

Cours d'ingénierie des roches
Chapitre 2

Excavations dans un massif continu

1 Forages et galeries (*figures et diapos*)

2 Excavations en surface, rebond élastique

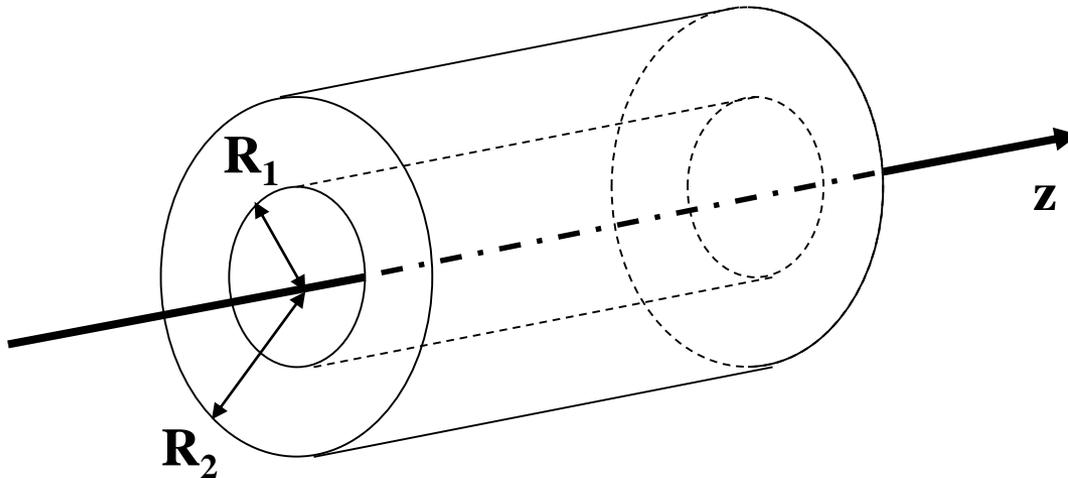
Didier Hantz

2017

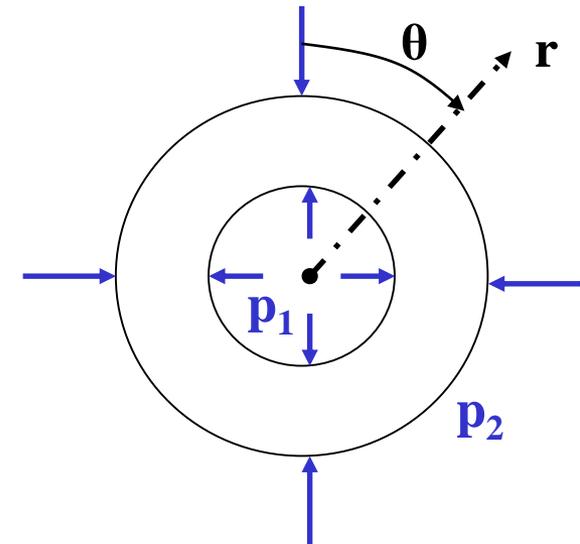
1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

MODELE DU CYLINDRE CREUX ELASTIQUE NON PESANT

Géométrie



Conditions aux limites



- Pression p_1 et p_2
- Extrémités fixes $\rightarrow \varepsilon_z = 0$

MODELE DU CYLINDRE CREUX ELASTIQUE NON PESANT

- Equations d'équilibre
- Loi de comportement élastique
- Conditions aux limites

Calcul des déplacements,
déformations et contraintes

Contraintes
principales

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{p_2 R_2^2 - p_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} - \frac{(p_2 - p_1) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \\ \sigma_\theta &= \frac{p_2 R_2^2 - p_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} + \frac{(p_2 - p_1) R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)} \\ \sigma_z &= 2 \nu \frac{p_2 R_2^2 - p_1 R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} = \nu (\sigma_r + \sigma_\theta) \end{aligned} \right.$$

$$v = w = 0$$

$$-u = \frac{(p_2 R_2^2 - p_1 R_1^2) r}{2(\lambda + G)(R_2^2 - R_1^2)} + \frac{(p_2 - p_1) R_1^2 R_2^2}{2G(R_2^2 - R_1^2) r}$$

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

MODELE DU CYLINDRE CREUX ELASTIQUE NON PESANT

Cas où $R1 \ll R2$: cylindre très épais \approx milieu infini

$$\sigma_r = p_2 \left(1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right) + p_1 \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = p_2 \left(1 + \frac{R_1^2}{r^2} \right) - p_1 \frac{R_1^2}{r^2}$$

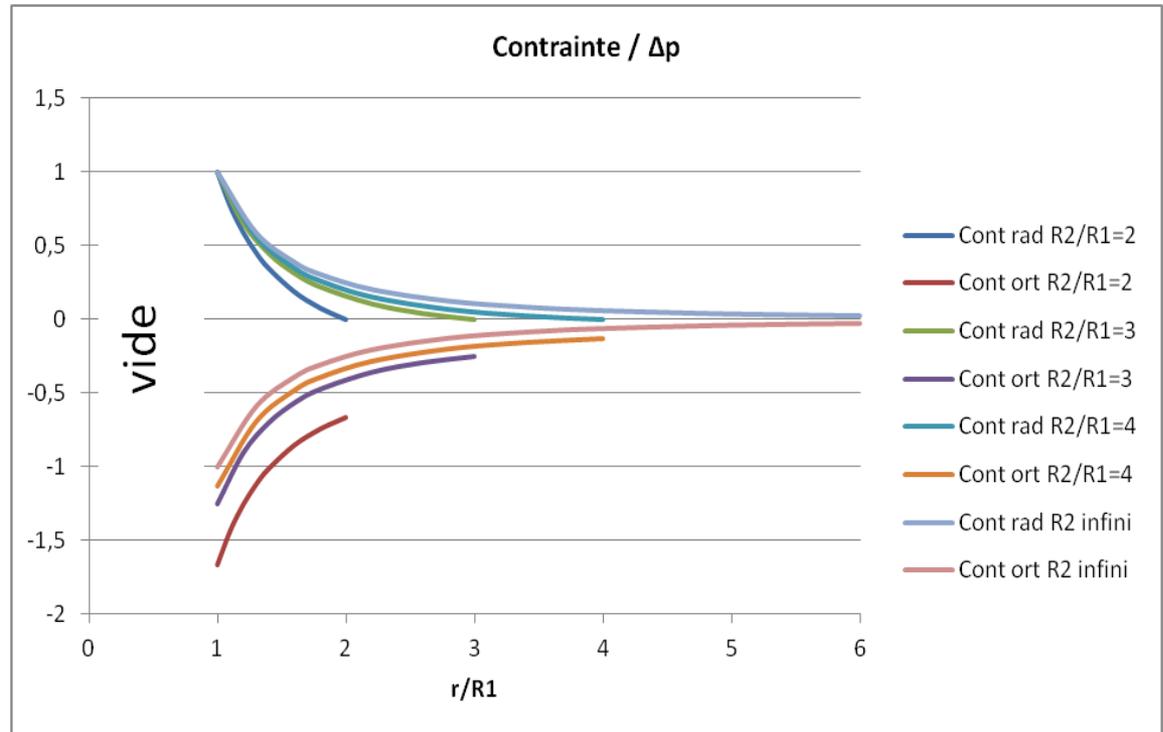
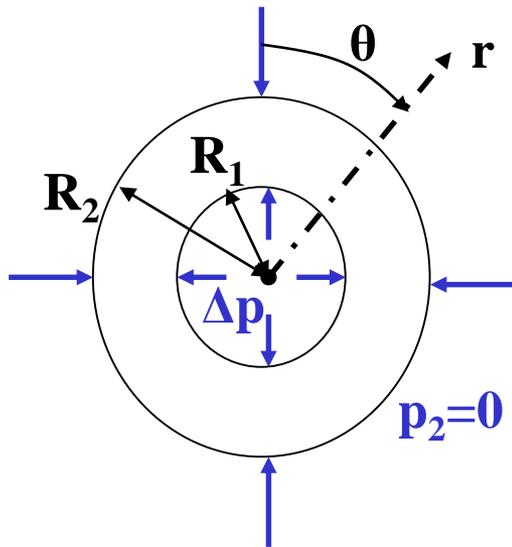
$$\sigma_z = 2 \nu p_2$$

$$-u = \frac{p_2 r}{2(\lambda + G)} + \frac{(p_2 - p_1)R_1^2}{2Gr}$$

1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

MODELE DU CYLINDRE CREUX ELASTIQUE

Variation de pression Δp appliquée dans un cylindre creux ($p_2 = 0$)



On constate que le cas du milieu infini est une bonne approximation si $R_2/R_1 > 4$

MODELE DU CYLINDRE CREUX ELASTIQUE

Variation de pression Δp appliquée dans un forage (milieu infini)

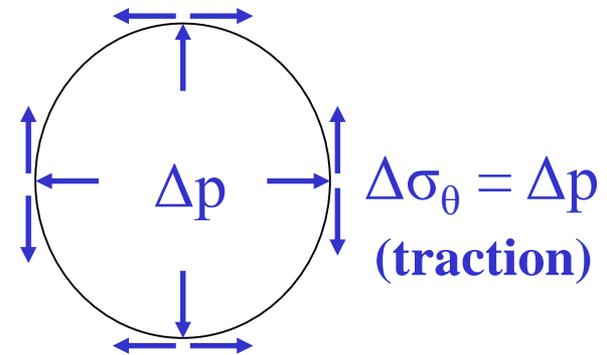
$$\Delta\sigma_r = +\Delta p \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\Delta\sigma_\theta = -\Delta p \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\Delta\sigma_z = 0$$

$$u = \Delta p \frac{R_1^2}{2Gr}$$

<p>en $r = R_1$</p> <p>$\Delta\sigma_r = +\Delta p$</p> <p>$\Delta\sigma_\theta = -\Delta p$</p> <p>$\Delta\sigma_z = 0$</p> <p>$u = \Delta p \frac{R_1}{2G}$</p>



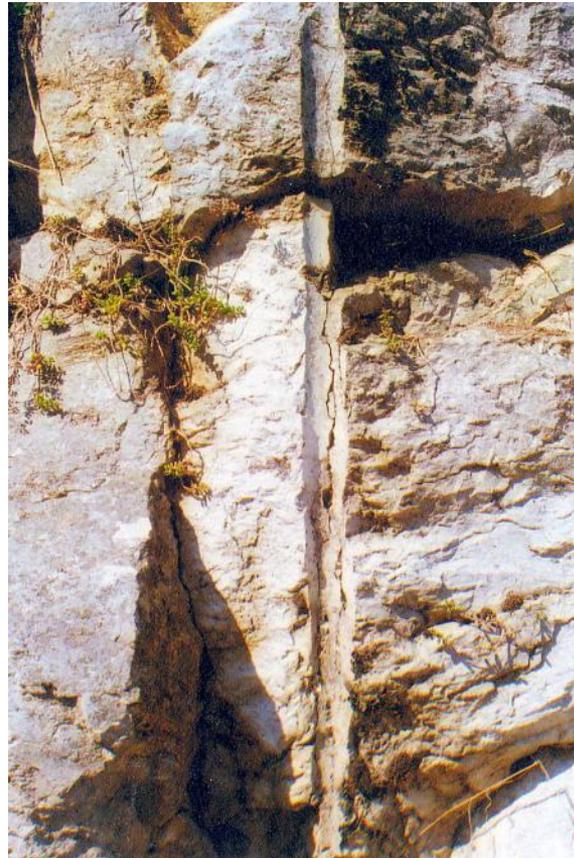
Applications :

- Dilatomètre / pressiomètre (mesure du module G)
- Fracturation par minage (due à la pression des gaz)
- Fracturation hydraulique (mesure des contraintes, exploitation pétrolière, géothermie)
- Creusement d'une galerie ou d'un forage

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

Effet d'une pression appliquée dans un forage : exemple d'un tir de mine

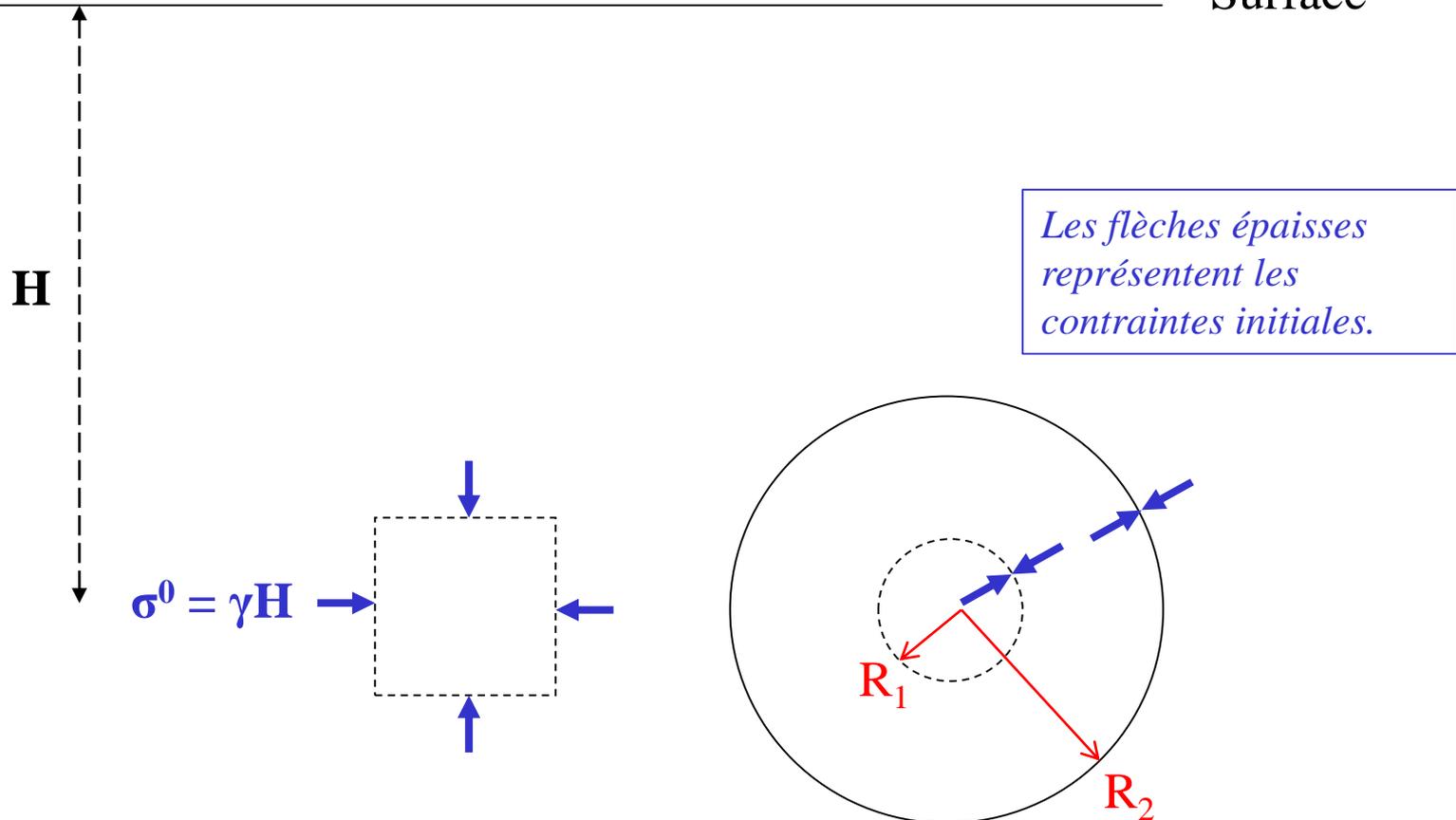
Fractures radiales due à un excès de contrainte orthoradiale de traction



1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE)

Surface



Lors du creusement, σ_r est annulée en R_1 , mais n'est pas modifiée en R_2

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE)

- La variation de pression à la paroi est négative ($\Delta p = -\sigma_0$)
- Si la profondeur est suffisante, elle est constante sur la circonférence

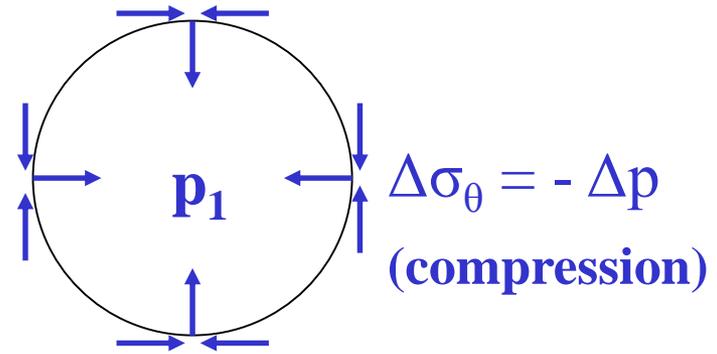
en $r = R_1$

$$\Delta\sigma_r = +\Delta p = -\sigma^0$$

$$\Delta\sigma_\theta = -\Delta p = +\sigma^0$$

$$\Delta\sigma_z = 0$$

$$u = \Delta p \frac{R_1}{2G} = -\sigma^0 R_1 / 2G$$



contrainte initiale (σ_0) + variation de contrainte = **contrainte finale**

$$\sigma_r = \sigma^0$$

$$\Delta\sigma_r = -\sigma^0$$

$$\sigma_r = 0$$

$$\sigma_\theta = \sigma^0$$

$$\Delta\sigma_\theta = +\sigma^0$$

$$\sigma_\theta = 2\sigma^0$$

$$\sigma_z = \sigma^0$$

$$\Delta\sigma_z = 0$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0$$

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE)

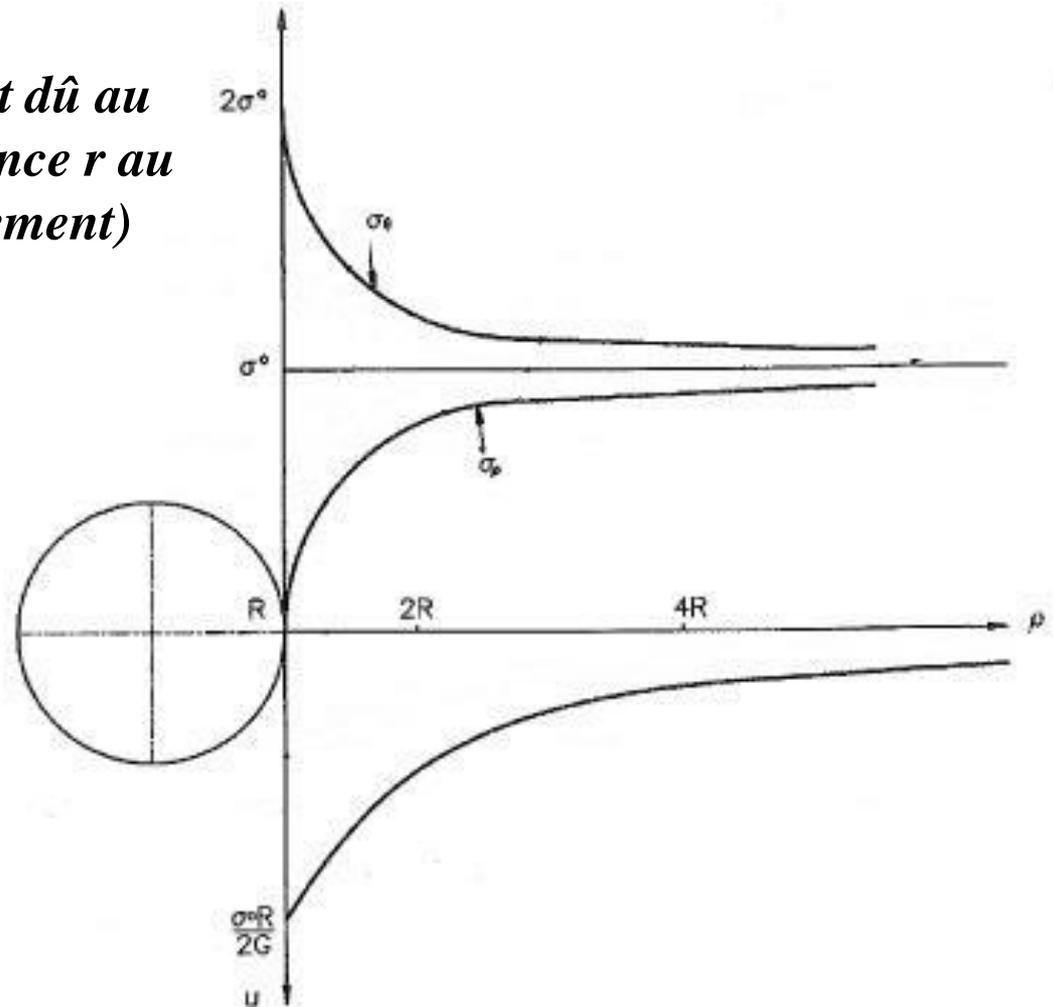
Contraintes finales et déplacement dû au creusement, en fonction de la distance r au centre de la galerie (sans soutènement)

$$\sigma_r = \sigma^0 - \sigma^0 \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \sigma^0 + \sigma^0 \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0$$

$$u = -\sigma^0 \frac{R_1^2}{2Gr}$$

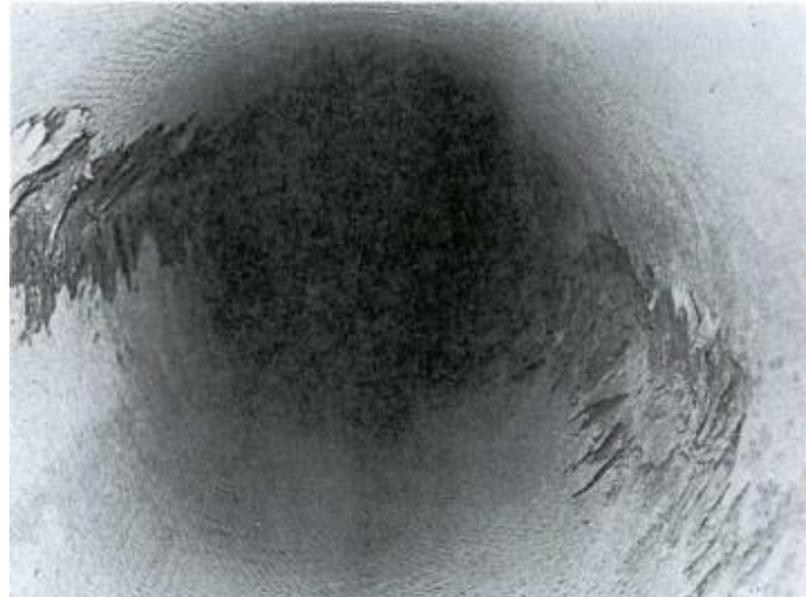


1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE)

Condition de rupture

$$2\sigma^0 > \sigma_c$$



Remarque : si l'état de contrainte est isotrope seulement dans le plan perpendiculaire à la galerie, la condition de rupture est :

$$\max (2\sigma^0, \sigma_z^0) > \sigma_c$$

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE)

Pression nécessaire pour éviter la rupture

Cas d'un critère de Mohr-Coulomb

$$\sigma_1 = \sigma_c + K_p \sigma_3$$

$$\text{avec } \sigma_c = 2c \cos\varphi / (1 - \sin\varphi)$$

$$\text{et } K_p = (1 + \sin\varphi) / (1 - \sin\varphi)$$

$$p_e = \sigma^0 (1 - \sin\varphi) - c \cos\varphi$$

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE)

Contraintes et déplacement en fonction de la distance r au centre de la galerie (avec une pression de soutènement p)

$$\sigma_r = \sigma^0 - (\sigma^0 - p) \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \sigma^0 + (\sigma^0 - p) \frac{R_1^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0$$

$$u = - (\sigma^0 - p) \frac{R_1^2}{2Gr}$$



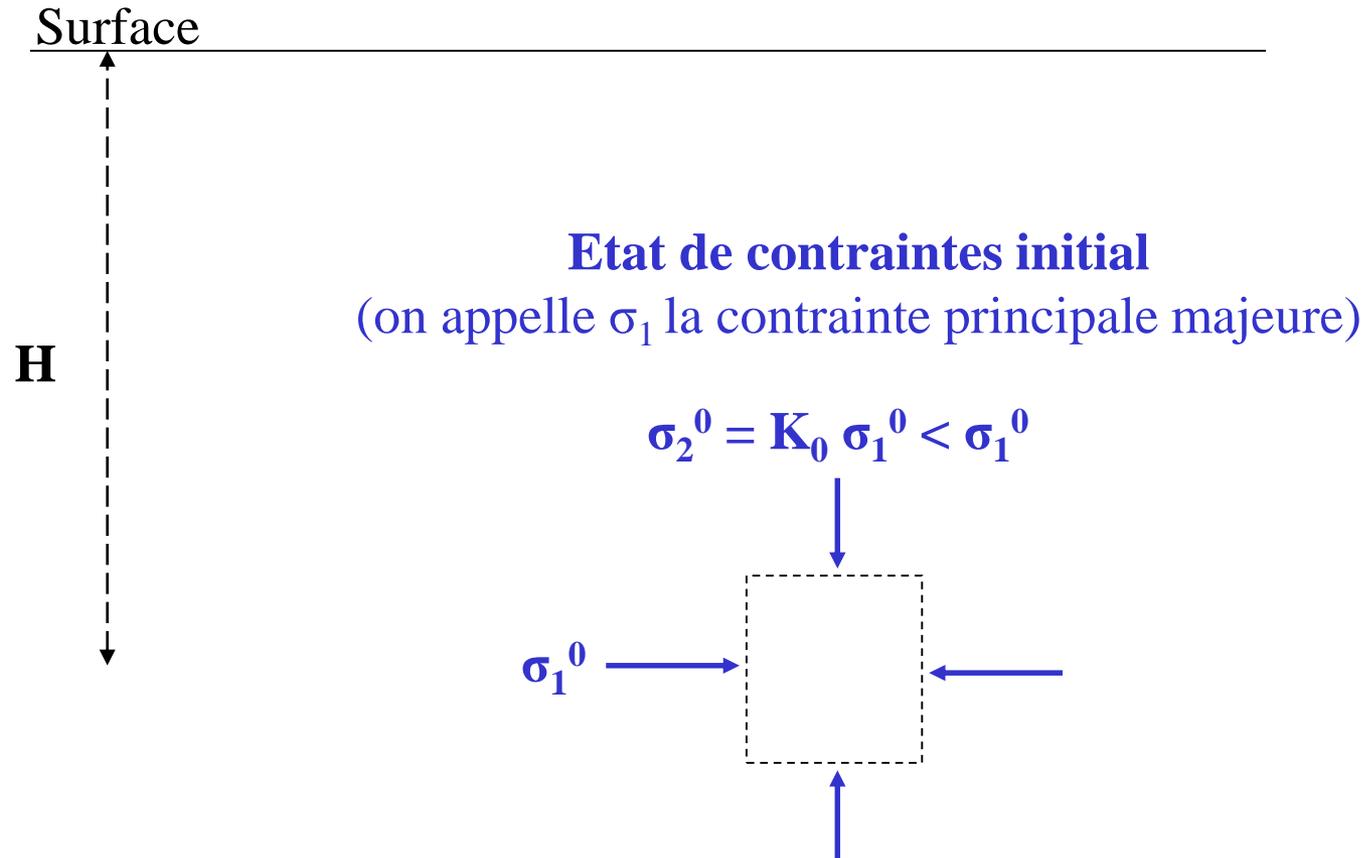
A la paroi ($r = R_1$) : $|\mathbf{u}| = (\sigma^0 - p) \frac{R_1}{2G} = \mathbf{u}_R$

(courbe caractéristique du massif)

*Convergence métrique dans la descenderie de Saint-Martin-La-Porte
(d'après Tran Manh et al., 2014)*

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ANISOTROPE)



1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ANISOTROPE)

Contraintes et déplacements en fonction de la distance r au centre de la galerie (sans soutènement)

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1^0}{2} \left[(1+K_0) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - (1-K_0) \left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1^0}{2} \left[(1+K_0) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + (1-K_0) \left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \right]$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_1^0}{2} \left[(1-K_0) \left(1 + 2\frac{R^2}{r^2} - 3\frac{R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta \right]$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 + 2\nu\sigma_1^0 (1-K_0) \frac{R^2}{r^2} \cos 2\theta$$

$$-u = \frac{\sigma_1^0}{4G} \left\{ (1+K_0) \frac{R^2}{r} + (1-K_0) \left[\frac{R^4}{r^3} - 4(1-\nu) \frac{R^2}{r} \right] \cos 2\theta \right\}$$

$$-v = \frac{\sigma_1^0}{4G} (1-K_0) \left[\frac{R^4}{r^3} - 2(1-2\nu) \frac{R^2}{r} \right] \sin 2\theta$$

$\theta = 0$ correspond à la direction orthogonale à σ_1^0 .

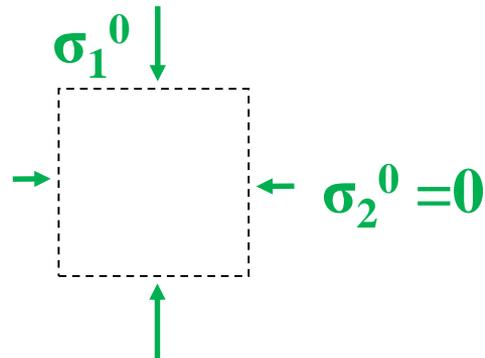
1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ANISOTROPE UNIAXIAL)

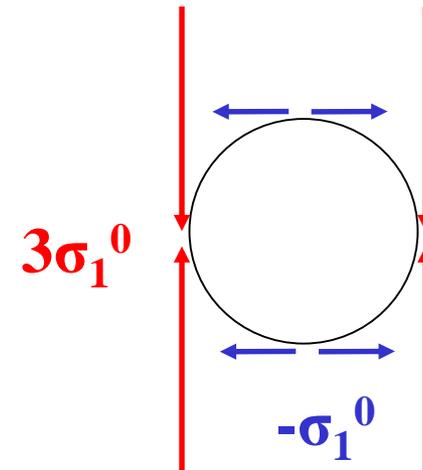
Surface

H

Cas particulier :
état de contraintes
initial uniaxial

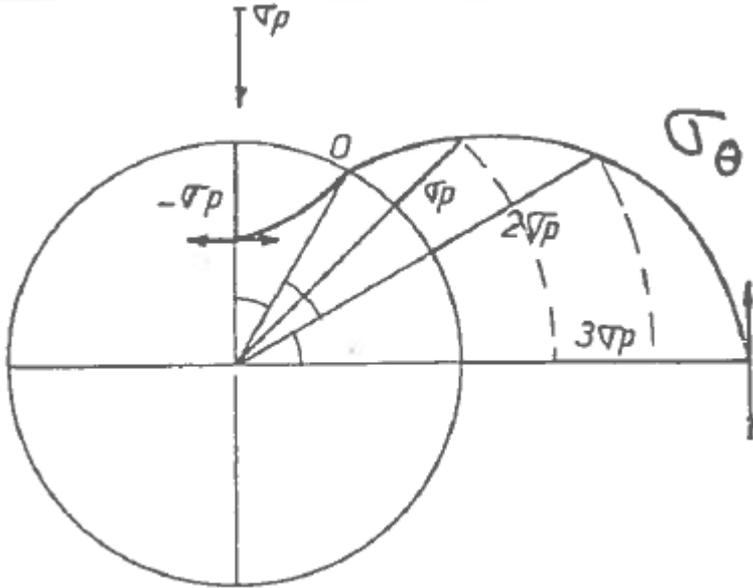


Contraintes à la
paroi après
creusement

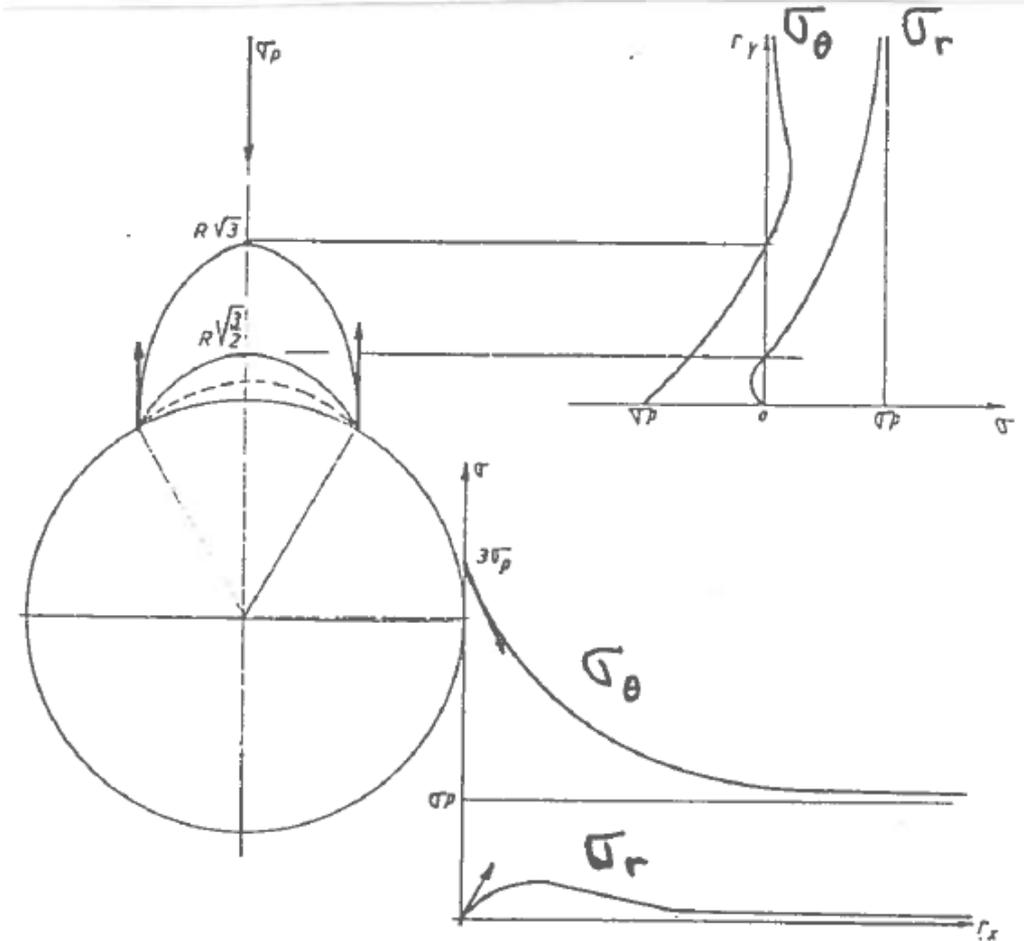


1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ANISOTROPE UNIAXIAL)



(Duffaut, 1981)



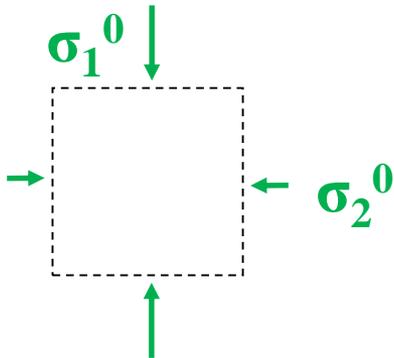
1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

CREUSEMENT D'UNE CAVITE CYLINDRIQUE DE REVOLUTION (ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ANISOTROPE)

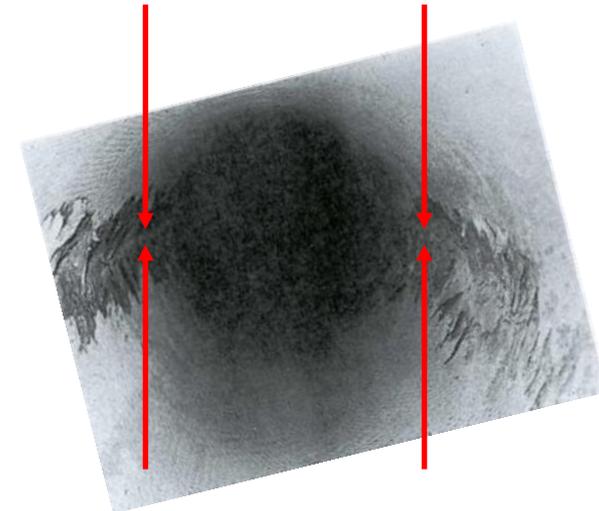
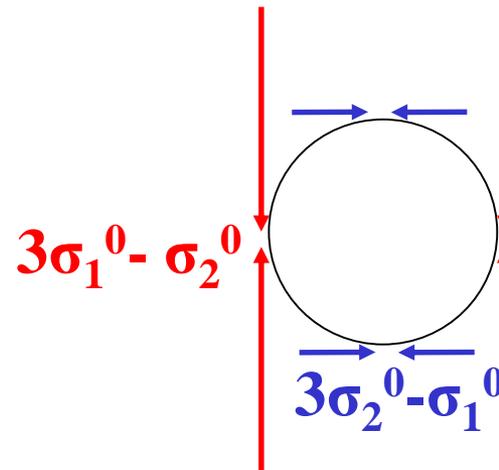
Surface

H

Cas général



Contraintes à la paroi après creusement



1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

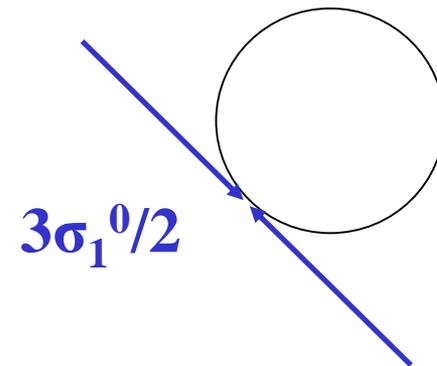
CAVITES SPHERIQUES

Surface

H

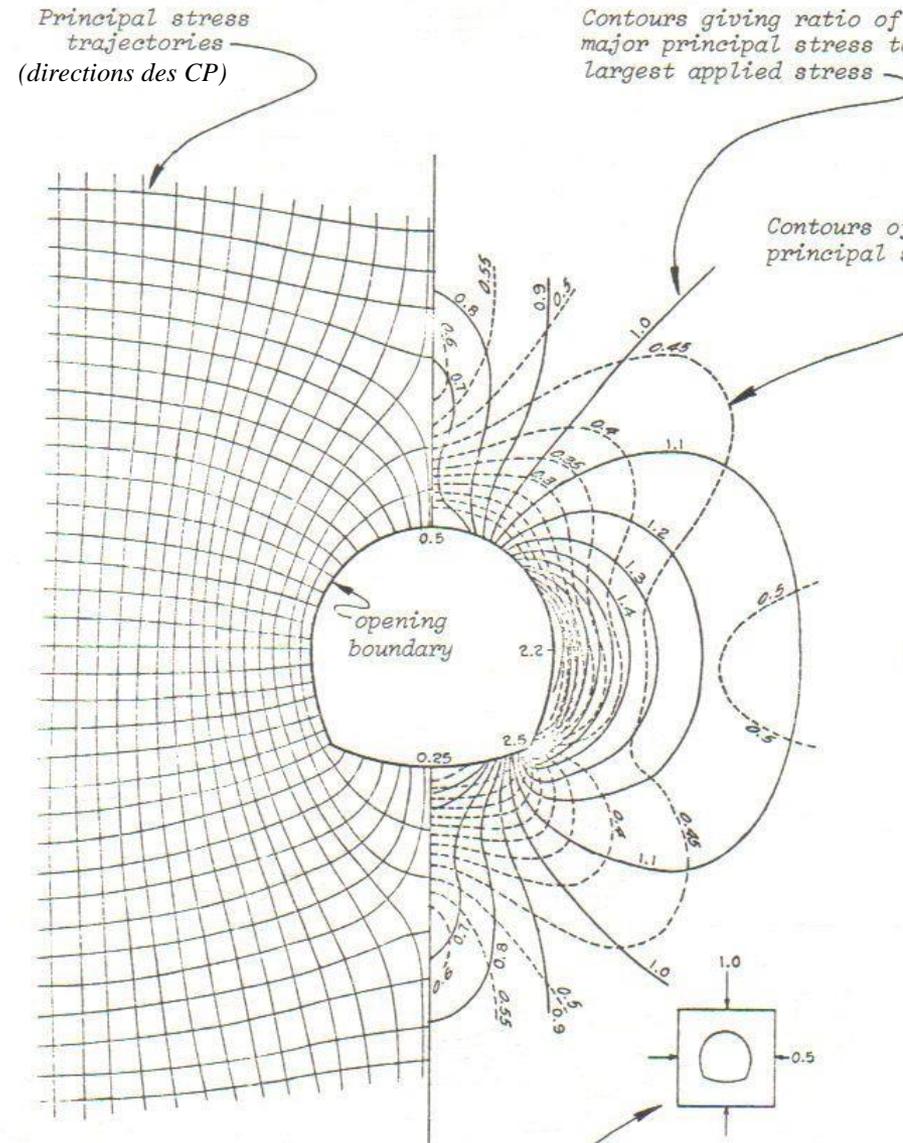
Cas particulier :
état de contraintes
initial isotrope

Contraintes à la
paroi après
creusement



CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES

AUTRES CAVITES : SIMULATION NUMERIQUE



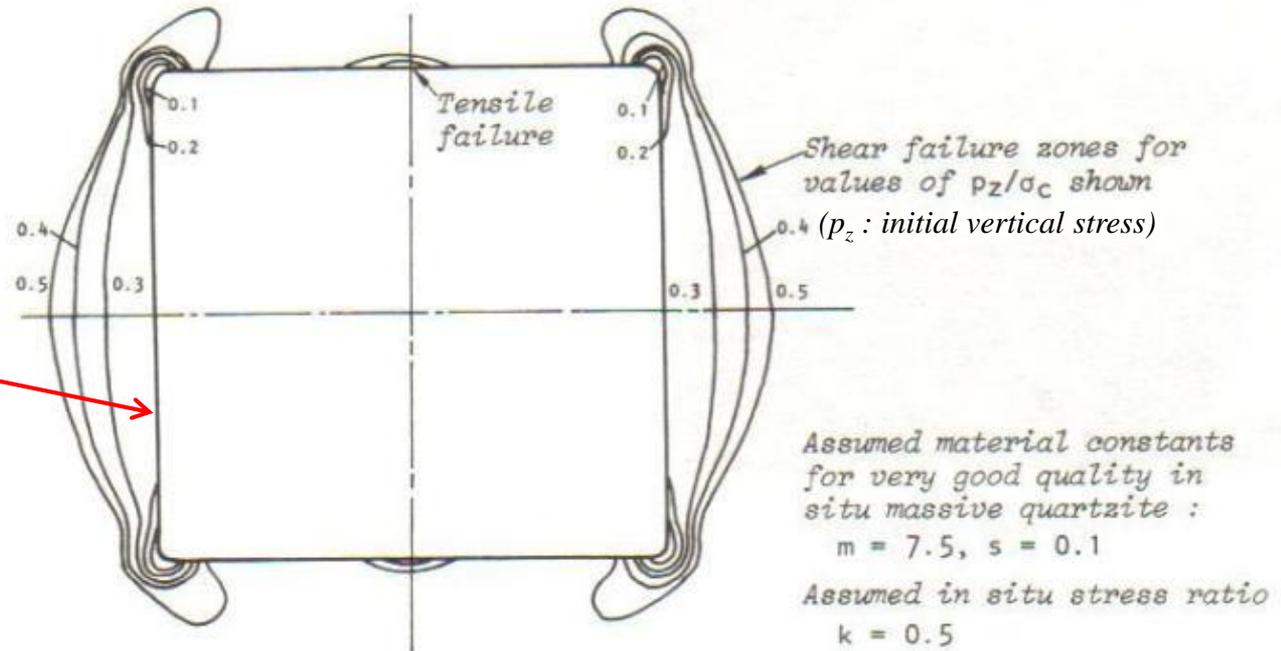
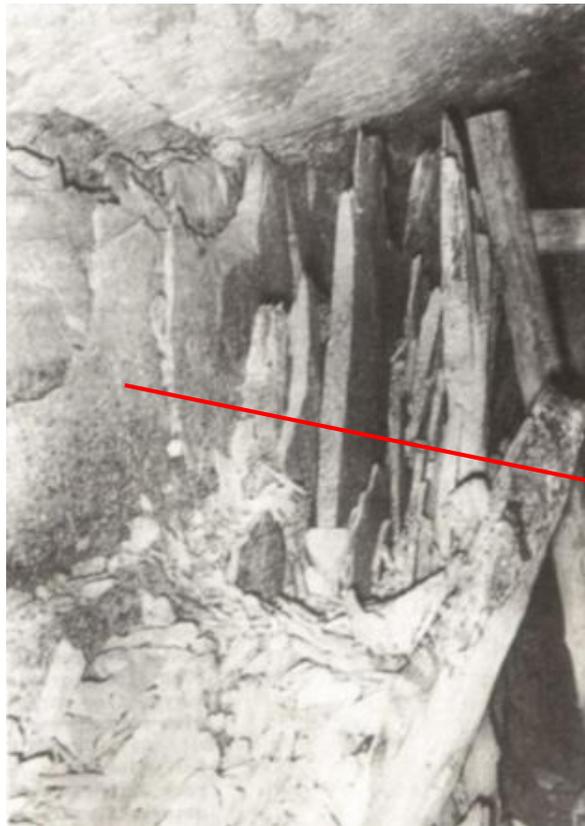
(Hoek et Brown, 1980)

Chargement "à l'infini"
Key sketch giving details of applied stresses. Note that the largest applied stress is always given a value of 1.0.

1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES AUTRES CAVITES : SIMULATION NUMERIQUE

Identification des zones de rupture – Cas d'une rupture fragile

Severe sidewall spalling in quartzite in a deep level gold mine in South Africa (Hoek and Brown, 1980)



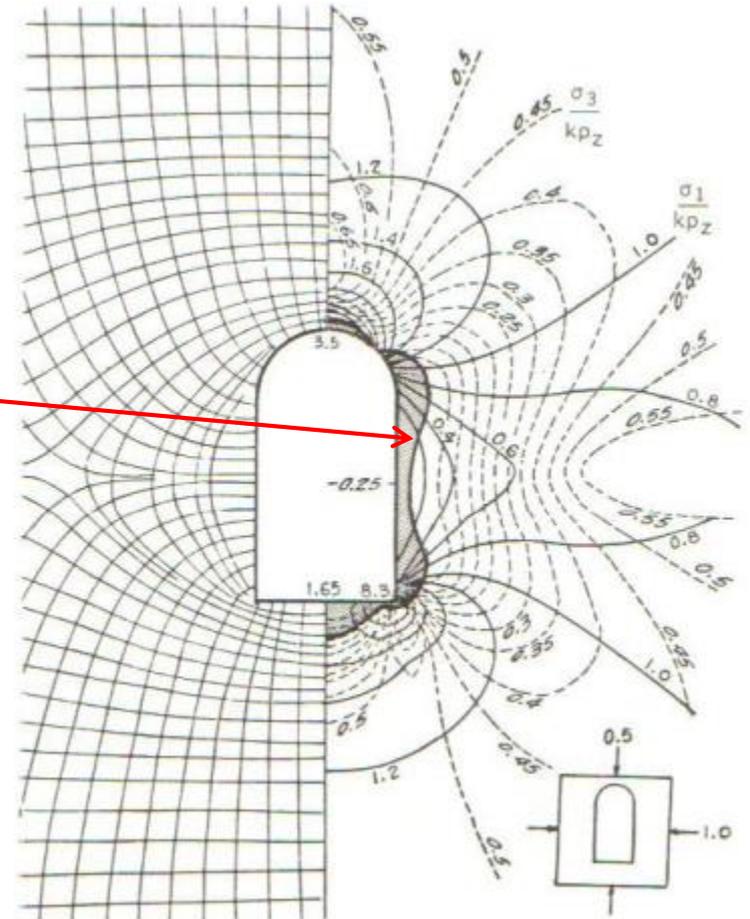
1.1. CONTRAINTES ET DEFORMATIONS ELASTIQUES AUTOUR DES CAVITES AUTRES CAVITES : SIMULATION NUMERIQUE

Identification des zones de rupture – Cas d'une rupture fragile

Exemple d'une caverne pour une usine hydroélectrique à 300 m de profondeur dans du gneiss de résistance

$\sigma_{ci} = 150 \text{ Mpa}$ avec $m = 2,5$ et $s = 0,004$

Zone de rupture en gris



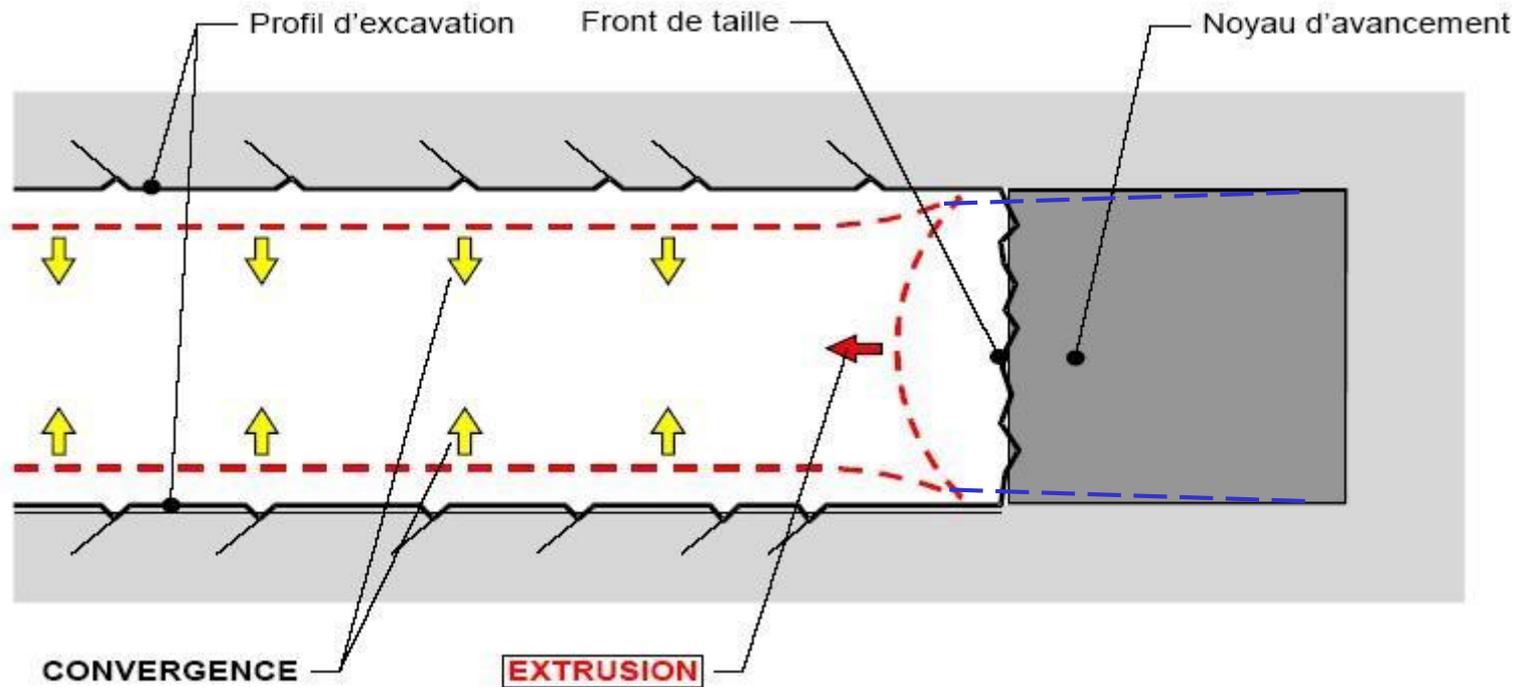
(Hoek and Brown, 1980)

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Evolution de la convergence lors du déconfinement

Cas élastique

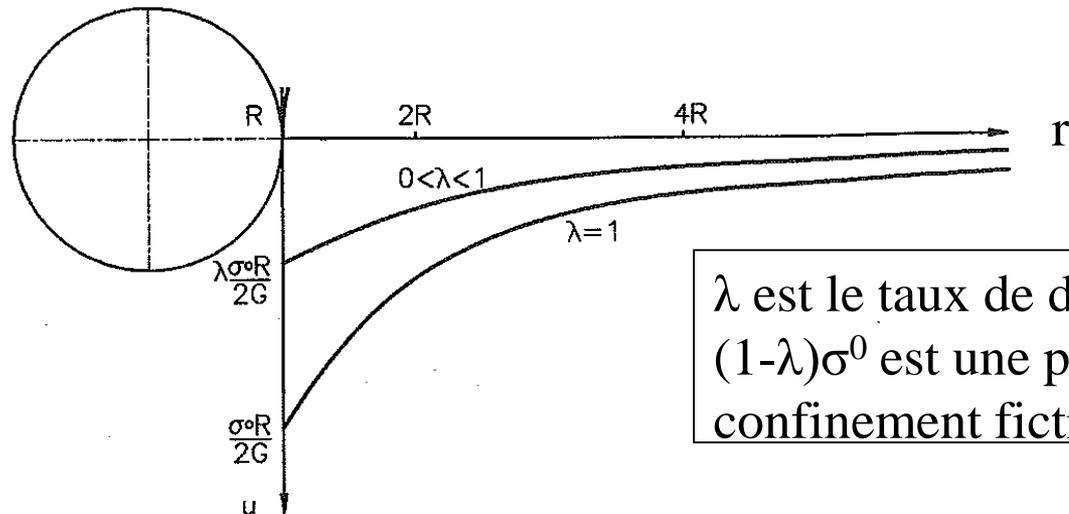


1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Evolution de la convergence lors du déconfinement (d'après Panet, 1995)

Cas élastique



λ est le taux de déconfinement
 $(1-\lambda)\sigma^0$ est une pression de
confinement fictive

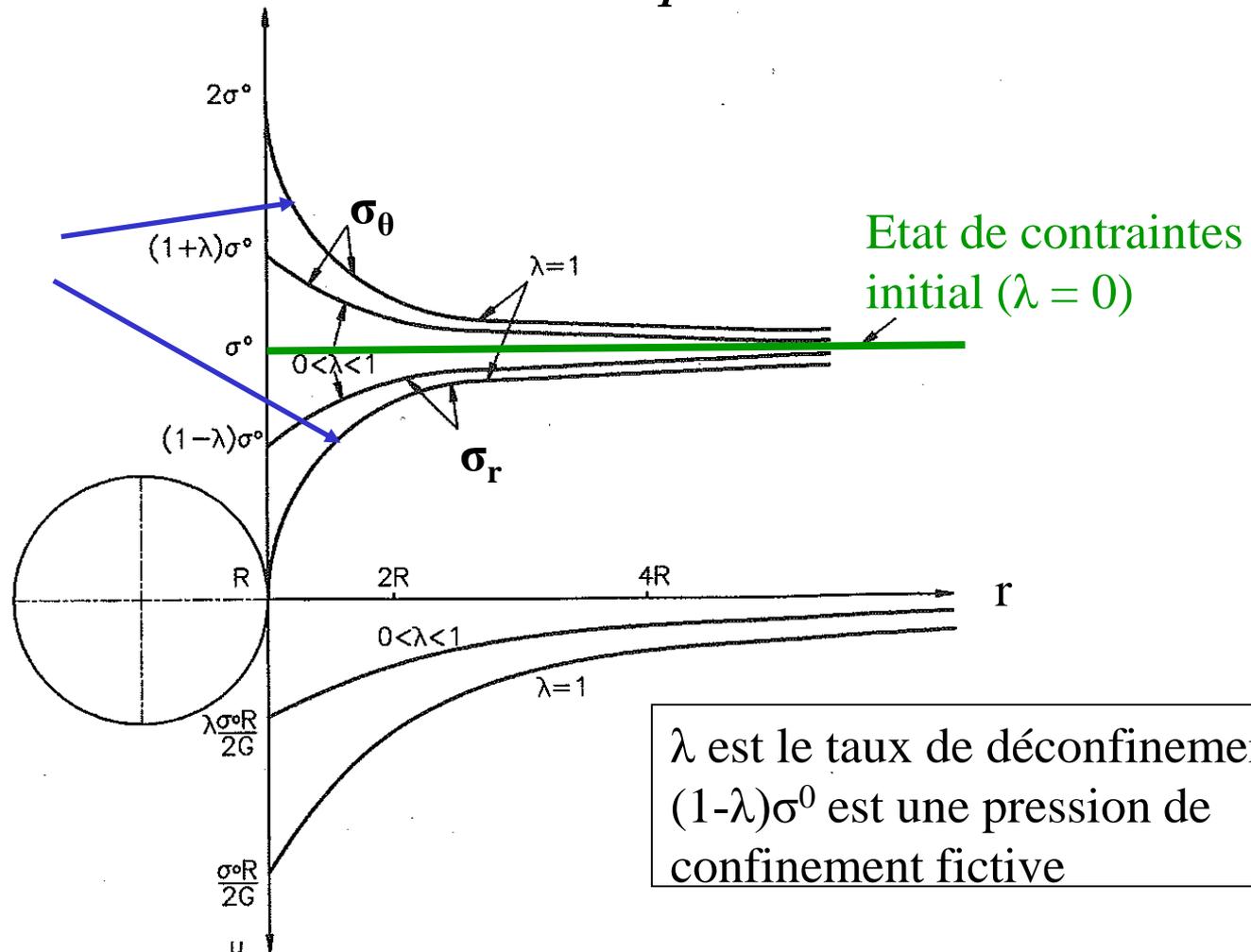
1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Evolution de la convergence lors du déconfinement (d'après Panet, 1995)

Cas élastique

Etat de
contraintes
final ($\lambda = 1$)

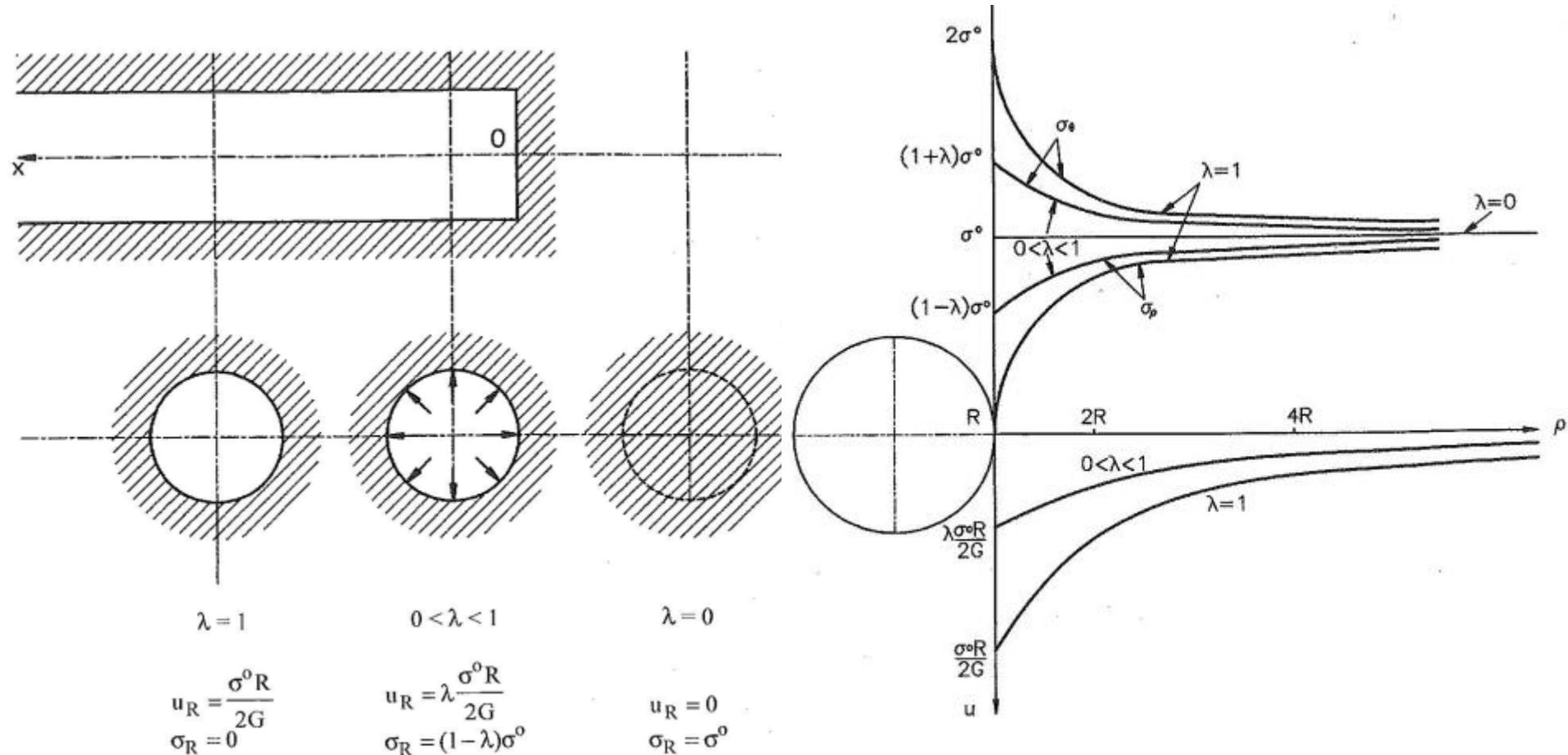


1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Evolution des contraintes lors du déconfinement (d'après Panet, 1995)

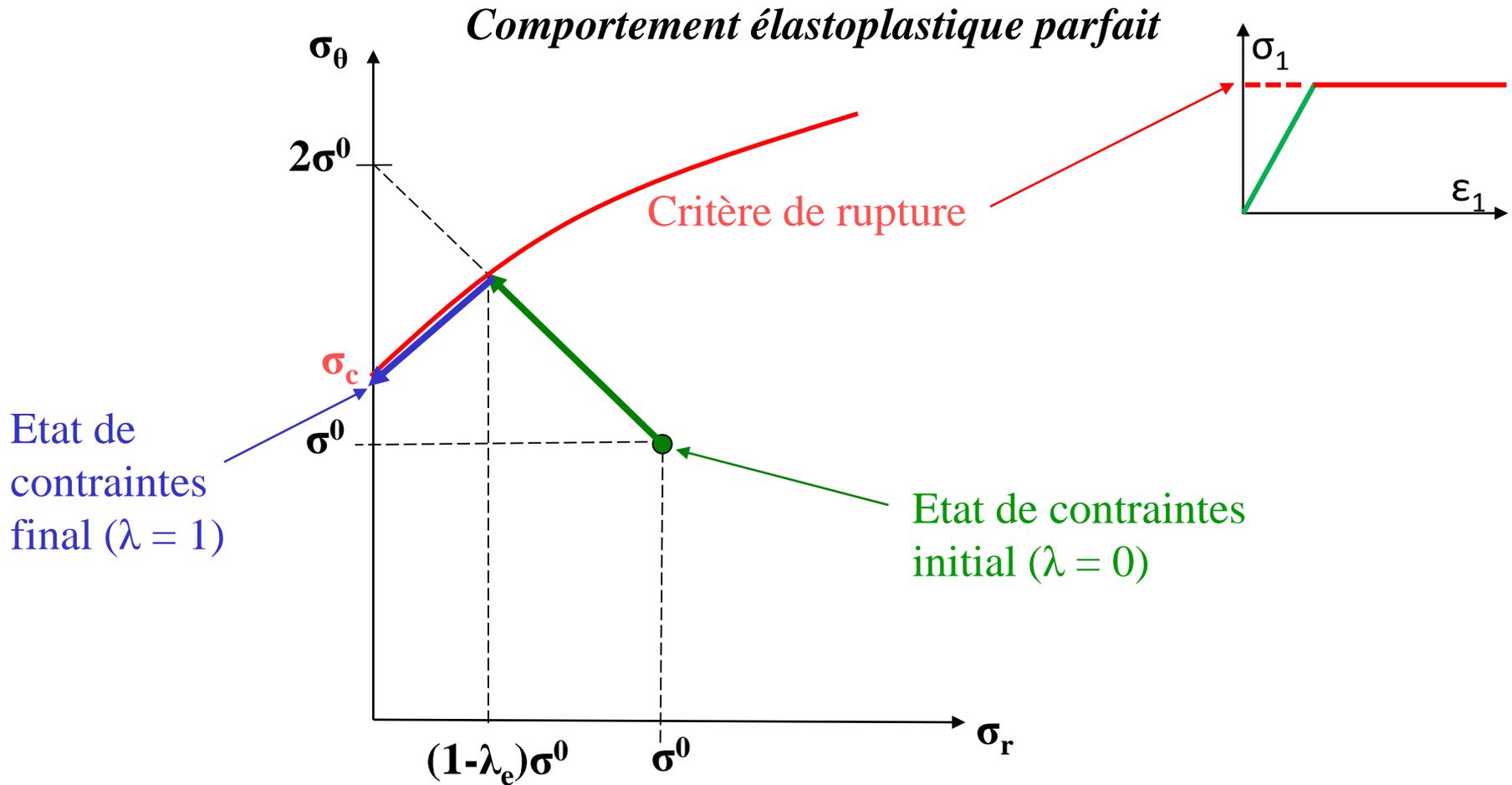
Cas élastique



1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

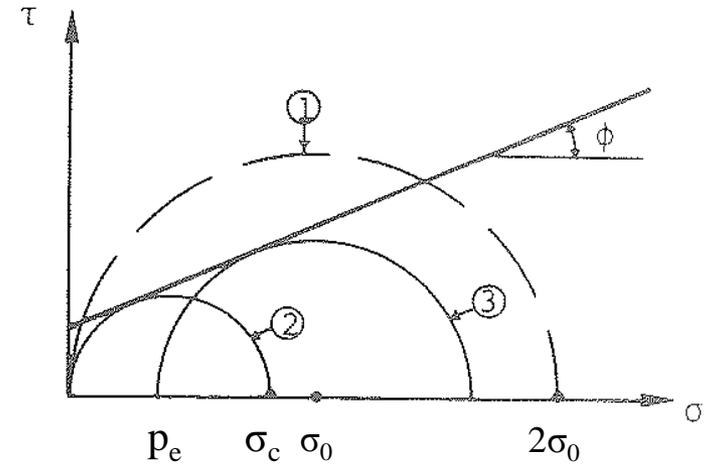
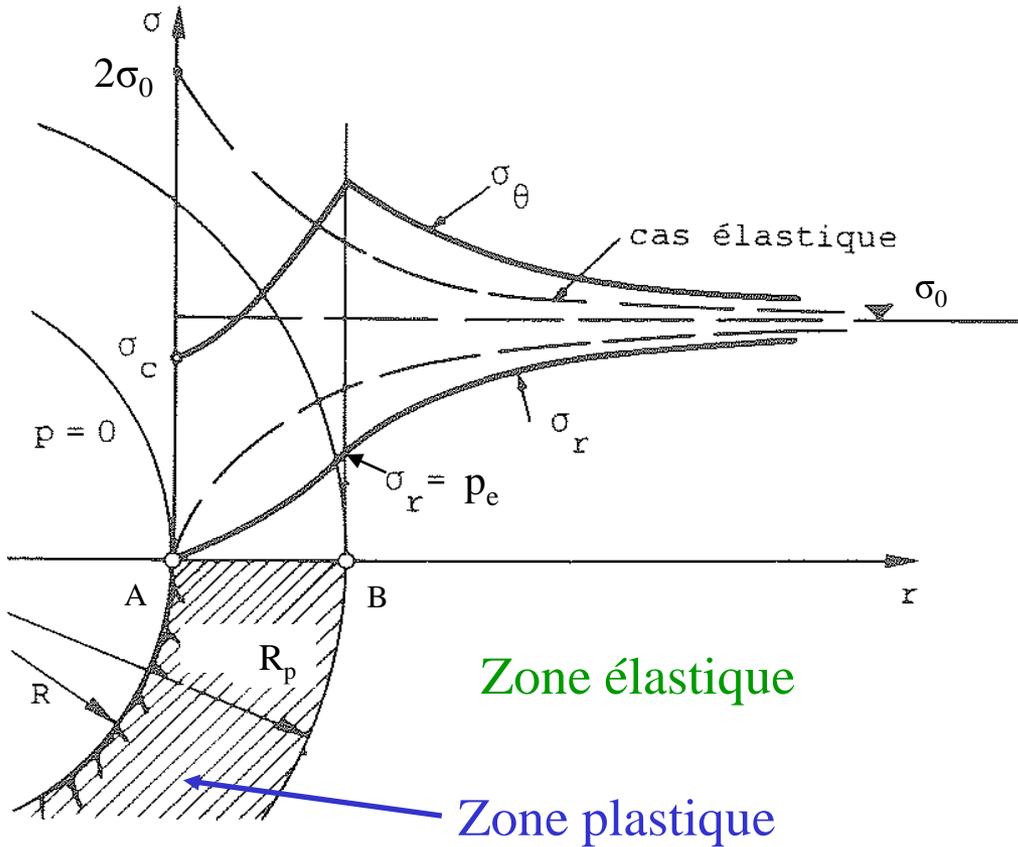
Evolution de l'état de contraintes en un point de la paroi lors du déconfinement



1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

*Etat de contraintes final - Comportement élastoplastique parfait
(d'après Descoedres, 1989)*



- 1 Etat de contr. en A (élastique)
- 2 Etat de contr. en A (él.-plast)
- 3 Etat de contr. en B (él.-plast)

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

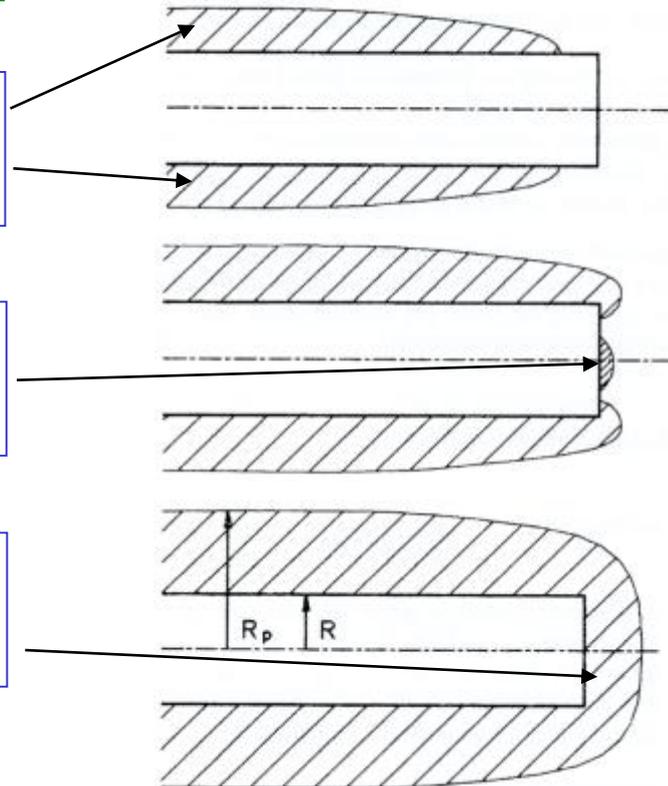
Développement de la zone en rupture
(approche empirique d'après Panet, 1995)

$$N = \frac{2\sigma^0}{\sigma_c} < 1 \quad \text{Comportement élastique}$$

$$1 < N = \frac{2\sigma^0}{\sigma_c} < 2 \quad \text{Zone plastique derrière le front}$$

$$2 < N = \frac{2\sigma^0}{\sigma_c} < 5 \quad \text{Front partiellement plastifié}$$

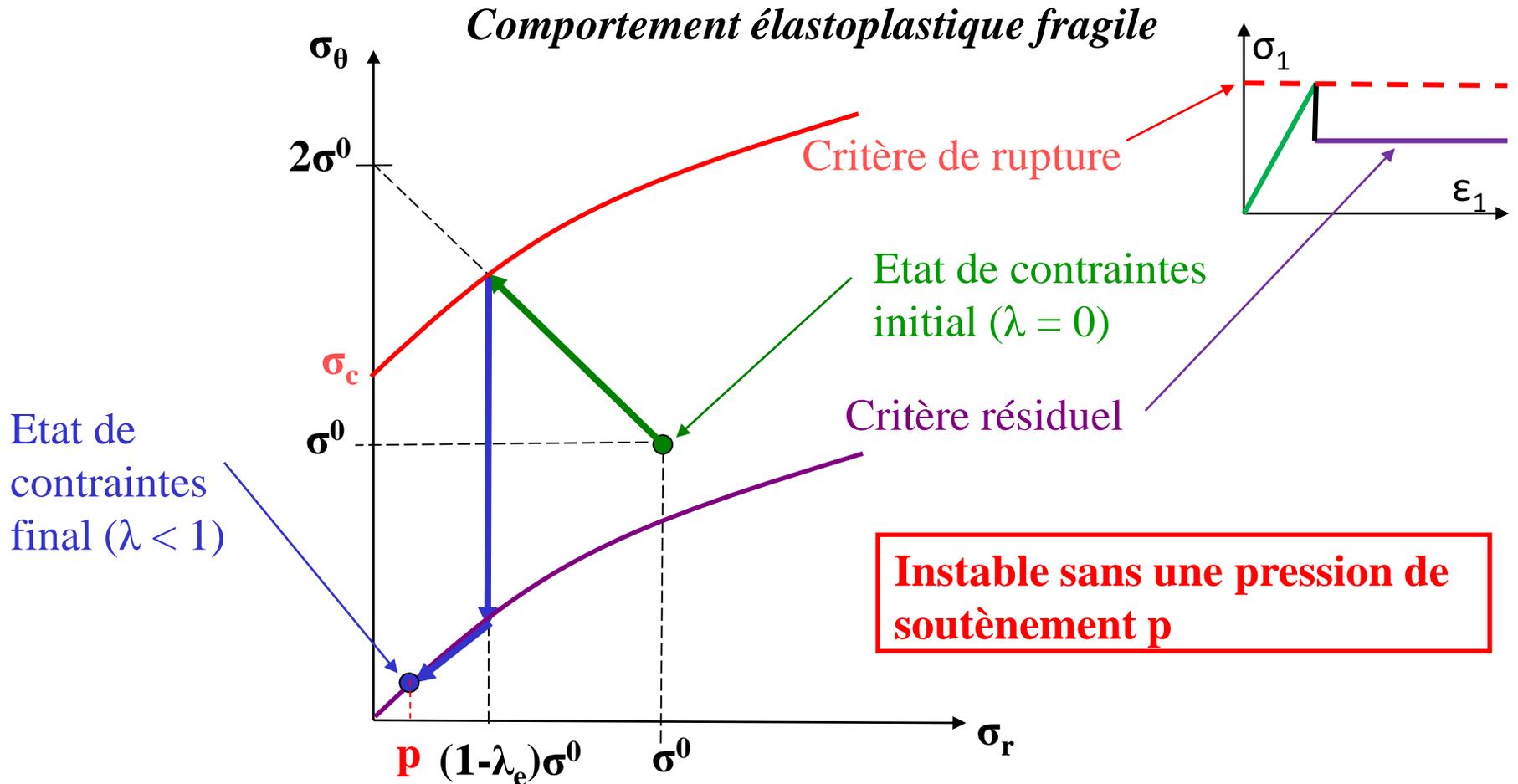
$$5 < N = \frac{2\sigma^0}{\sigma_c} \quad \text{Zone plastique importante en avant du front}$$



1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

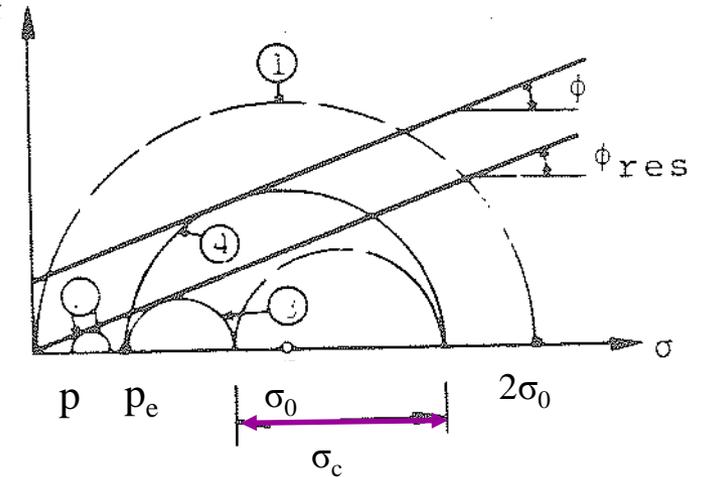
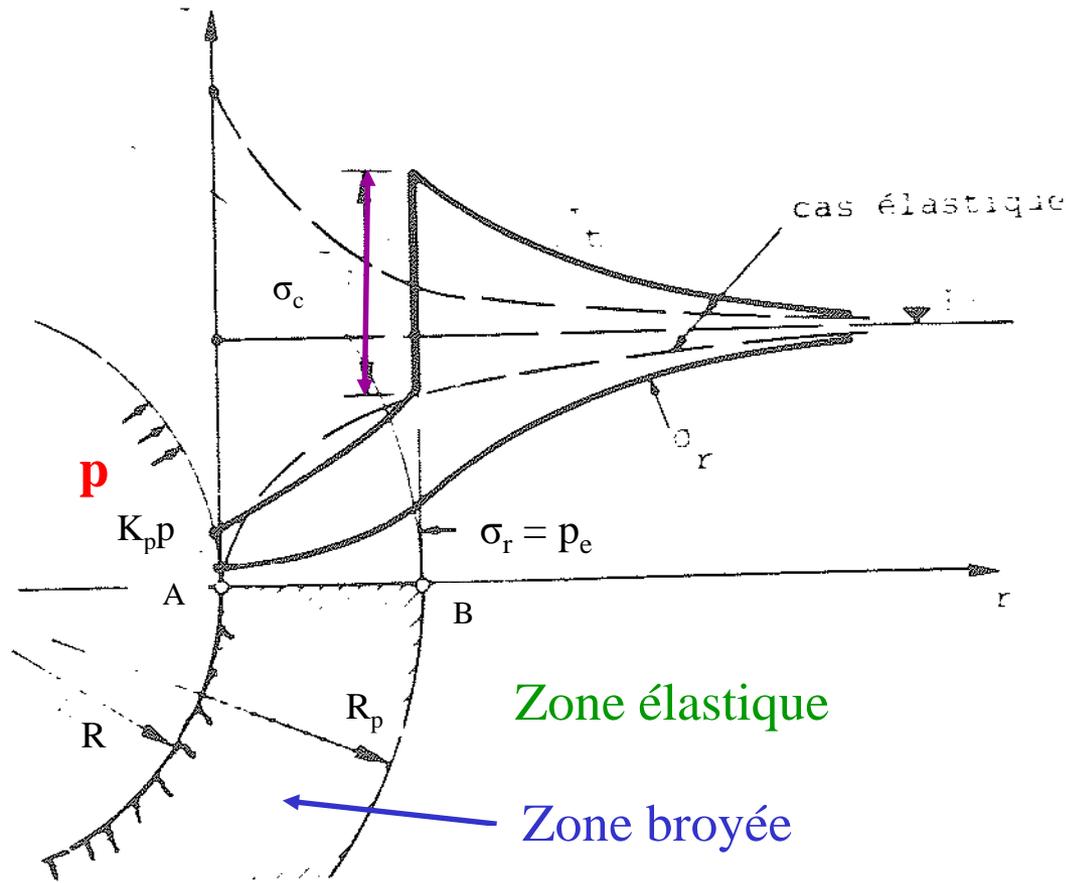
Evolution de l'état de contraintes en un point de la paroi lors du déconfinement



1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

*Etat de contraintes final - Comportement élastoplastique fragile
critère de Mohr-Coulomb (d'après Descoedres, 1989)*



- ① Etat de contr. en A (élastique)
 - ② Etat de contr. en A (él.-fragile)
 - ③ Etat de contr. en B
 - ④ Etat de contr. en B
- } (él.-fragile)

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Calcul des contraintes dans la zone plastique

Equations d'équilibre : $\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 ; \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} = 0 ; \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = 0$

Critère de rupture de Mohr-Coulomb : $\sigma_\theta = \sigma_c + K_p \sigma_r$
avec $K_p = (1 + \sin\phi) / (1 - \sin\phi) = \tan^2(\pi/4 + \phi/2) = \sigma_c / \sigma_t$
et $\sigma_c = 2 c \tan(\pi/4 + \phi/2) = 2 c \cos\phi / (1 - \sin\phi)$

Condition limite : $\sigma_r(\mathbf{R}) = p = \sigma_0 (1 - \lambda)$

$$\begin{aligned}\sigma_r &= (r/\mathbf{R})^{K_p-1} [\sigma^0 (1 - \lambda) + \sigma_c / (K_p - 1)] - \sigma_c / (K_p - 1) \\ \sigma_\theta &= (r/\mathbf{R})^{K_p-1} [\sigma^0 (1 - \lambda) + \sigma_c / (K_p - 1)] K_p - \sigma_c / (K_p - 1) \\ \sigma_z &= \min (\sigma_\theta, \sigma_z^0)\end{aligned}$$

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Rayon de la zone plastique

Le rayon de la zone plastique, R_p , est la valeur de r pour laquelle σ_r est égale à la pression nécessaire à la limite de la zone élastique :

$$p_e = \sigma^0(1-\lambda_e)$$

$$(R_p/R)^{K_p-1} = [\sigma_{c+} \sigma^0 (1-\lambda_e) (K_p-1)] / [\sigma_{c+} \sigma^0 (1-\lambda) (K_p-1)] = 2\lambda_e / [(K_p+1) \lambda_e - (K_p-1) \lambda]$$

Si σ_c est nulle,

$$(R_p/R)^{K_p-1} = (1-\lambda_e) / (1-\lambda)$$

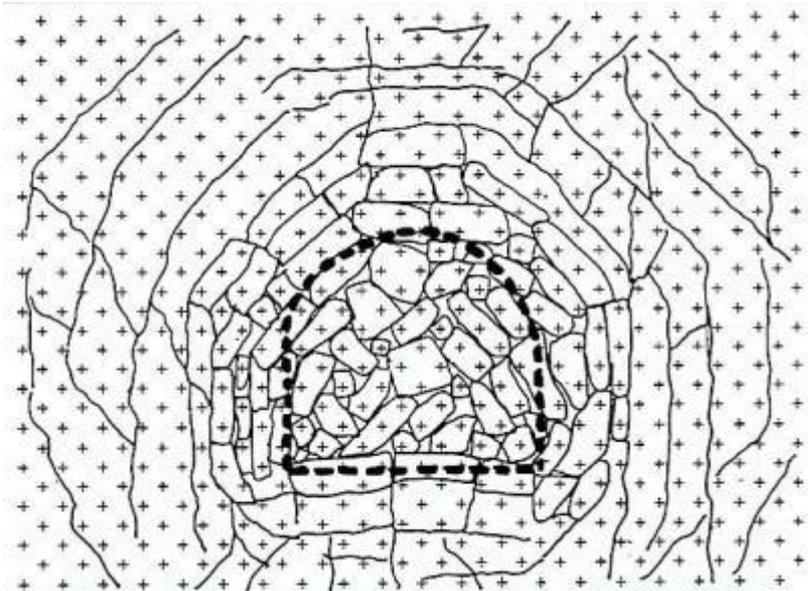
Si le déconfinement est total ($\lambda \rightarrow 1$), le rayon plastique tend vers l'infini.

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Rayon de la zone plastique

En pratique, cela signifie que le tunnel ne peut être stable sans soutènement



(extrait de Fine, le soutènement des galeries minières,
Armines, 1993)

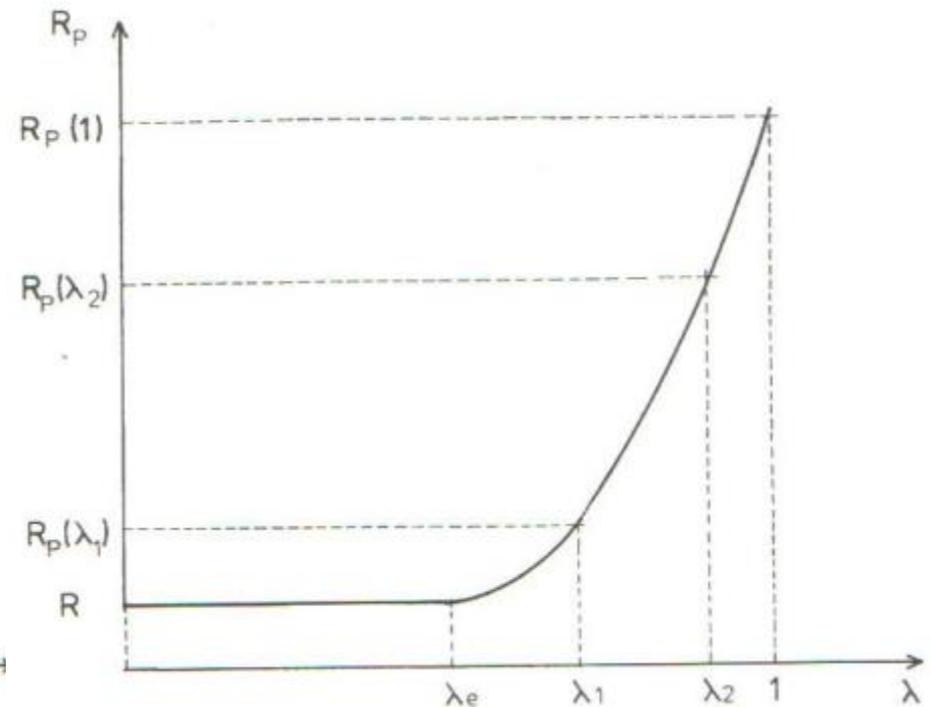
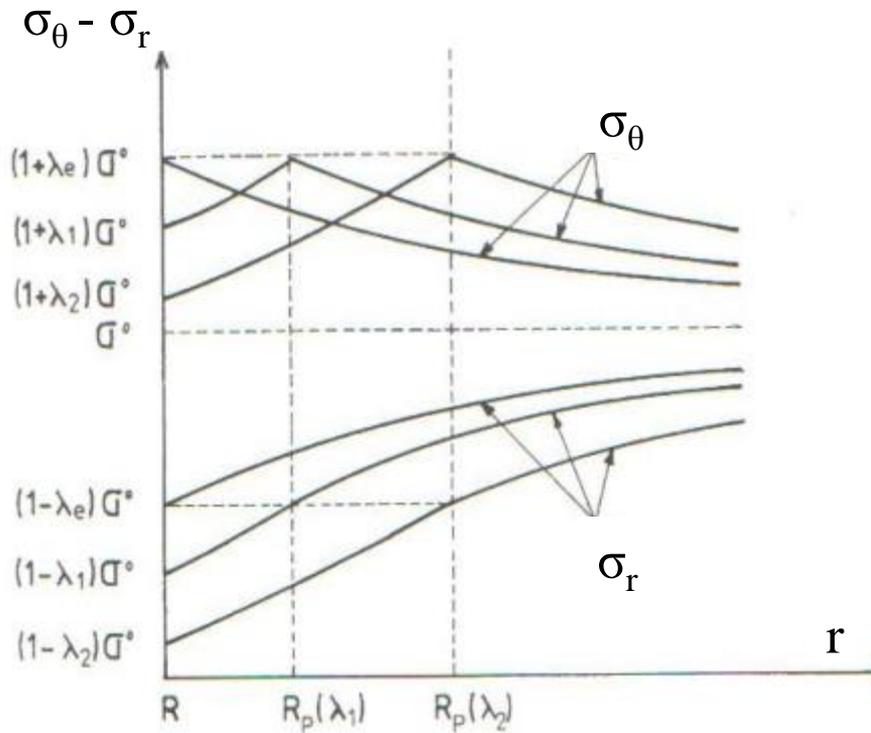


(photo Mount Isa Mines)

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Distribution des contraintes et variation du rayon plastique lors du déconfinement avec un critère de Tresca et $N = 0,5$ (d'après Panet, 1995)



1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Calcul simplifié des déplacements dans la zone plastique

En déformations planes ($\varepsilon_2=0$) les déformations plastiques satisfont la relation : $\mathbf{K}\varepsilon_{1p} + \varepsilon_{3p} = \mathbf{0}$

avec $\mathbf{K} = (1+\sin\psi) / (1-\sin\psi)$

ψ étant l'angle de dilatance

Si $\mathbf{K}=1$, la déformation se fait à volume constant (sans dilatance)

$$\varepsilon_{3p} = \frac{du}{dr} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{1p} = \frac{u}{r}$$

Condition limite en $r = R_p$:

$$u_{R_p} = \frac{(\sigma^0 - p_e)R_p}{2G} = \frac{\lambda_e \sigma^0 R_p}{2G}$$

1.2. CAVITES DANS UN MILIEU ELASTOPLASTIQUE

1.2.1 GALERIE CIRCULAIRE AVEC ETAT DE CONTRAINTES INITIAL ISOTROPE

Calcul simplifié des déplacements dans la zone plastique

En négligeant les déformations élastiques de la zone plastique devant les déformations plastiques, on obtient :

$$|\mathbf{u}| = \lambda_e \sigma^0 R_p^{K+1} / 2 G r^K$$

Remarque : R_p dépend du taux de déconfinement λ

A la paroi ($r = R$) :

$$u_R = \lambda_e \left(\frac{R_p}{R} \right)^{K+1} \frac{\sigma^0 R}{2G} = \frac{1}{\xi} u_{Re}$$

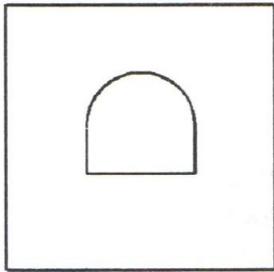
Le calcul exact des déplacements est donné par Panet (1995)

1.3. CONCLUSION

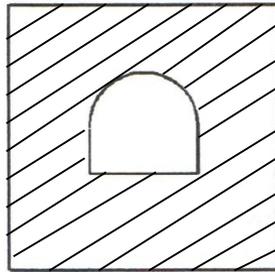
Modélisation géométrique

Le choix du modèle dépend de la fracturation du massif et de la taille de la zone d'intérêt.

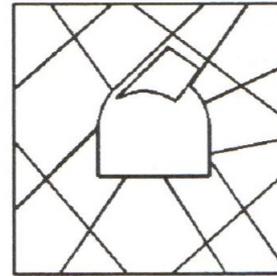
Cas d'un tunnel



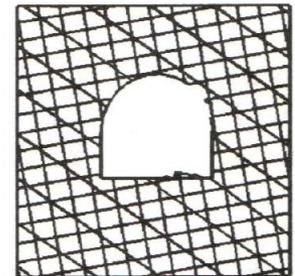
Milieu continu
(roche massive)



Milieu stratifié
(1 famille de joints)



Milieu fracturé
(2 ou 3 familles de joints, faible densité)



Milieu continu équivalent
(forte densité de fracturation)



Carrière de gypse



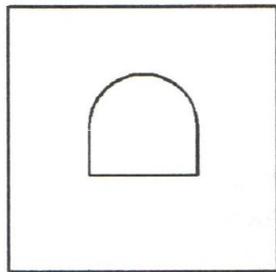
Carrière de gypse



1.3. CONCLUSION

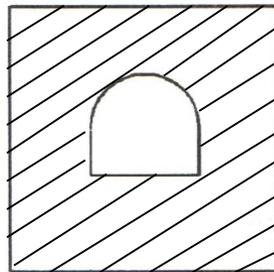
Modélisation mécanique

Propriétés mécaniques



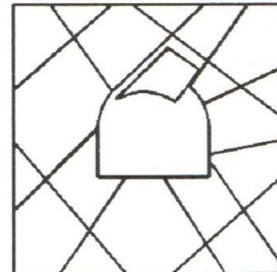
Milieu continu

Propriétés de la
**matrice
rocheuse**



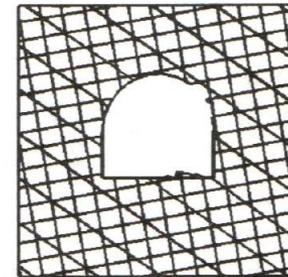
Milieu stratifié

Propriétés des
joints et de la
matrice
rocheuse



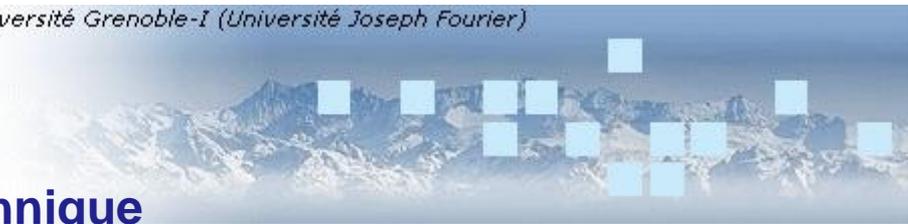
Milieu fracturé

Propriétés des
joints et de la
matrice
rocheuse



Milieu continu
équivalent

Propriétés du
**milieu continu
équivalent**



Cours d'ingénierie des roches
Chapitre 2

Excavations dans un massif continu

1 Forages et galeries (*figures et diapos*)

2 Excavations en surface

2.1 Rebond élastique

Didier Hantz

2015

MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION OU A LA COMPRESSION

Pentes excavées (érosion, homme)



Etat initial :

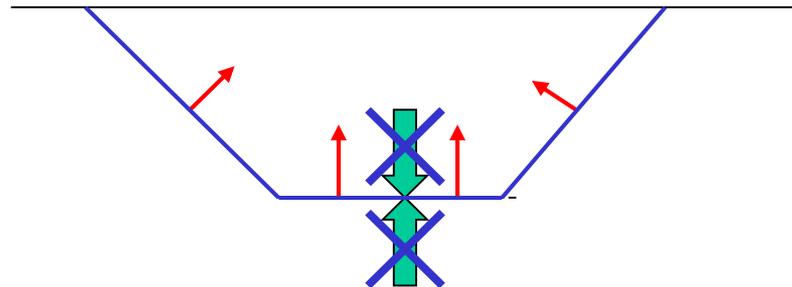
contraintes de compression

Excavation :

Décompression

Expansion du massif

(rebond élastique)



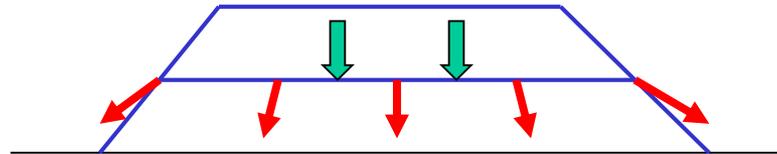
MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION OU A LA COMPRESSION

Pentes construites (terrils, volcans, ...)

Construction :

Compression

Tassement



MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION

Exemple de décompression très rapide, due à l'effondrement de la caldeira du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion)

Avant l'effondrement du 6-7 avril 2007 →



Après l'effondrement de 300 m →



MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION

Les fissures témoignent de la **décompression** autour du cratère d'effondrement du Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion)



MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION

Exemple de décompression rapide, due au creusement d'une mine à ciel ouvert

Mine de cuivre de Palabora, Afrique du Sud

La plus grande mine à ciel ouvert et le plus grand trou artificiel au monde avec 2.000 mètres de diamètre et 762 mètres de profondeur (RMR : 75-90)

Le rebond horizontal atteint 150 mm (d'après Zavodni, 2000)



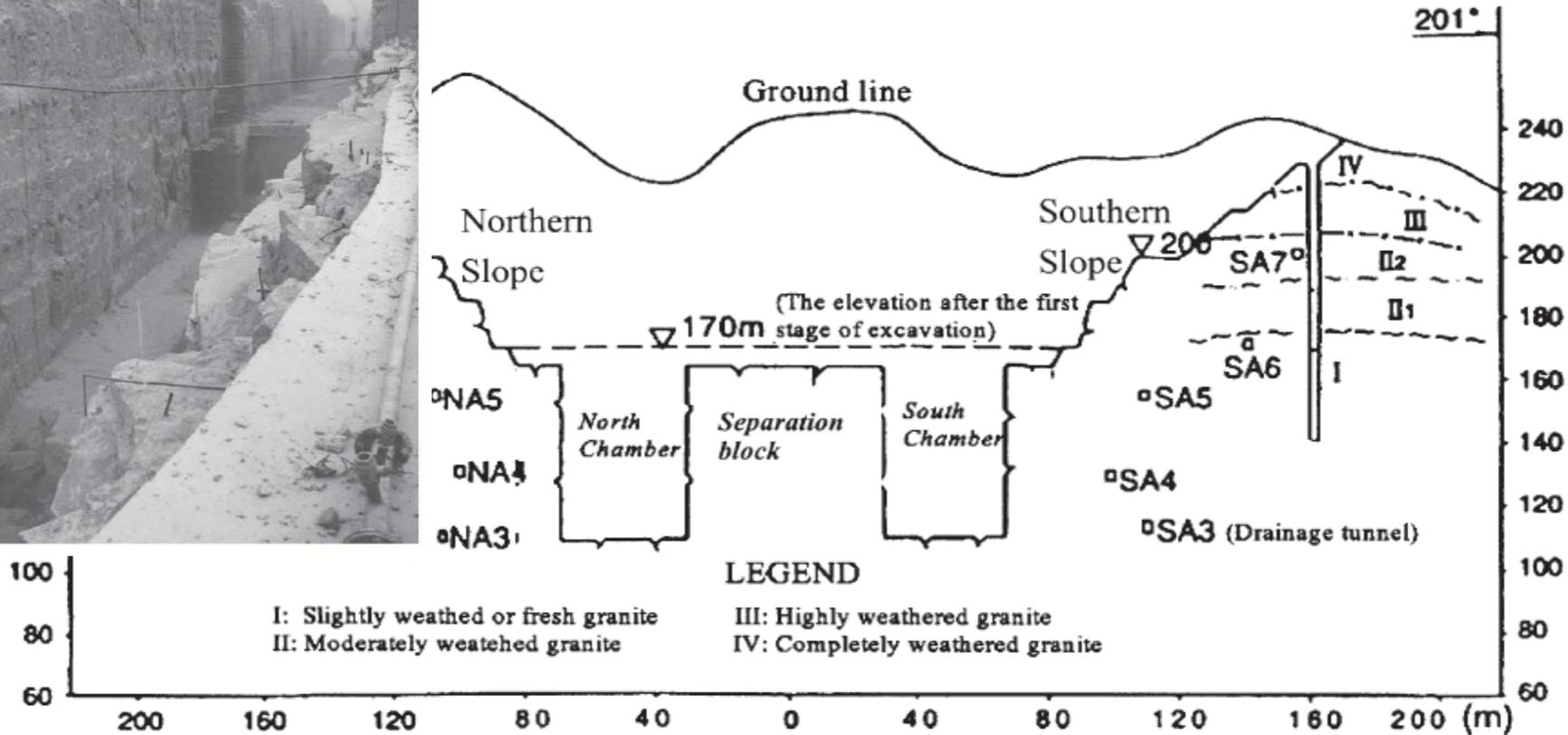
Il atteint 500 mm à la mine d'or de Goldstrike, Nevada (*profondeur : 400 m ; RMR : 30-50*)

MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION

Exemple de décompression rapide, due à une excavation

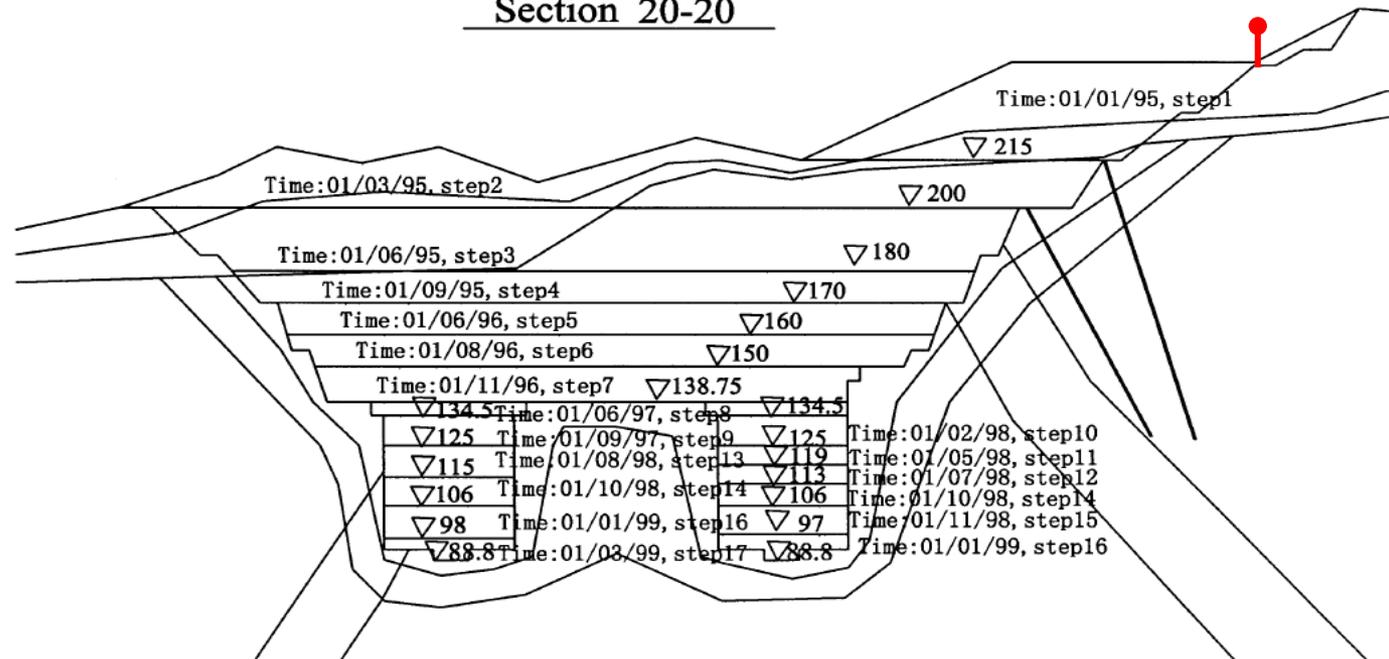
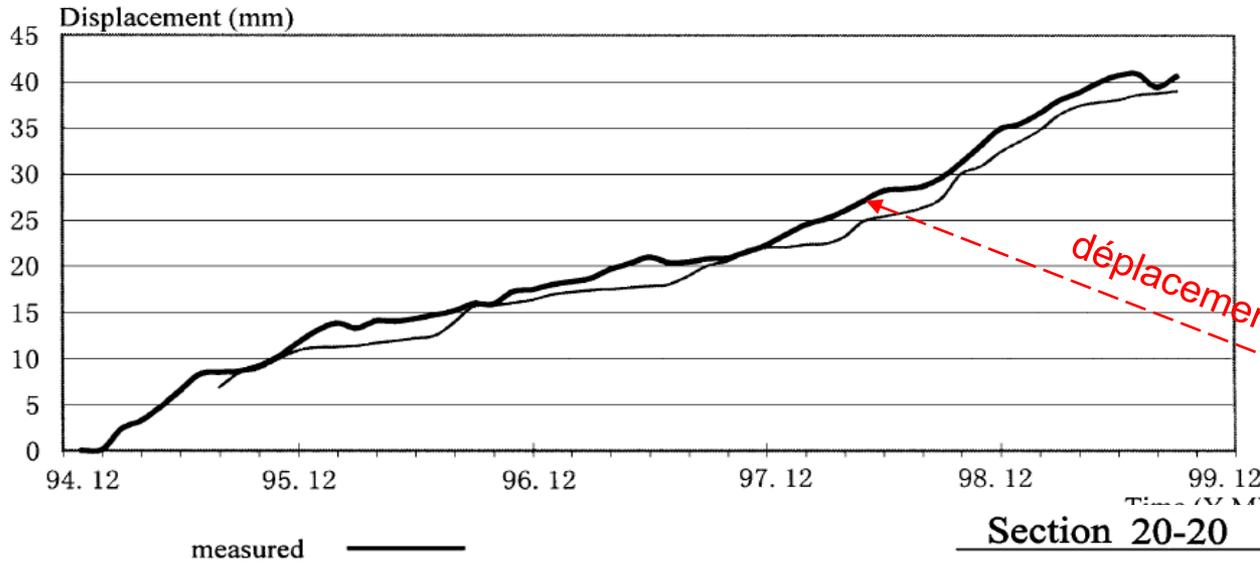
Ecluse du barrage des Trois Gorges (Chine)

(d'après Sheng et al., 2002)



Ecluse du barrage des Trois Gorges (Chine)

(d'après Chen et al., 2001)



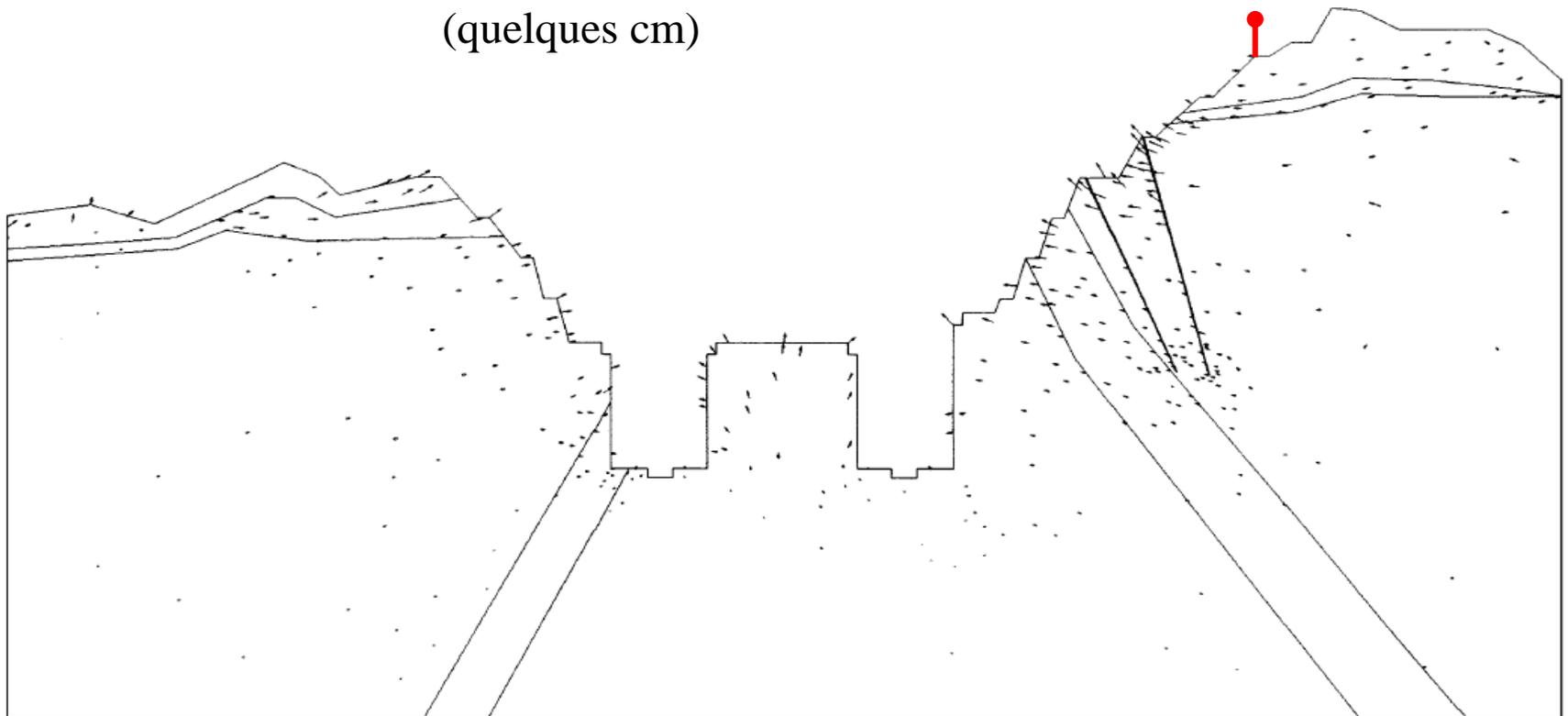
The excavation levels and the corresponding dates

MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION

Ecluse du barrage des Trois Gorges (Chine)

(d'après Chen et al., 2001)

Déplacements modélisés par éléments finis
(quelques cm)



MOUVEMENTS DUS A LA DECOMPRESSION

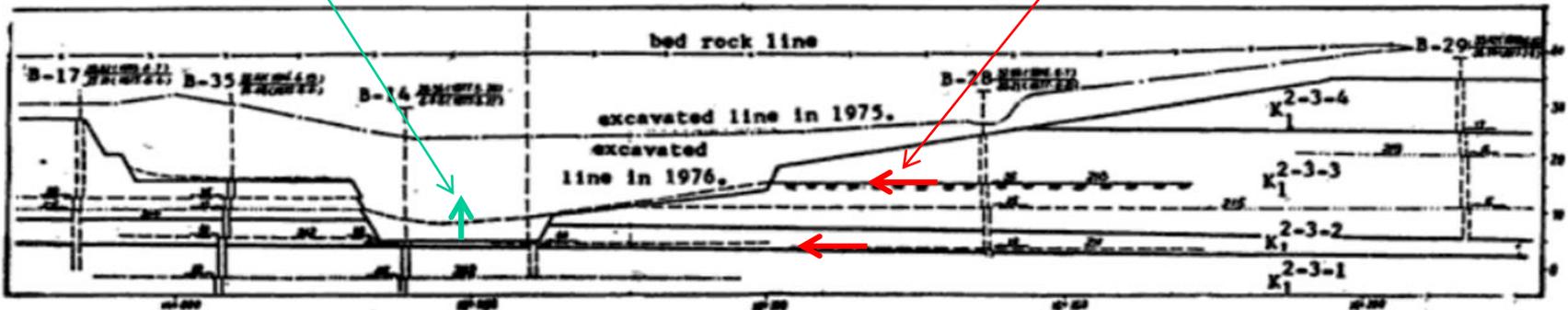
Exemple de décompression rapide, due à une excavation

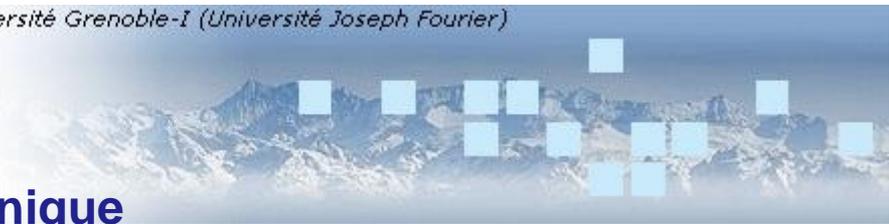
Fondation d'une centrale électrique sur le Yangtse (Chine)

(d'après Chou et al, 1986)

Rebond élastique vertical : 4 cm

Rebonds élastiques horizontaux aux interfaces :
jusqu'à 17 cm





Cours d'ingénierie des roches
Chapitre 2

Excavations dans un massif continu

1 Forages et galeries (*figures et diapos*)

2 Excavations en surface

2.1 Rebond élastique

2.2 Contraintes et déformations plastiques

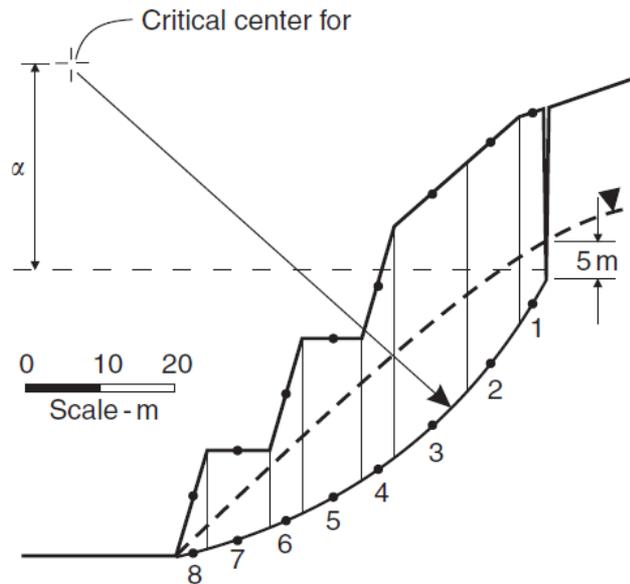
Didier Hantz

2015

Analyse de la stabilité des pentes de massifs continus

Méthode de l'équilibre limite

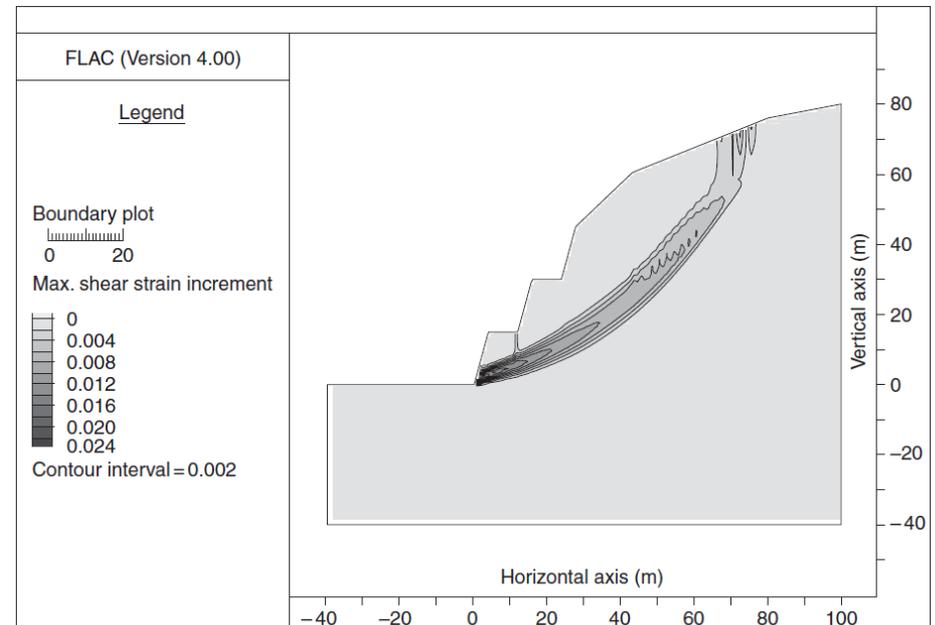
- Une surface de rupture potentielle doit être définie a priori
- Il faut donc tester plusieurs surfaces possibles



Figures extraites de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004)

Calcul des contraintes et des déformations (éléments finis, différences finies)

- La surface de rupture n'est pas définie a priori mais est obtenue par simulation du comportement de la pente
- Le coefficient de sécurité peut être calculé en utilisant la méthode de réduction de la résistance



Exemple d'analyse à l'équilibre limite

($\phi = 43^\circ$; $c = 0,145 \text{ MPa}$; $\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$)

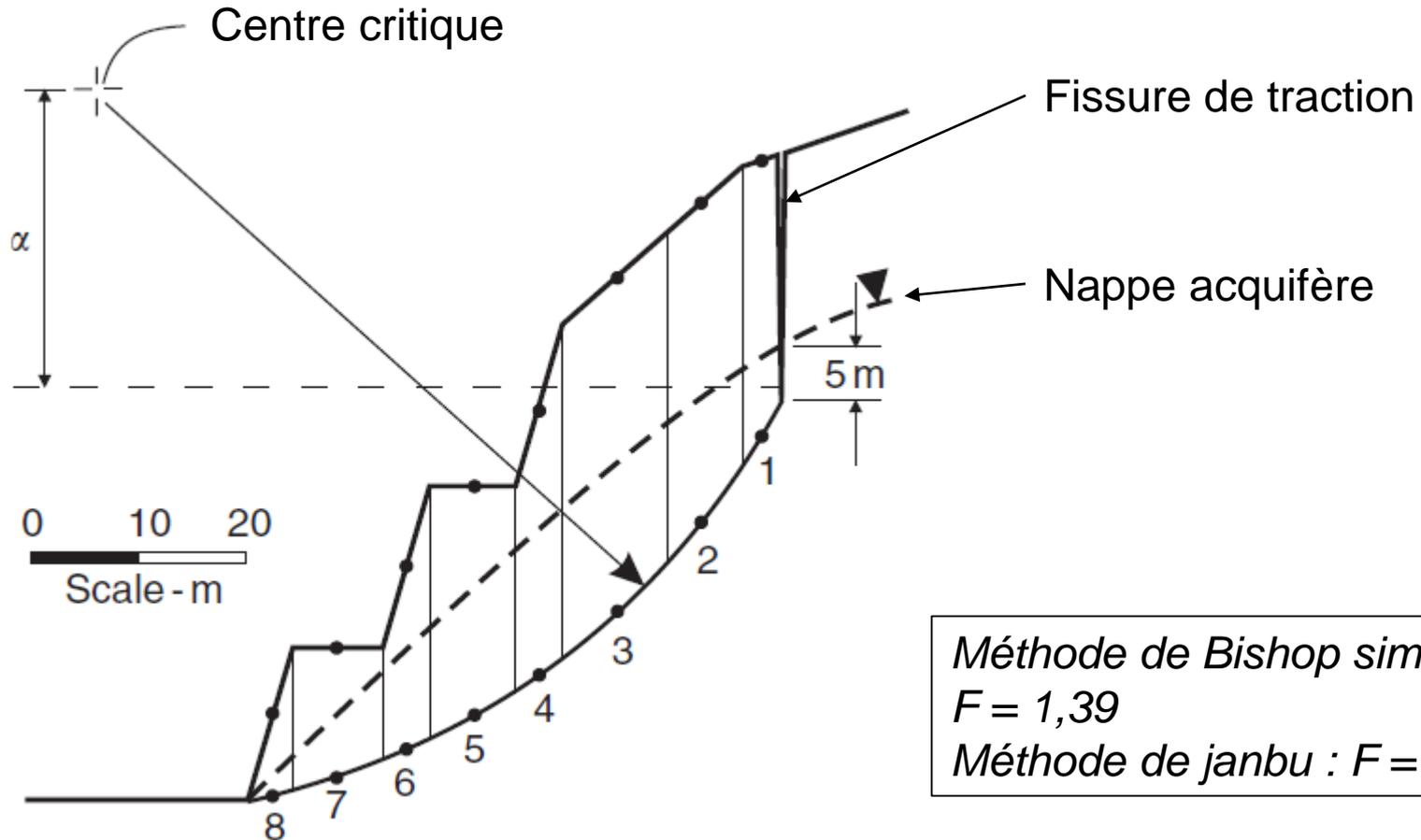


Figure extraite de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004)

Exemple de modélisation élastoplastique par différences finies

($\phi = 43^\circ$; $c = 0,145$ MPa ; $\sigma_t = 0,012$ MPa ; $K = 6,3$ Gpa ; $G = 3,6$ Gpa ;
 $\rho = 2550$ kg/m³ ; taille des éléments = 2 m)

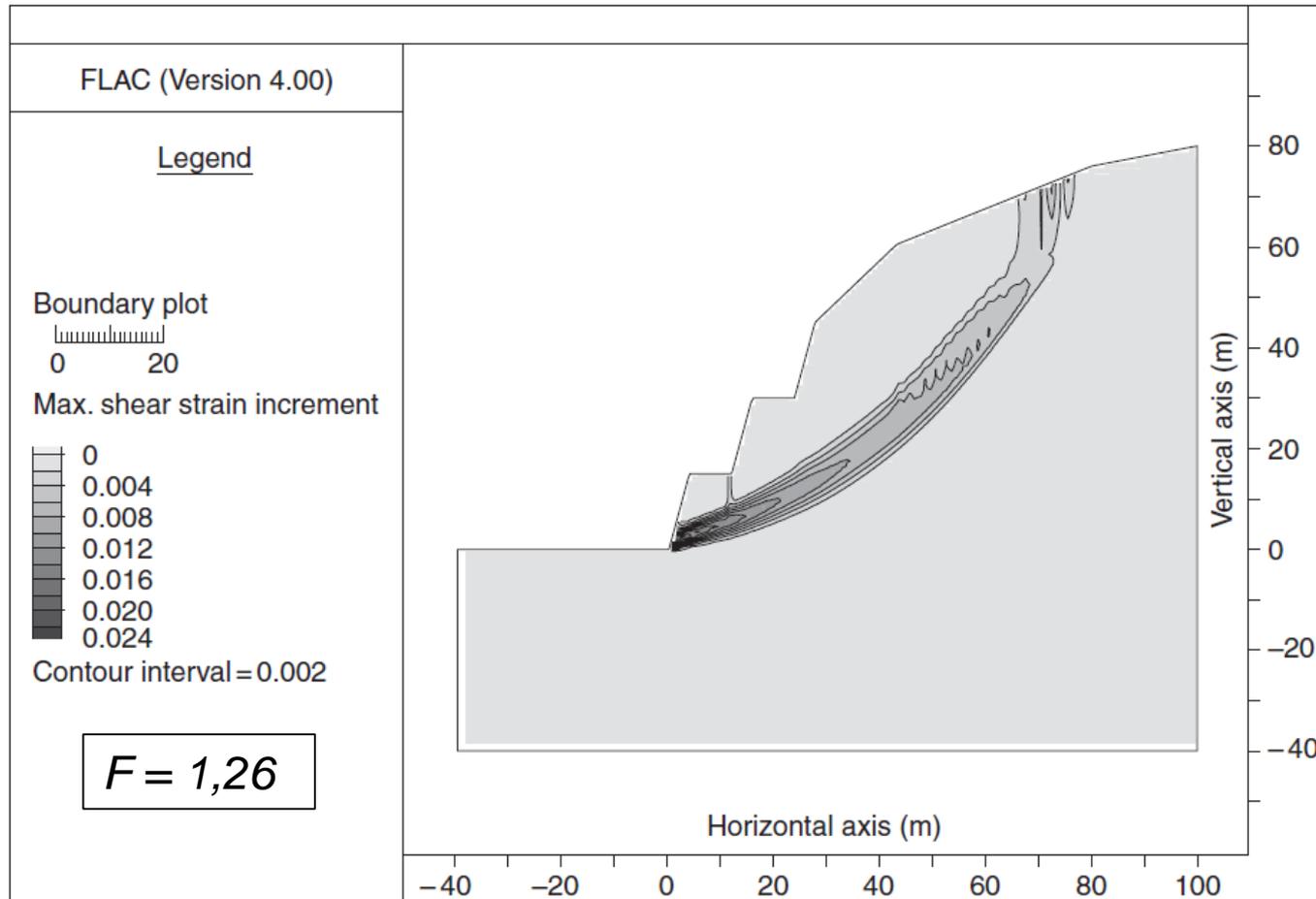


Figure extraite de Rock Slope Engineering (Wyllie & Mah, 2004)