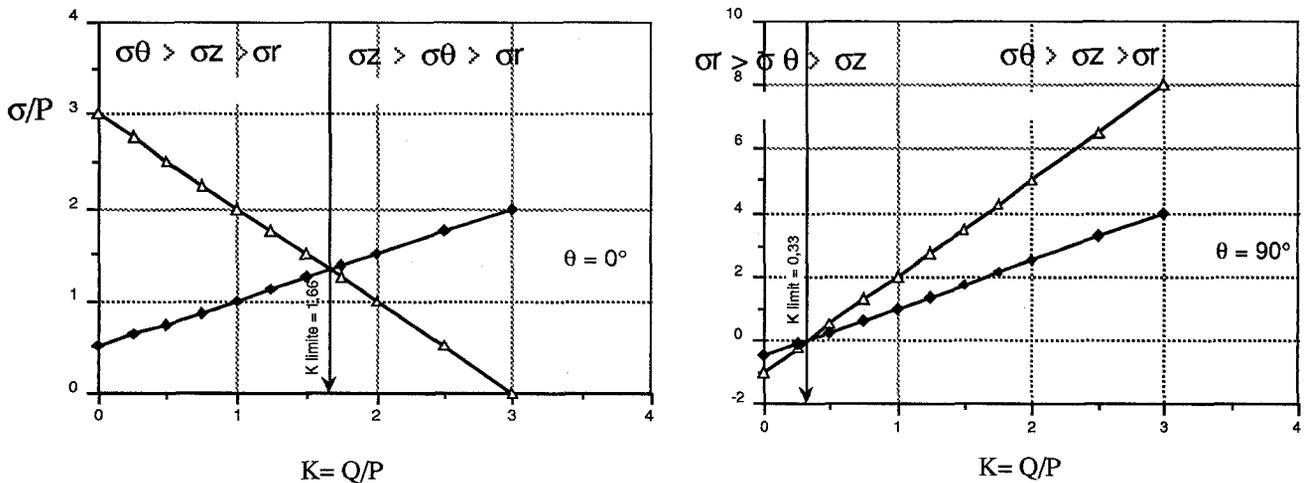


Fig. 4 : Contraintes axiales et tangentielles à la paroi de la galerie en fonction du rapport des contraintes K pour des angles θ de 0° et 90° .

Pour obtenir les contraintes totales, il faut ajouter les contraintes initiales. Pour illustrer cette idée, nous avons choisi deux points se situant à la paroi de la galerie ($r = a$), pour lesquels les contraintes sont les principales. Pour un angle θ égal à 0° , les contraintes sont :

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0 ; \sigma_\theta = P(3 - K) ; \sigma_z = (1 - 2\nu)Q + 2\nu P$$

pour un angle θ égal à 90° , les contraintes sont :

$$\sigma_r = \tau_{r\theta} = 0 ; \sigma_\theta = P(3K - 1) ; \sigma_z = Q(1 + 2\nu) - 2\nu P$$

Nous remarquons que les contraintes principales extrêmes dépendent de K (rapport des contraintes horizontale et verticale) et du coefficient de Poisson. La contrainte axiale σ_z devient une contrainte principale majeure pour $K > 1,66$ et un coefficient de Poisson de $0,25$ (fig. 4). Par analogie, cela correspond au mode de rupture "B1". Les contraintes extrêmes majeure et mineure sont axiale et radiale, respectivement : $\sigma_1 = \sigma_z$ et $\sigma_3 = \sigma_r$. Pour $\theta = 90^\circ$, nous remarquons que la contrainte tangentielle est toujours plus grande que la contrainte axiale pour toute valeur de K supérieure à $0,33$. En conséquence, la contrainte axiale est une contrainte intermédiaire (fig.4). Le mode de rupture est le mode "A1" : $\sigma_r < \sigma_z < \sigma_\theta$. Nous pouvons noter que pour des valeurs de K inférieures à $0,33$, les contraintes axiales et tangentielles sont en traction. Le mode de rupture est par extension soit le mode "D" : $\sigma_\theta < \sigma_z < \sigma_r$.

Entre les deux situations, il y a un angle limite pour lequel la contrainte axiale passe à un statut d'une contrainte intermédiaire. Cet angle est fonction du rapport des contraintes "K". Par exemple pour $K=2$ la limite est donnée par un angle de 20° (fig. 5). En conséquence, pour des valeurs de contraintes horizontales très élevées la rupture aura lieu aux parements de la galerie. Les fissures devraient être situées dans un plan axial-radial.

- 1: $\sigma_z > \sigma_\theta > \sigma_r$ "B1"
- 2: $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ "A1"
- 3: $\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$ "C1"

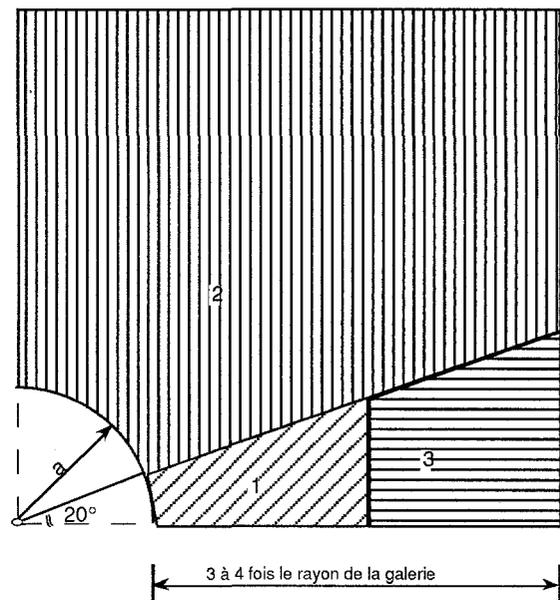


Fig 5 : Limite de la zone où la contrainte axiale σ_z est une contrainte majeure pour un rapport de contrainte $K = 2$

III-4 - Galerie rectangulaire

Les résultats que nous avons présentés jusque là sont valables pour une forme circulaire où les dimensions de l'ouvrage n'interviennent pas dans la distribution des contraintes, ce qui n'est pas le cas d'un ouvrage rectangulaire. Comme il n'existe pas de méthode analytique, nous avons adopté une méthode numérique (Eléments Finis, code ELF13F). Nous supposons que la galerie, ayant une largeur "W" et une hauteur "H" est creusée à h mètres de profondeur dans un milieu élastique isotrope.

Nous avons distingué l'état des contraintes au toit et aux parements de la galerie. Les paramètres qui interviennent dans ce cas sont la géométrie de la galerie (le rapport largeur / hauteur) et le rapport

des contraintes K. Nous allons d'abord, déterminer le rapport des contraintes K permettant à la contrainte axiale d'être une contrainte majeure ou mineure aux parements. Nous avons fait varier l'élanement de la galerie (W/H) entre 0,5 et 3. Pour chaque élanement, nous avons cherché le rapport des contraintes K dit 'limite'. Nous constatons qu'au niveau des parements la valeur de 'K limite' est plus élevée au fur et à mesure que la largeur de la galerie est importante (fig. 6). En effet, la contrainte axiale est une contrainte majeure aux parements pour des valeurs de K supérieures à 'K limite'. Les trois composantes des contraintes sont en compression, la rupture se fait par cisaillement en mode "B2" ou "C2".

Ce phénomène est très différent si on s'intéresse au toit de l'ouvrage. Pour les faibles portées, la contrainte axiale est toujours intermédiaire. Pour de plus grandes portées (W/H > 2), nous obtenons deux valeurs de "K limite" qui correspondent à deux modes possibles de rupture. Nous allons analyser le cas d'une galerie pour laquelle le rapport (W/H) est égal à 3 (fig. 7) : Au parement, la valeur de 'K limite' est égale à 1,9 (fig 7-c). Le mode de rupture est le mode "B1". Au toit, pour des valeurs de K

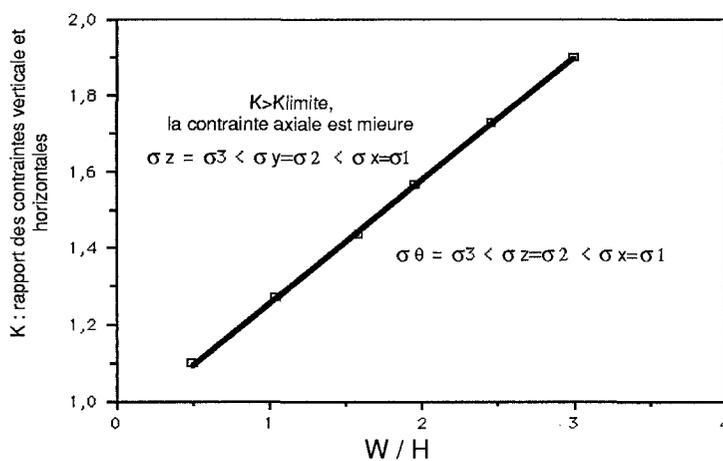


Fig 6 : Valeur de K limite en fonction du rapport des dimensions de la galerie W et H.

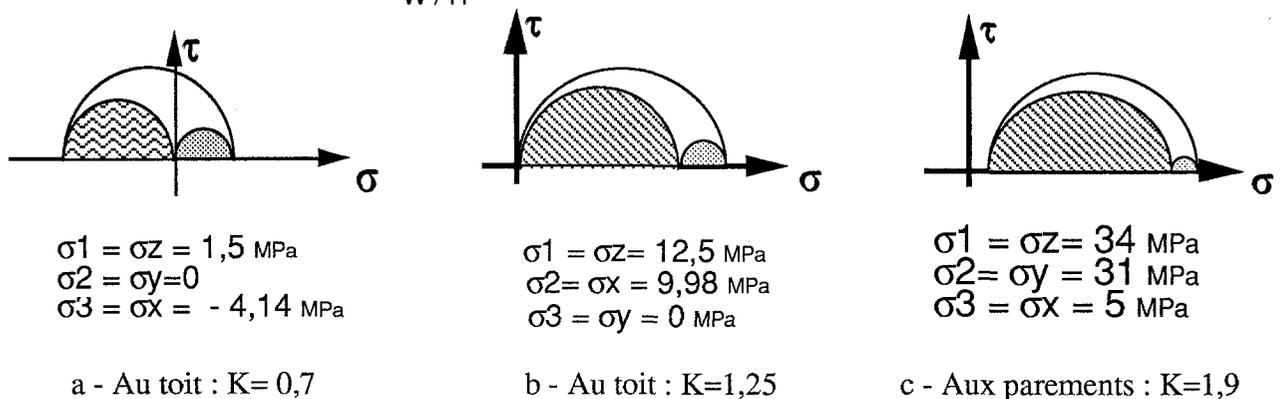


Fig 7 : Types de rupture d'une galerie rectangulaire (W/H=3) en fonction de rapport des contraintes verticale et horizontale ($\sigma_{yo} = 20$ MPa, compression positive)

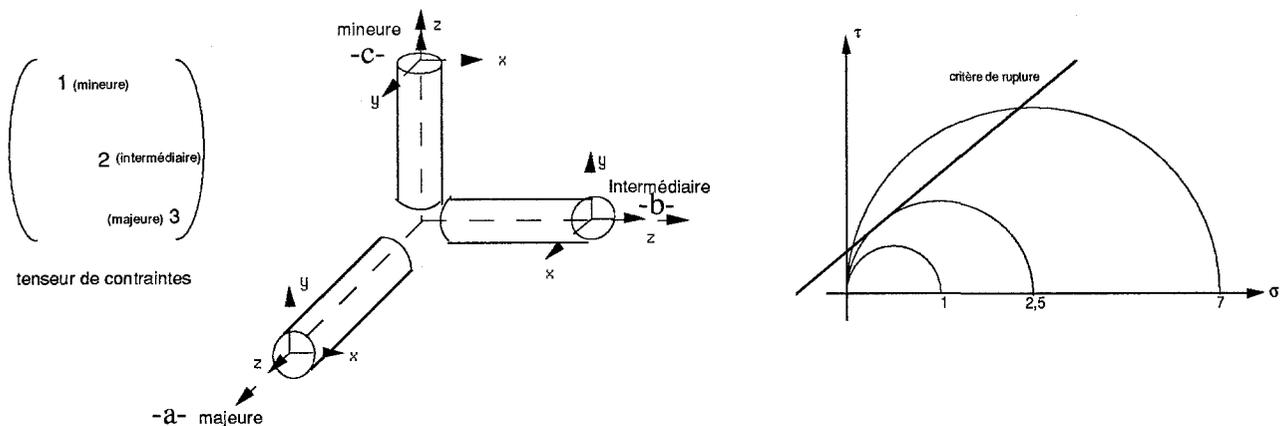
inférieures à 0.7 (fig 7-a), la contrainte horizontale (traction) est la contrainte principale mineure (σ_3). La contrainte verticale est intermédiaire (σ_2). En conséquence, la contrainte axiale est une contrainte principale majeure de compression. Dans ce cas, la rupture se fait par extension et correspond au mode "D". Dans le deuxième cas qui correspond à des contraintes horizontales importantes, la contrainte horizontale n'est plus en traction au toit de la galerie (fig 7-b). Cette contrainte horizontale devient une contrainte de compression intermédiaire (σ_2). Les deux contraintes principales sont la contrainte verticale mineure (σ_3) et la contrainte axiale majeure (σ_1). Le grand cercle de Mohr est composé d'une contrainte verticale quasi nulle et d'une contrainte axiale de compression. Le mode de rupture

correspond au mode "C1" : $\sigma_y < \sigma_x < \sigma_z$.

En conclusion, nous avons mis en évidence que, pour les ouvrages rectangulaires la contrainte axiale pourra être une contrainte majeure ou mineure. Elle se manifeste dans des zones sensibles à la rupture. Le rapport des contraintes 'K limite' détermine la zone dans laquelle cette contrainte est extrême. Plusieurs modes de ruptures sont possibles.

IV- Orientation de l'ouvrage par rapport aux contraintes initiales

D'une façon générale l'état des contraintes initiales est caractérisé par trois valeurs de contraintes principales (tenseur anisotrope). L'axe de l'ouvrage peut correspondre à l'une de ces trois directions. Les contraintes induites dépendent aussi de l'orientation de l'axe de l'ouvrage par rapport aux directions



a : la galerie dans l'axe de la contrainte majeure : $\sigma_y=1$, $\sigma_x=2$ et $\sigma_z=3$ donc $\sigma_\theta=1$ et $\sigma_z=\sigma_1=2,5$

b : la galerie dans l'axe de la contrainte intermédiaire : $\sigma_y=1$, $\sigma_x=3$ et $\sigma_z=2$ donc $\sigma_\theta=0$ et $\sigma_z=\sigma_1=1$

c : la galerie dans l'axe de la contrainte mineure : $\sigma_y=3$, $\sigma_x=2$ et $\sigma_z=1$ donc $\sigma_\theta=\sigma_1=7,5$ et $\sigma_z=1,5$

Fig 8 : Contraintes axiale et tangentielle en fonction de l'orientation de l'ouvrage par rapport au tenseur des contraintes principales

des contraintes principales (fig. 8). On suppose que les valeurs de celles-ci sont dans les rapports 1, 2 et 3 respectivement. Un repère conventionnel x, y, z est adopté pour la galerie. Nous allons étudier les cas où l'axe (z) de la galerie coïncide avec la direction de l'une des contraintes principales.

a- L'axe de la galerie correspond à la direction de la contrainte majeure :

Dans ce cas, les contraintes initiales sont 2, 1 et 3 selon respectivement x, y et z. Les contraintes finales pour $r=a$ et $\theta=0$ sont $\sigma_r=0$, $\sigma_\theta=1$ et $\sigma_z=2,5$. La direction de la contrainte principale majeure après excavation correspond donc à la direction axiale.

b- L'axe de la galerie correspond à la direction de la contrainte intermédiaire :

Dans ce cas, la contrainte selon x est égale à 3, la contrainte selon y est égale à 1 et la contrainte axiale est égale à 2. Les contraintes finales pour les mêmes conditions ci-dessus sont $\sigma_r=0$, $\sigma_\theta=0$ et $\sigma_z=1$. Nous constatons que la valeur de la contrainte principale majeure est égale à 1 et que sa direction est axiale.

c- L'axe de la galerie correspond à la direction de la contrainte mineure :

Nous pouvons constater que les contraintes initiales sont égales à 2 selon x, 3 selon y et 1 selon l'axe de la galerie. En revanche, les valeurs des contraintes finales pour le même point sont les suivantes : $\sigma_x=0$, $\sigma_y=7$ et la contrainte axiale $\sigma_z=1,5$. La contrainte principale majeure est égale à 7 et sa direction correspond à l'axe oy.

En conclusion, pour ces situations bien particulières, nous constatons que la valeur et la direction de la contrainte principale majeure totale (induite + initiale) est fonction de l'orientation de la galerie. Elle varie entre 1 et 7. Sa direction correspond à l'axe de la galerie pour les cas "a" et "b". En revanche, pour le cas "c", elle correspond à la direction radiale y.

Supposons un critère de rupture comme celui présenté sur la figure 8, nous constatons que l'ouvrage est à l'équilibre dans le cas "b". Il est à la limite de la rupture dans le cas "a". En revanche la rupture est largement dépassée dans le cas "c". Donc le bon choix de l'orientation de l'ouvrage par rapport aux directions des contraintes permet d'éviter la rupture. Quand la direction de l'ouvrage est imposée, un soutènement efficace et adapté aux modes de ruptures susceptibles d'avoir lieu, est nécessaire.

V- Conclusion

L'évaluation de la stabilité et la conception du renforcement et du soutènement de toutes les excavations passent par la connaissance des mécanismes et des modes de rupture. Nous avons montré que plusieurs types de ruptures peuvent apparaître autour d'une excavation, qu'elle soit circulaire (galerie, puits) ou rectangulaire. Nous avons constaté comment ces modes de rupture dépendent des valeurs et de l'orientation des contraintes principales par rapport à l'ouvrage. Dans les problèmes de déformation plane, la contrainte axiale n'est pas toujours une contrainte intermédiaire. Il est tout à fait possible qu'elle soit une contrainte majeure ou mineure surtout pour des contraintes horizontales élevées. En conséquence, les modes de rupture dépendent de la contrainte axiale. Ces analyses permettent de comprendre beaucoup d'observations. En retour, elles donnent des indications précieuses sur le champ des contraintes in situ. Dans le cas où les contraintes sont connues, nous pouvons essayer de prédire le ou les types de ruptures qui pourront se produire et donc les mesures nécessaires pour les éviter. Les exploitations minières avec ses galeries et ses ouvrages très variés permettent de faire progresser la connaissance sur les modes de ruptures. Nous avons constaté qu'à chaque type d'ouvrages, deux ou trois modes de rupture sont possibles. Par conséquent, nous pouvons mieux comprendre les phénomènes observés et adapter le soutènement approprié.

BIBLIOGRAPHIE

- Asszonyi.Cs & Richter R. 1979. The continuum theory of rock mechanics. Serie on rock and soil Mechanics- Budapest.
- Brady . BH.G & Brown E.T. 1985. Rock Mechanics for underground Mining.London.
- Gale W.J. & BlackWood R.L. 1987. Stress distribution and rock failure around coal mine roadways. Int. Jour. Rock mech. MIN. Sci. et Geomech. abstr. Vol. 24 n°3 PP 165-173.
- Gough D.I. & Bell J.S. 1982. Stress orientation from borehole wall fracture with examples from Colorado, east Texas, and northern Canada. Can J. Earth Sci. 19, pp. 1358-1370.A.
- Guénot A.1989. Borehole Breakouts and Stress Fields. Int. J. Rock Mech. Sci & Geom. Abstr. Vol 26. No 3/4, pp. 185-195
- Guénot A. 1987. Contrainte et rupture des forages pétroliers. 6 Th Int. congr. Rock mech., Vol1, pp 109-118. Ed. Balkema.
- John L. Hill. Cutter roof failure : An overview of the causes and methods for control. Information circulaire 9094 (USA Dep. of the Interior, Bureau of Mines)
- Jaeger J. C. & Cook N.G.W 1979. Fundamentals of Rock Mechanics. Methuen and co, London.
- Mandel J. 1959. Les calculs en matières de pression des terrains R.I. M.
- Mauray V.M. and Sauzay J.M. 1989. Rupture de puits provoquée par glissement sur faille : cas vécu, mécanisme, remedes, conséquences. Rock at Great Depth, Balkema, Rotterdam. pp 871-876.
- Mogi K. 1979. Flow and fracture of rocks under general triaxial compression. 4 The Congress of the ISRM, Montreux, Vol. 3, P. P 123-130 Rotterdam, Balkema.
- Piguet J-P. 1983. La modélisation en mécanique des terrains et son application à l'exploitation Minière. Thèse ès Science.INPL. NANCY.
- Zoback M.D. & assi 1985. Wellbore breakouts and in situ stress. J. of Geoph. Res. 90 N°B7 5523-5530.