



Cours d'ingénierie des roches
Chapitre 4

Mesures in situ
(figures et diapos)

Didier Hantz
2014

1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement d'un forage par un dilatomètre



SPECIFICATIONS

PROBE

Diameter

Minimum (deflated) 73.7 mm

Maximum (inflated) 82.5 mm

Loading

Maximum pressure 30 000 kPa

Nominal length 457 mm

READOUT – MODEL ACCULOG-IX

Function Volume and pressure indicator

Display Digital (LCD)

Power Supply Rechargeable battery pack

RESOLUTION

Diametrical change 1 µm (0.01 cc)

Pressure measurement 0.1% F.S.

1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement d'un forage par un dilatomètre

SPECIFICATIONS

PROBE

Diameter

Minimum (deflated) 73.7 mm

Maximum (inflated) 82.5 mm

Loading

Maximum pressure 30 000 kPa

Nominal length 457 mm

READOUT – MODEL ACCULOG-IX

Function Volume and pressure indicator

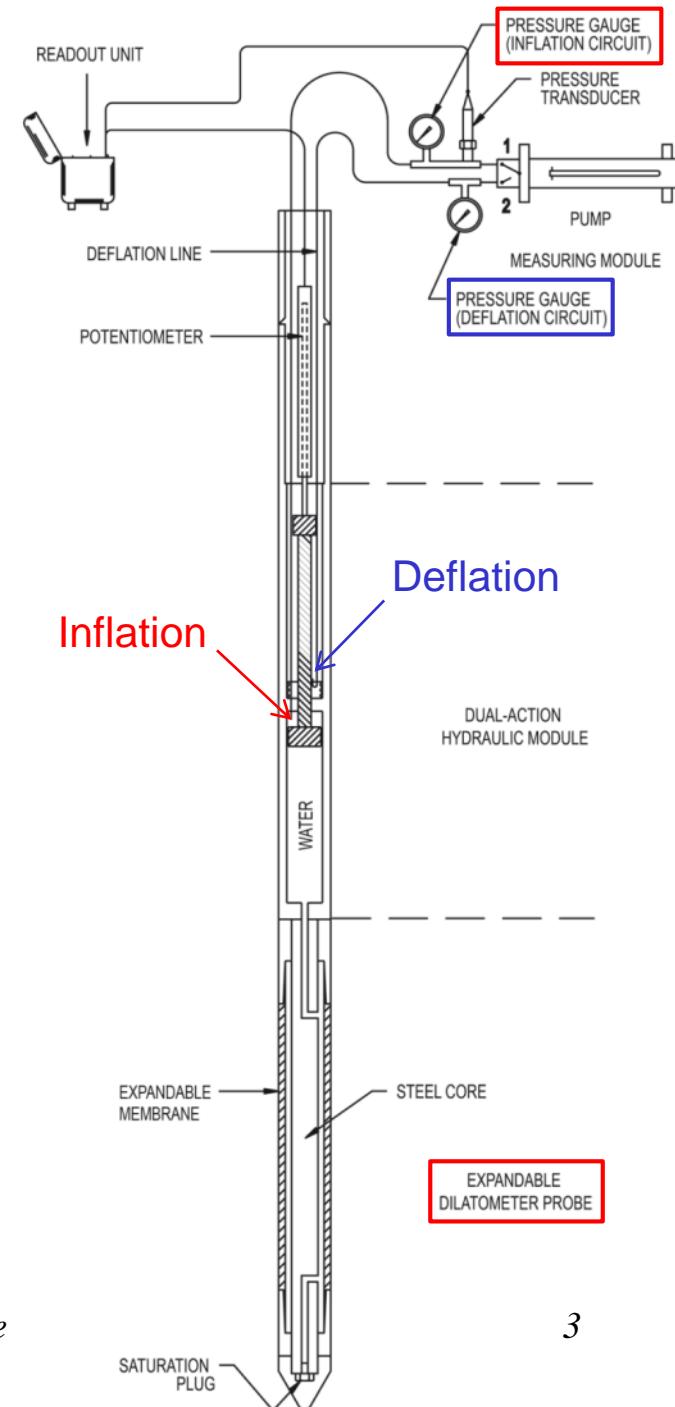
Display Digital (LCD)

Power Supply Rechargeable battery pack

RESOLUTION

Diametrical change 1 µm (0.01 cc)

Pressure measurement 0.1% F.S.



1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement d'un forage par un dilatomètre

SPECIFICATIONS

PROBE

Diameter (min.) 73 mm

Diameter (max.) 76.2 mm at 20 000 kPa

82.0 mm at 10 000 kPa

Working pressure (max.) 20 000 kPa (3000 psi)

Length of inflatable sheath 460 mm

Typical sheath inertia 700 kPa

HYDRAULIC PRESSURE GAUGE

Range 20 000 kPa

Accuracy 1% F.S.

DIGITAL READOUT

Direct reading of diametric changes with six electrical strain followers

P-3 Vishay strain indicator with selector switch

Resolution of diametrical change 0.01 mm



1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement d'un forage ou d'une galerie
(rayon R)

Modèle élastique :

$$u = \frac{\Delta p R}{2G} = \frac{\Delta p R(1+\nu)}{E}$$

Ordres de grandeur : pression jusqu'à 70 Mpa ;
diamètre < 200 mm ; longueur < 1 m.

Exemple de dilatomètre comportant 3 capteurs
de déplacement à 120° (CFMR, 2004) :

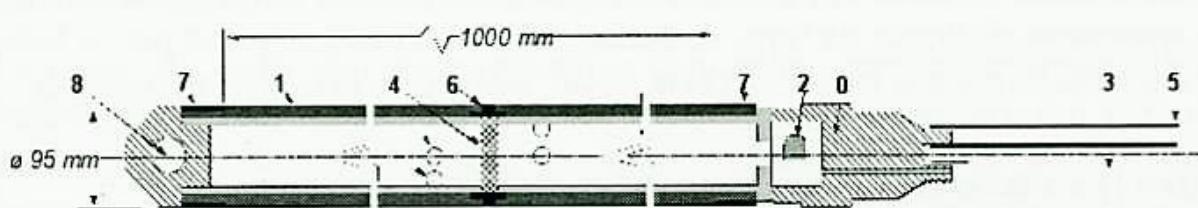
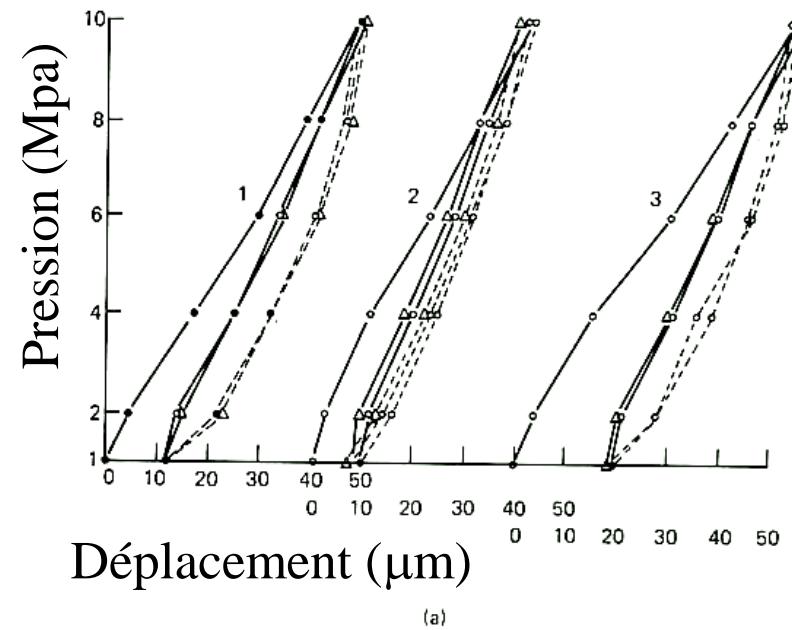
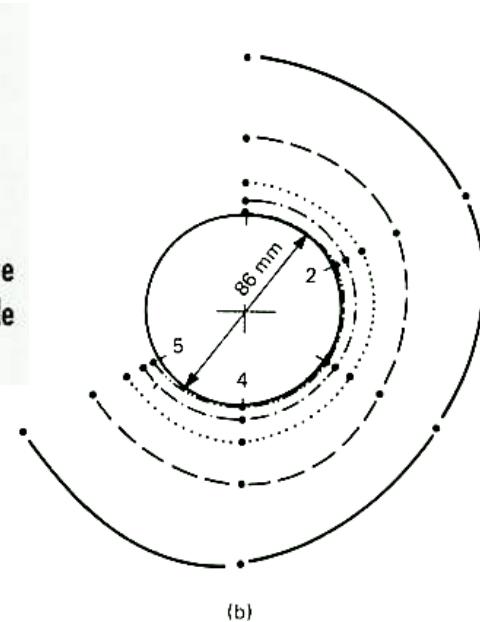


Figure 13-9 – Coupe longitudinale schématique d'une sonde dilatométrique : 0 âme métallique, 1 manchette souple, 2 capteur de pression éventuel, 3 tube d'alimentation en fluide, 4 capteurs de déplacement, 5 tige de manœuvre, 6 pastille métallique, 7 bagues de serrage de la manchette, 8 boussole éventuelle



Déplacement (μm)

(a)



5

Résultat d'essai au dilatomètre (ISRM, 1987) →

1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement à la plaque



Photo ENOMFRA

D. Hantz - Polytech'Grenoble

1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement à la plaque (rayon R) - Modèle élastique :

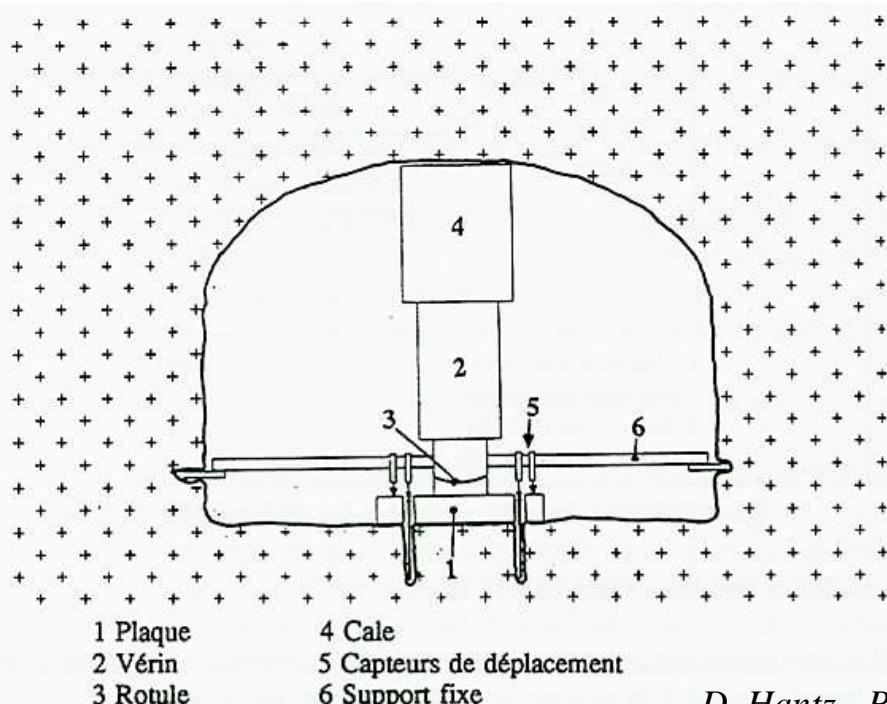
$k = \frac{\pi}{2}$ pour une plaque rigide (déplacement uniforme)

$k = 1,70$ pour une plaque flexible (contrainte uniforme)

$$u = \frac{\Delta p R k (1 - v^2)}{E}$$

Ordres de grandeur : pression < 50 Mpa ; charge < 3 MN ; 0.3 < diamètre < 1 m.

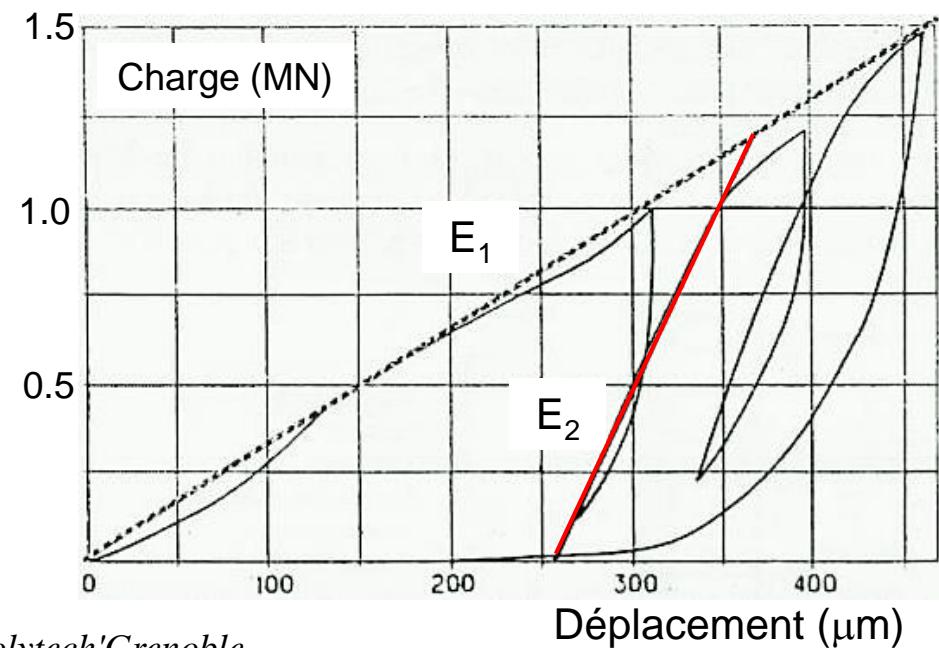
Schéma de principe (d'après Fine, 1993)



Essai sur quartzite du barrage de Tignes

E_1 : module de déformation globale.

E_2 : module réversible (Habib, 1950).

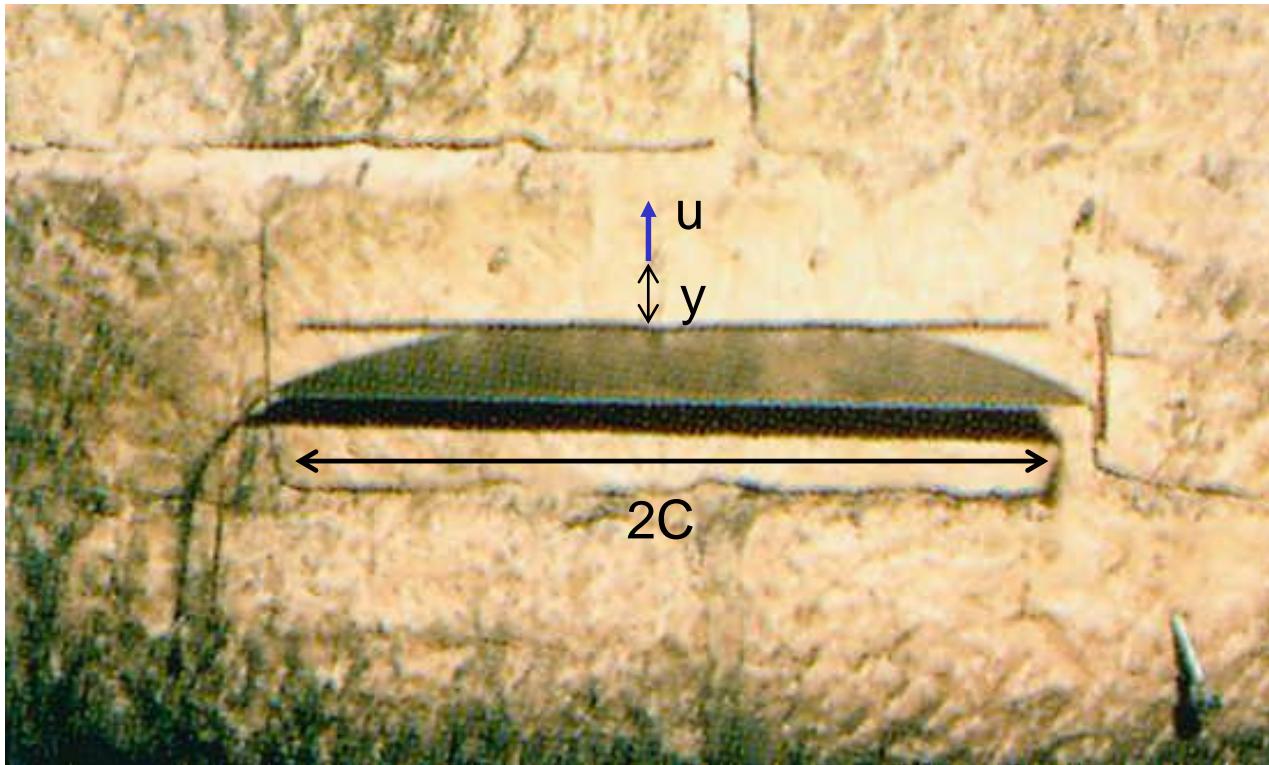


1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Chargement au vérin plat

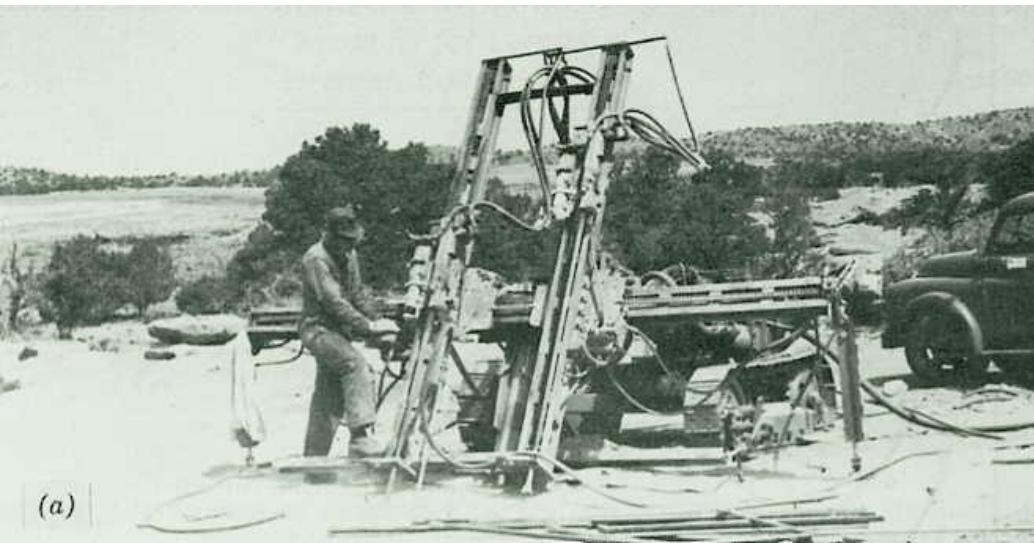
$$u = \frac{\Delta p C}{E} \left\{ (1-v) \left[\left(1 + \frac{y^2}{C^2} \right)^{1/2} - \frac{y}{C} \right] + (1+v) \left[1 + \frac{y^2}{C^2} \right]^{-1/2} \right\}$$

(Jaeger et Cook, *Fundamentals of rock mechanics*, 1976)



(photo CFMR, 2004)

1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE



Essai de compression uniaxiale sur bloc en place

- Découpage partiel d'un bloc prismatique de section triangulaire, par deux ligne de forages inclinés à 60° .
- Application de la contrainte par un vérin plat et mesure de la déformation en surface

(photo H. Pratt)

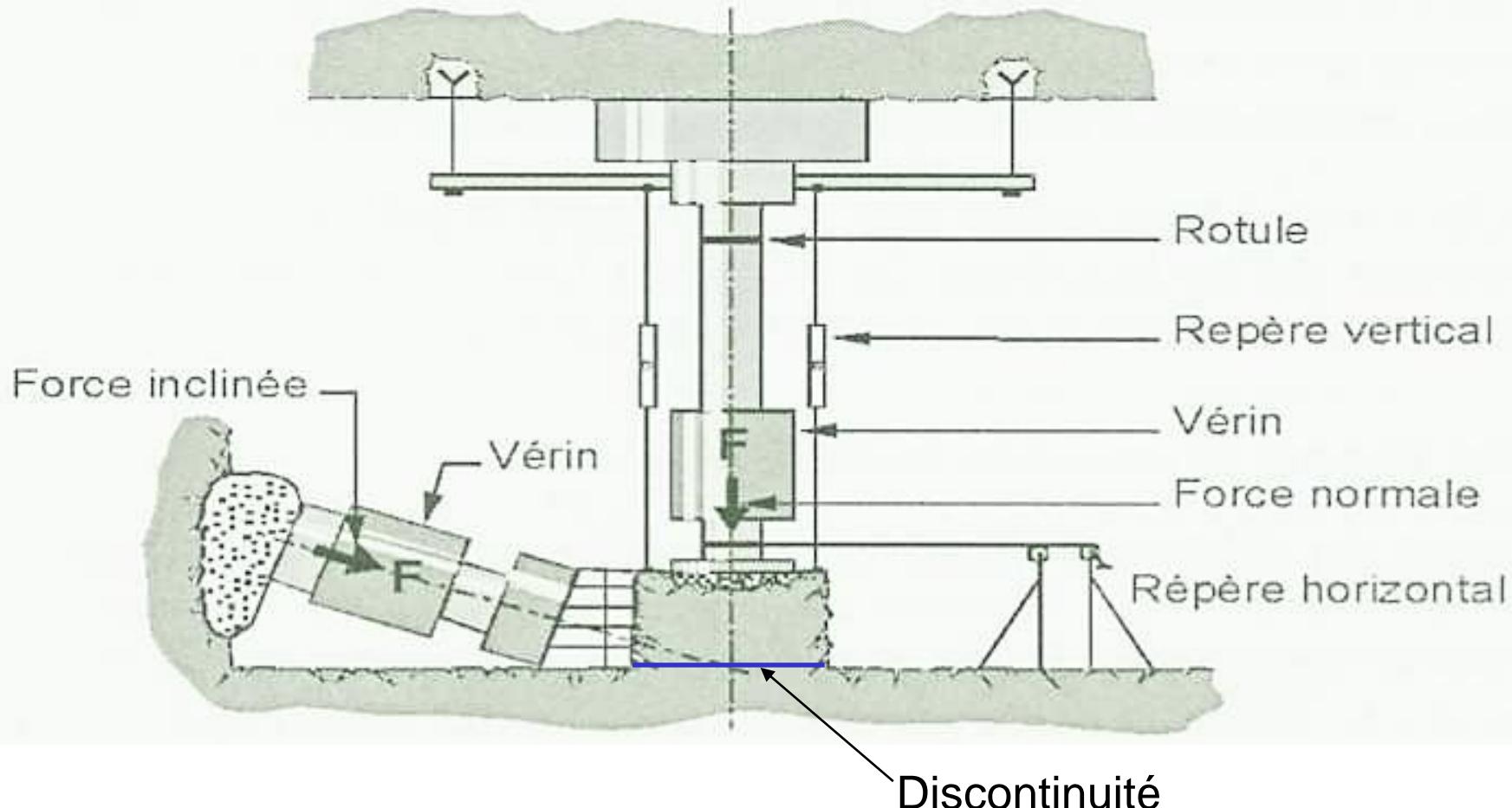


Vérin plat

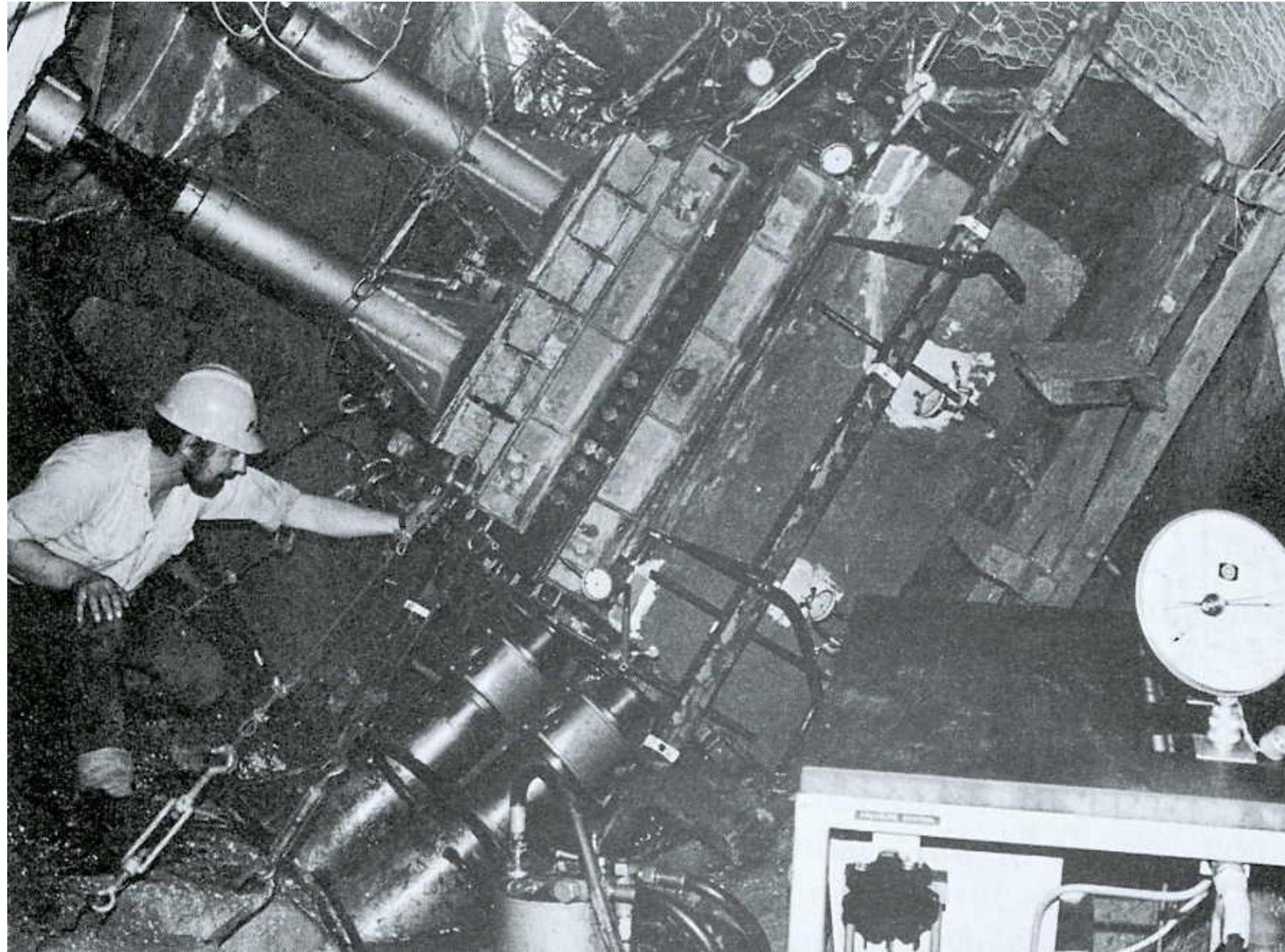
Extensomètre

1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE

Essai de cisaillement sur bloc en place



1. DEFORMABILITE ET RESISTANCE



Essai de cisaillement de joint de stratification pour l'étude d'une pente dominant un lac de barrage en Grèce (Franklin et al., 1974)

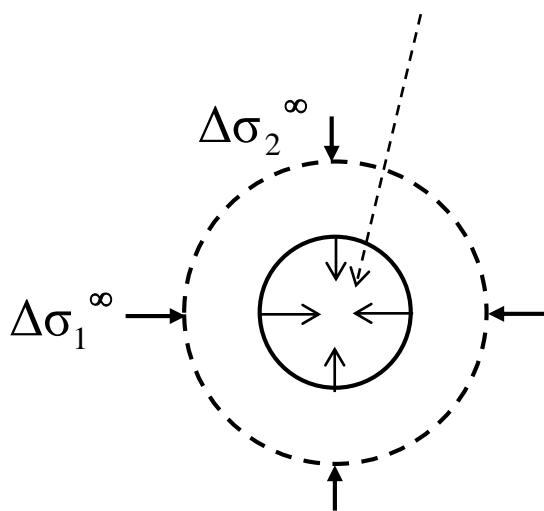
2. MESURE DE VARIATIONS DE CONTRAINTES

Déformation d'un forage, due à la variation des contraintes dans le massif

$$-u = \frac{R}{E} (\Delta\sigma_1^\infty + \Delta\sigma_2^\infty) - \frac{vR}{E} \Delta\sigma_3^\infty + \frac{2(1-v^2)R}{E} (\Delta\sigma_1^\infty - \Delta\sigma_2^\infty) \cos 2\theta$$

σ_3^∞ : contrainte principale parallèle à l'axe du forage σ_1^∞ : contrainte parallèle à la direction $\theta = 0$

Cellule de mesure
(inclusion souple)



Exemple de cellule →

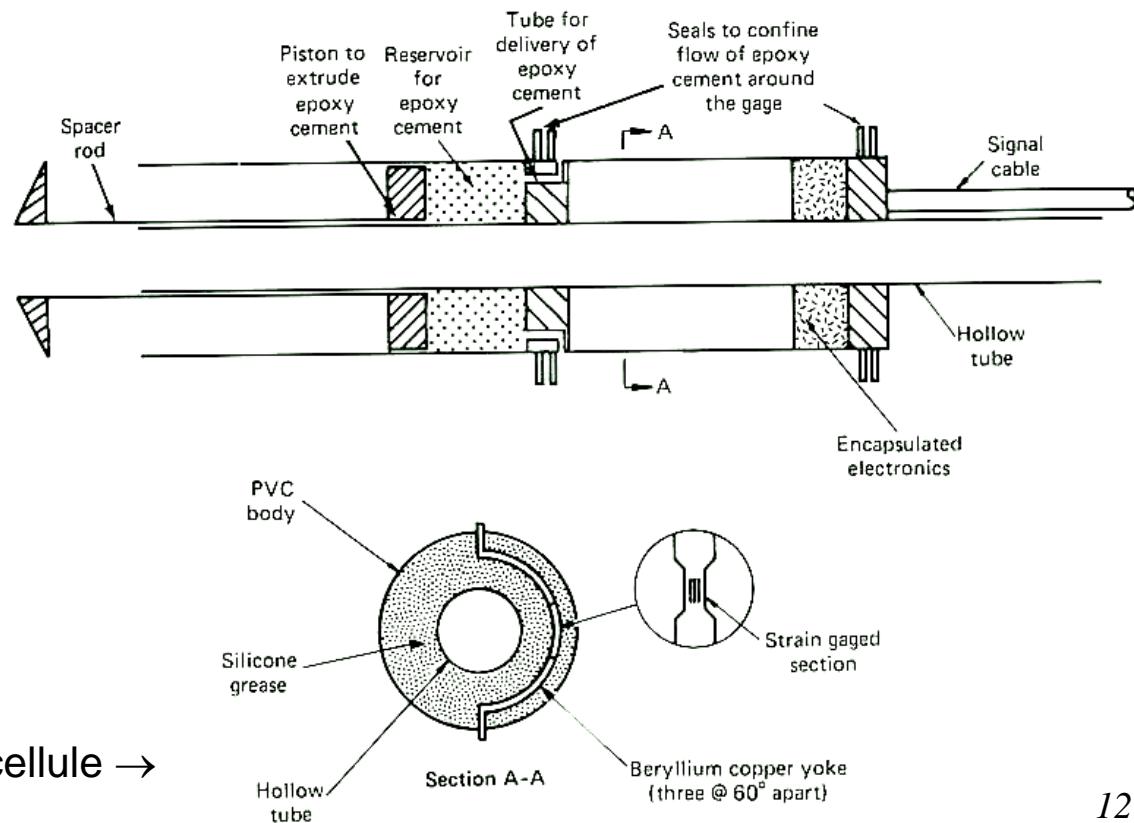


Figure 11.3. CSIRO yoke borehole deformation gage (courtesy of Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia).

2. MESURE DE VARIATIONS DE CONTRAINTES

Variations des contraintes dans une **inclusion rigide**, dues à la variation d'une contrainte dans le massif

$$\Delta\sigma_x^i = \frac{\Delta\sigma_x^\infty}{2} \left[\frac{4k(1-v)}{2k+2-4v_i} + \frac{4k(1-v)}{k(3-4v)+1} \right] \quad \Delta\sigma_y^i = \frac{\Delta\sigma_x^\infty}{2} \left[\frac{4k(1-v)}{2k+2-4v_i} - \frac{4k(1-v)}{k(3-4v)+1} \right]$$

$k = G_i / G$ (rapport des modules de l'inclusion et de la roche)

Pour $k \rightarrow \infty$ et $v = v_i = 0.25$, $\Delta\sigma_x^i \rightarrow 1.5\Delta\sigma_x^\infty$ et $\Delta\sigma_y^i \rightarrow 0$

Cellule en acier: $G_i = 210 \text{ Gpa} \gg G_{\text{roche}}$

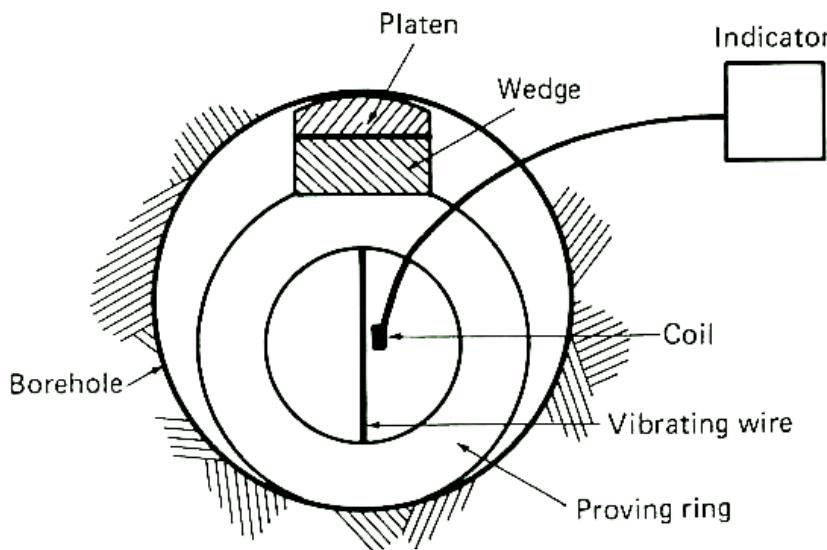


Figure 11.5. Schematic of uniaxial vibrating wire stressmeter.

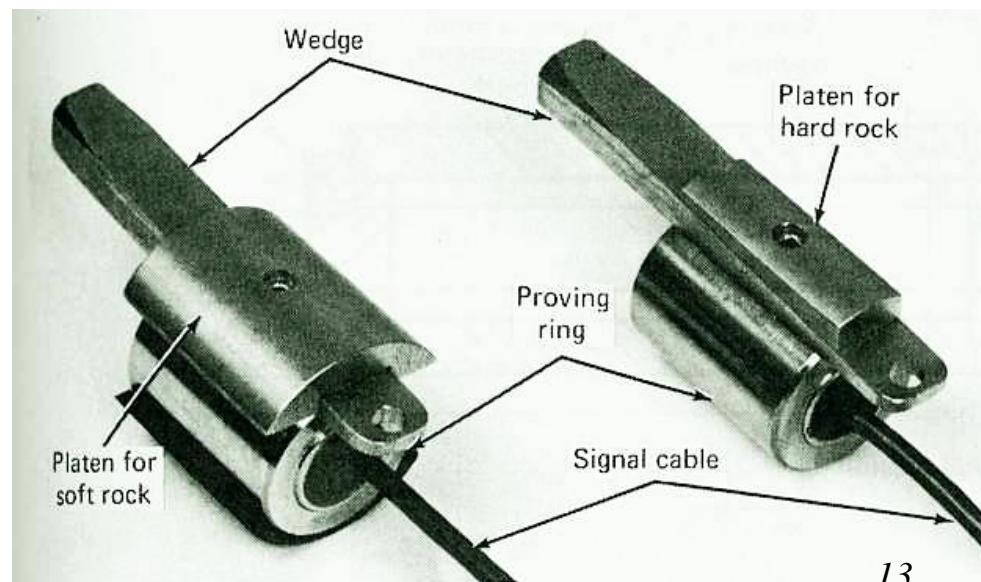
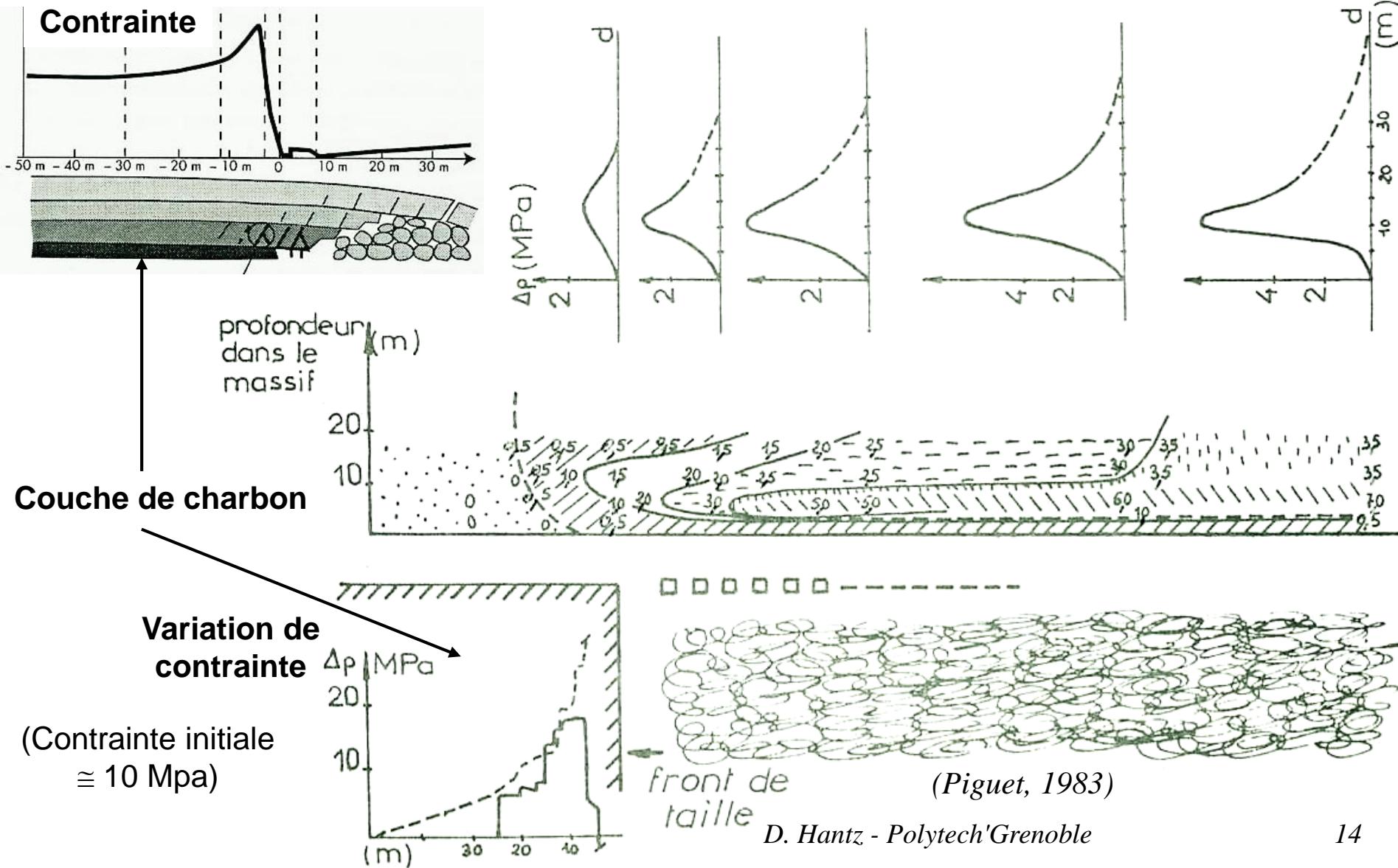
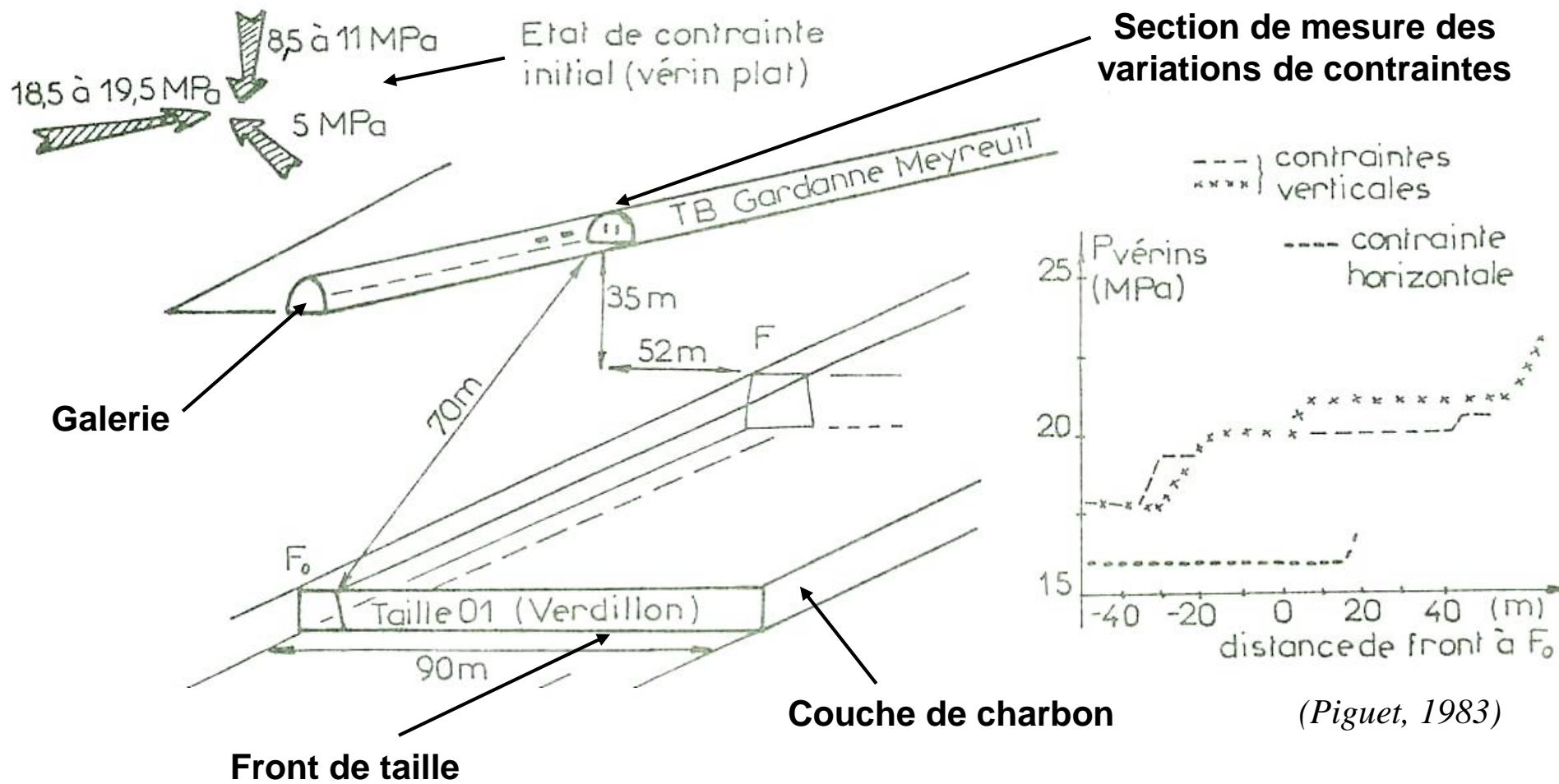


Figure 11.6. Uniaxial vibrating wire stressmeter (courtesy of Irad Gage, a Division of Klein Associates, Inc., Salem, NH).

2. MESURE DES VARIATIONS DE LA CONTRAINTE VERTICALE, INDUITES PAR L'EXPLOITATION D'UNE TAILLE



2. MESURE DES VARIATIONS DES CONTRAINTES, INDUITES PAR L'EXPLOITATION D'UNE TAILLE, DANS UNE GALERIE VOISINE



3. MESURE DES CONTRAINTES

DETERMINATION DES DIRECTIONS PRINCIPALES DES CONTRAINTES

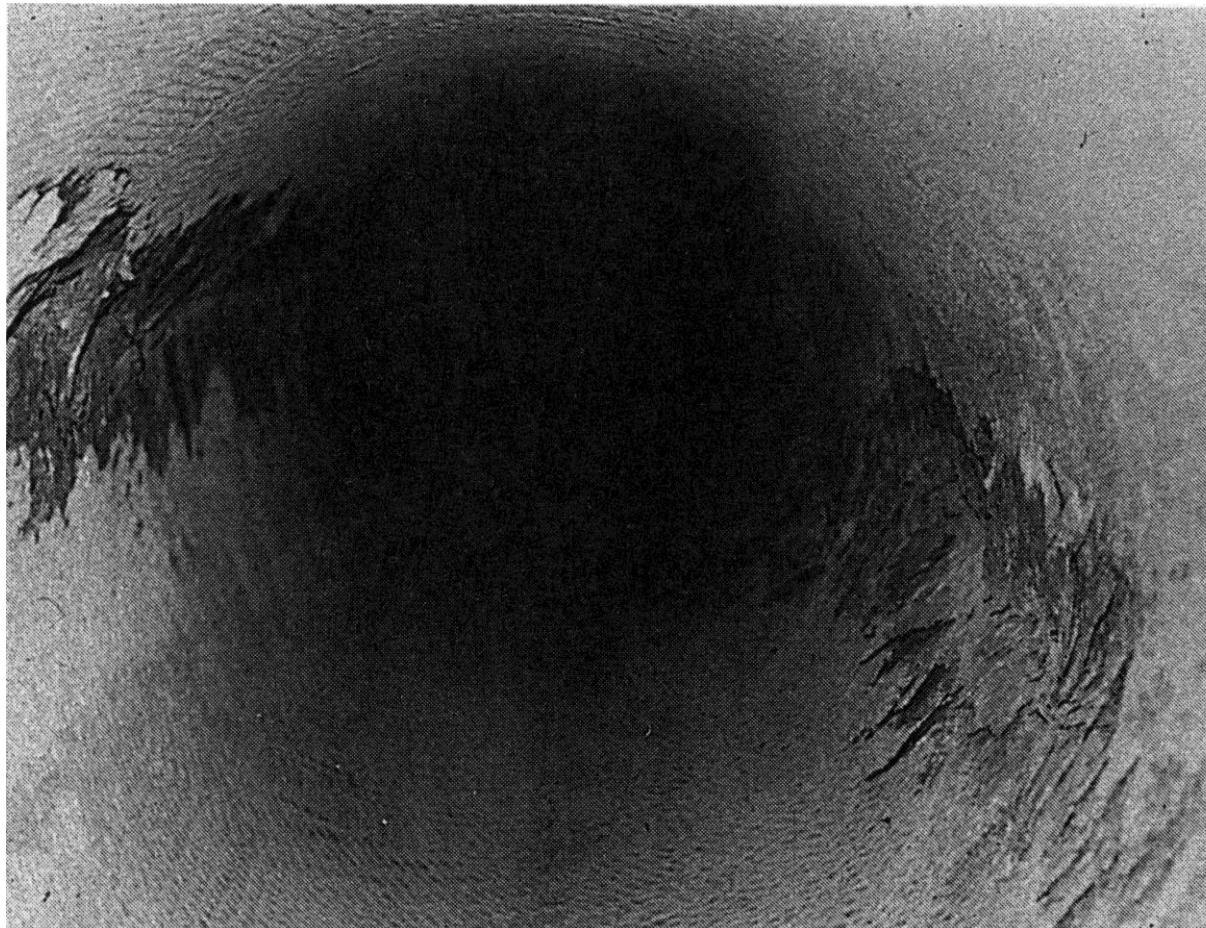
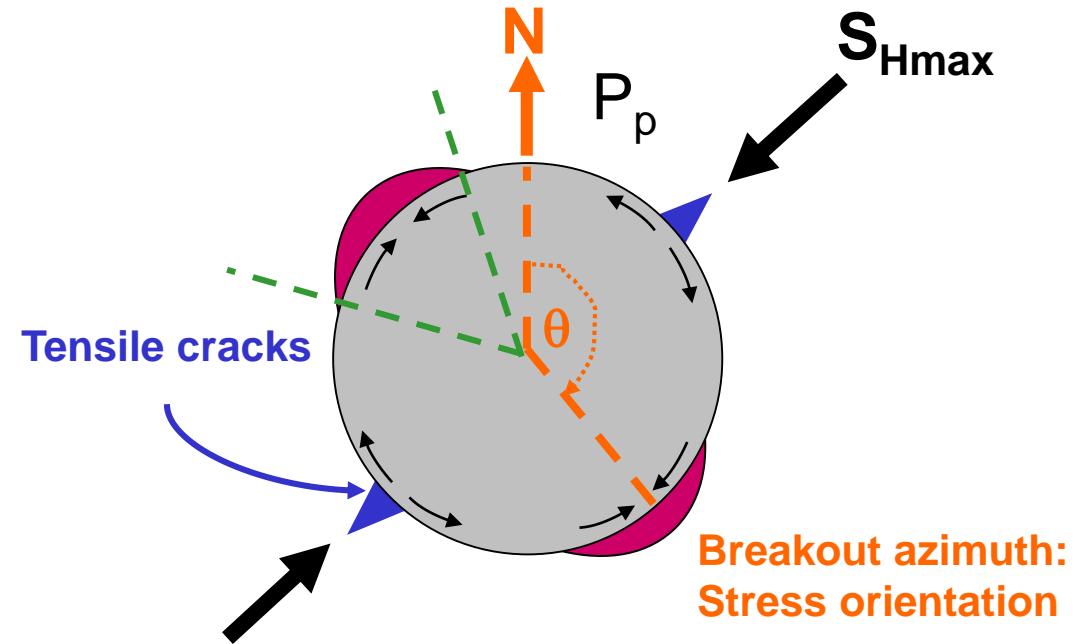
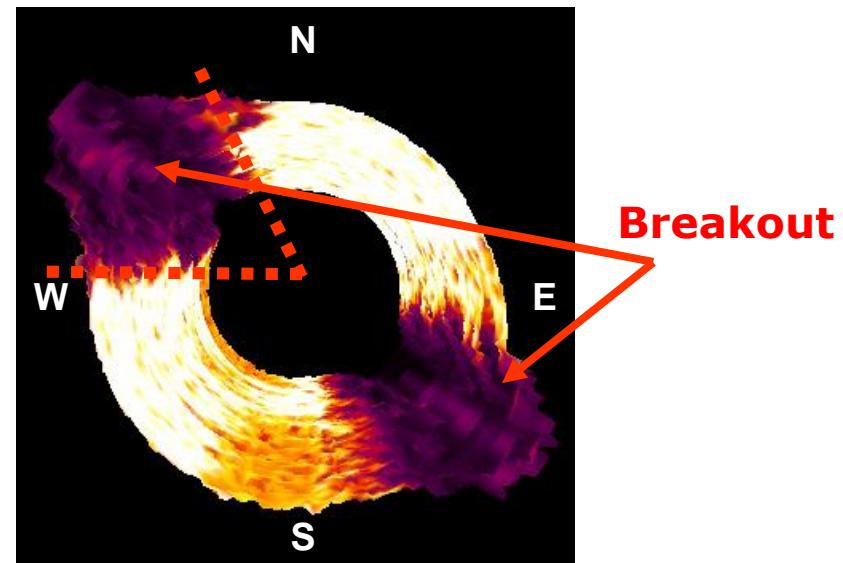
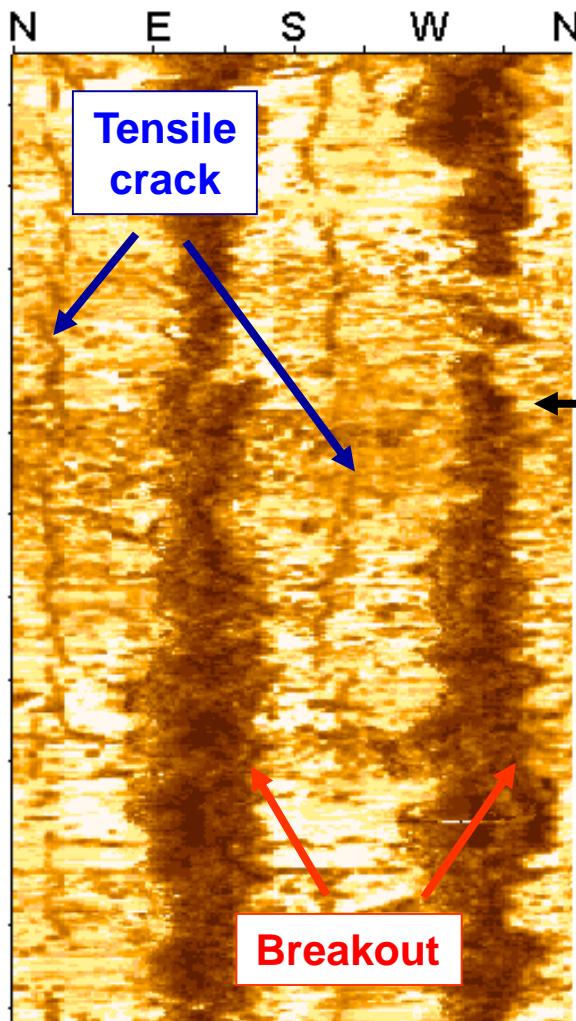


Photo extraite de "Support of Underground Excavations in Hard Rocks" par Hoek, Kaiser et Bawden, Balkema, 1995.

3. MESURE DES CONTRAINTES

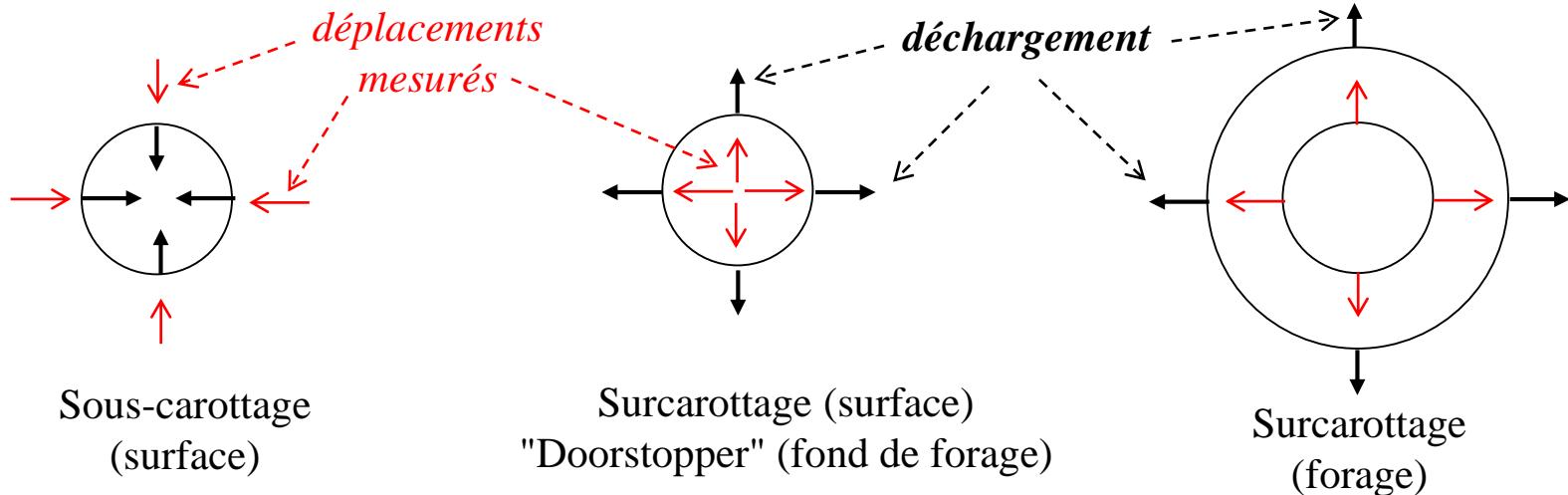
DETERMINATION DES DIRECTIONS PRINCIPALES DES CONTRAINTES

Diagraphie acoustique



3. MESURE DES CONTRAINTES

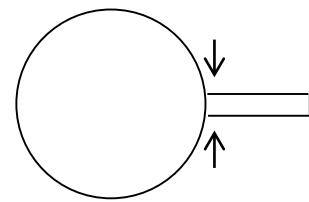
Modèles utilisés dans les méthodes par relâchement des contraintes



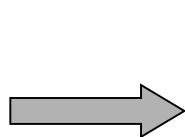
Déplacement radial dans le cas du **surcarottage** en forage

$$u = \frac{(1+v)}{E} \left[\frac{(1-v)}{(1+v)} r + \frac{R^2}{r} \right] \frac{(\sigma_1^\infty + \sigma_2^\infty)}{2} - \frac{v}{E} r \sigma_3^\infty + \frac{(1+v)}{E} \left[r + \frac{4(1-v)R^2}{r} - \frac{R^4}{r^3} \right] \frac{(\sigma_1^\infty - \sigma_2^\infty)}{2} \cos 2\theta$$

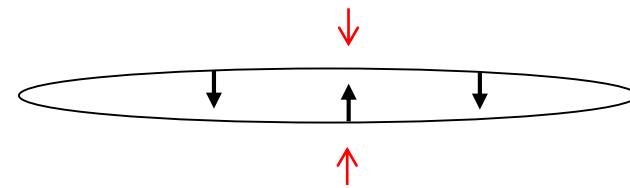
σ_3^∞ : contrainte principale parallèle à l'axe du forage σ_1^∞ : contrainte parallèle à la direction $\theta = 0$



"Borehole slotter"
(fente dans un forage)



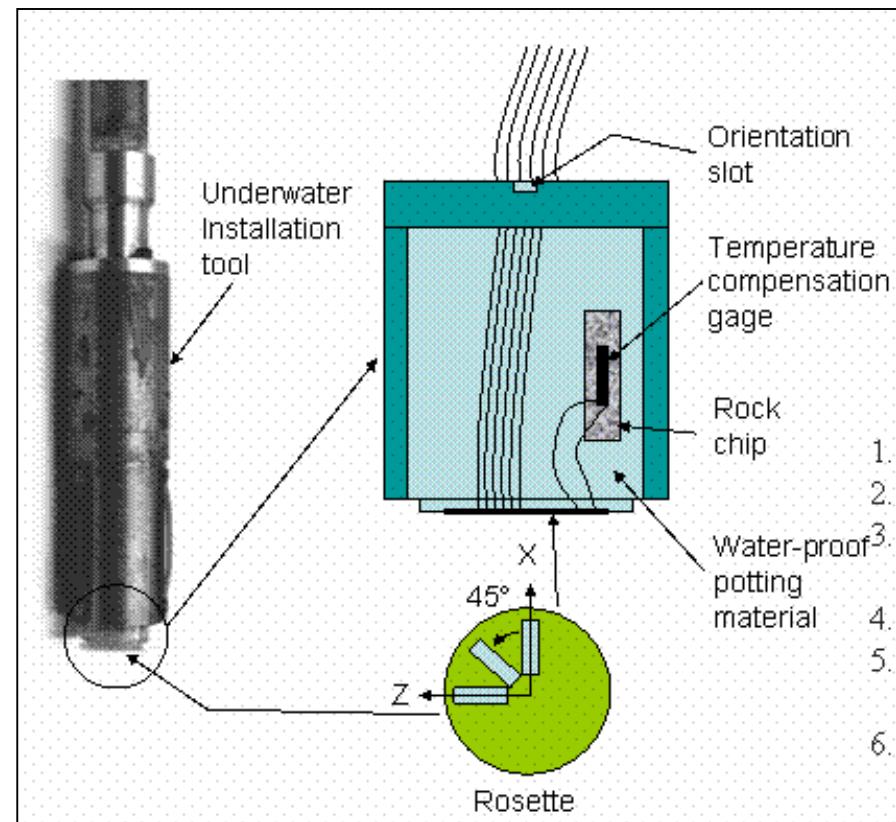
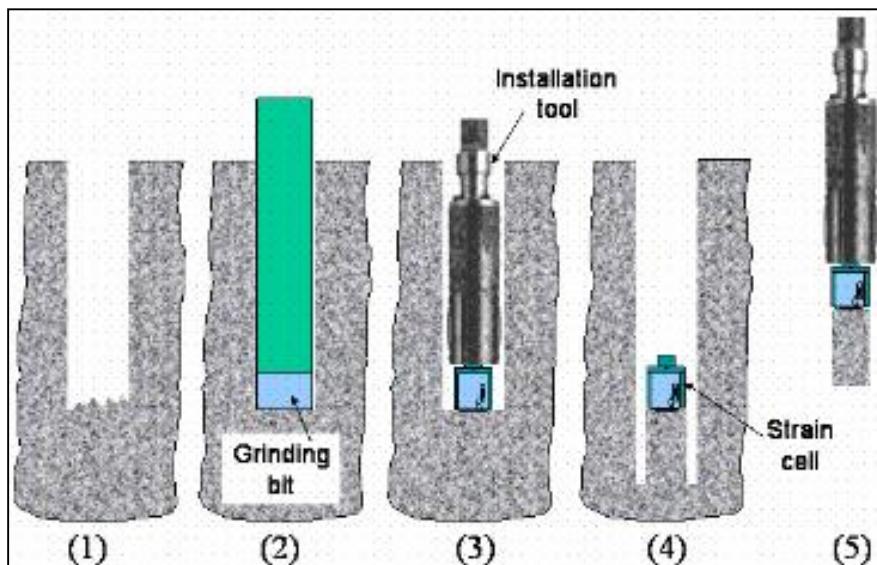
D. Hantz - Polytech'Grenoble



Sous-carottage

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par relâchement des contraintes : "Doorstopper"



Documents hydrofrac.com

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par relâchement des contraintes : "Doorstopper"

If the borehole is oriented in Oy direction and the xz plane is perpendicular to the borehole, the strain measurements (ϵ_a , ϵ_b and ϵ_c) can be converted into the stresses. For a 45 degree rosette shown in the above picture, the strains in the rosette can be transformed into the strains in the X-Z orthogonal coordinate system.

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x \\ \boldsymbol{\varepsilon}_z \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_A \\ \boldsymbol{\varepsilon}_B \\ \boldsymbol{\varepsilon}_C \end{pmatrix}$$

If the rock surrounding the borehole is assumed to behave in a linear elastic manner, the strains can be converted into the changes of stresses at the flat bottom of the borehole. The elastic moduli E and ν are measured from the extracted core stub.

$$\begin{pmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xz} \end{pmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_x \\ \boldsymbol{\varepsilon}_z \\ \gamma_{xz} \end{pmatrix}$$

The geometry at the flat bottom of the borehole with extended overcore requires a numerical analysis to convert the changes in stresses into the in situ stress surrounding the borehole. If the stress σ_y along the borehole direction is assumed to be zero for a shallow borehole or calculated from the weight of the overburden, the in situ stress acting in the plane perpendicular to the borehole is as follows:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} a & b & 0 \\ b & a & 0 \\ 0 & 0 & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta\sigma_x + c\sigma_y \\ \Delta\sigma_z + c\sigma_y \\ \Delta\tau_{xz} \end{pmatrix}$$

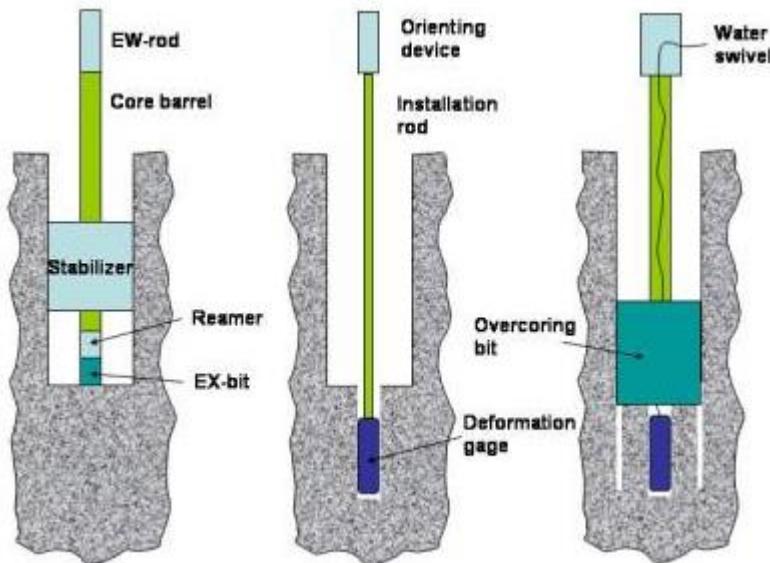
The numerically obtained coefficients a, b, c, and d are as follows:

Document hydrofrac.com

References	a	b	c	d
Bonnechere, 1968	1.25	0	-0.75(0.5+n)	1.25
Van Heerden, 1968	1.25	0.064	-0.75(0.65+n)	1.25
Crouch, 1969	1.35-1.55n^2	0	-0.81(0.565+n)	
de la Cruz & Raleigh, 1972	1.3	0.085+0.15n-n^2	0.473+0.91n	1.423-0.027n

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par relâchement des contraintes : surcarottage



Exemple : Cellule de déformation USBM
Petit forage : 1,5" - Carottage : 6"
Documents hydrofrac.com



Le module d'Young est déterminé en plaçant les échantillons surcarottés dans une cellule biaxiale, à partir de la théorie du cylindre épais (le coefficient de Poisson est supposé connu)

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par relâchement des contraintes : surcarottage

Interprétation de l'essai (Documents hydrofrac.com)

$$\Delta d_s = \sigma_x f_1 + \sigma_y f_2 + \sigma_{xy} f_3 + \tau_{xz} f_4$$

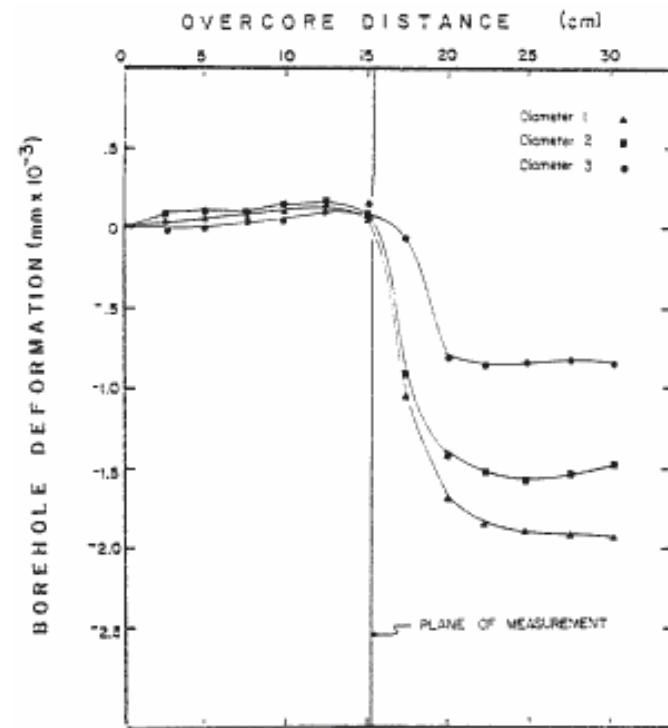
$$f_1 = d(1+2\cos 2\theta) \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{d\nu^2}{E}$$

$$f_2 = -\frac{d\nu}{E}$$

$$f_3 = d(1-2\cos 2\theta) \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{d\nu^2}{E}$$

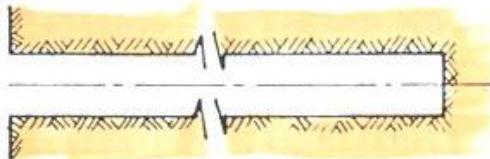
$$f_4 = d(4\sin 2\theta) \frac{1-\nu^2}{E}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xz} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 3d \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{d\nu^2}{E} & -d \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{d\nu^2}{E} & 0 \\ \frac{d\nu^2}{E} & 2d \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{d\nu^2}{E} & 2\sqrt{3}d \frac{1-\nu^2}{E} \\ \frac{d\nu^2}{E} & 2d \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{d\nu^2}{E} & -2\sqrt{3}d \frac{1-\nu^2}{E} \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta d_s + \frac{d\nu}{E} \sigma_y \\ \Delta d_{10} + \frac{d\nu}{E} \sigma_y \\ \Delta d_{110} + \frac{d\nu}{E} \sigma_y \end{pmatrix}$$

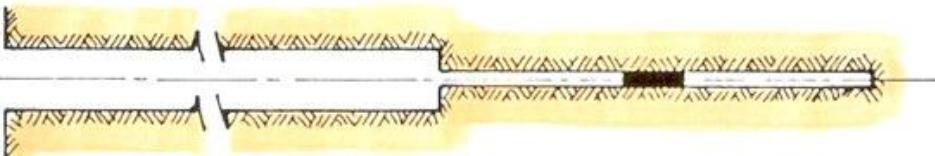


3. MESURE DES CONTRAINTES

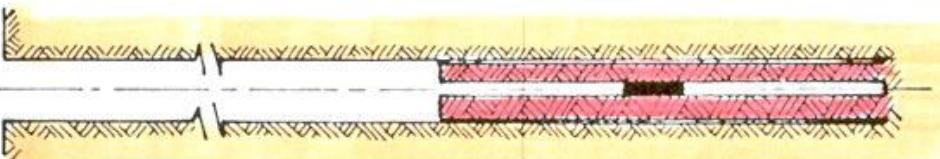
Méthodes par relâchement des contraintes : surcarottage



a. Large diameter borehole drilled to the start of the area in which stress measurements are to be carried out



b. Small diameter pilot hole drilled from end of large hole and stress cell installed in pilot hole



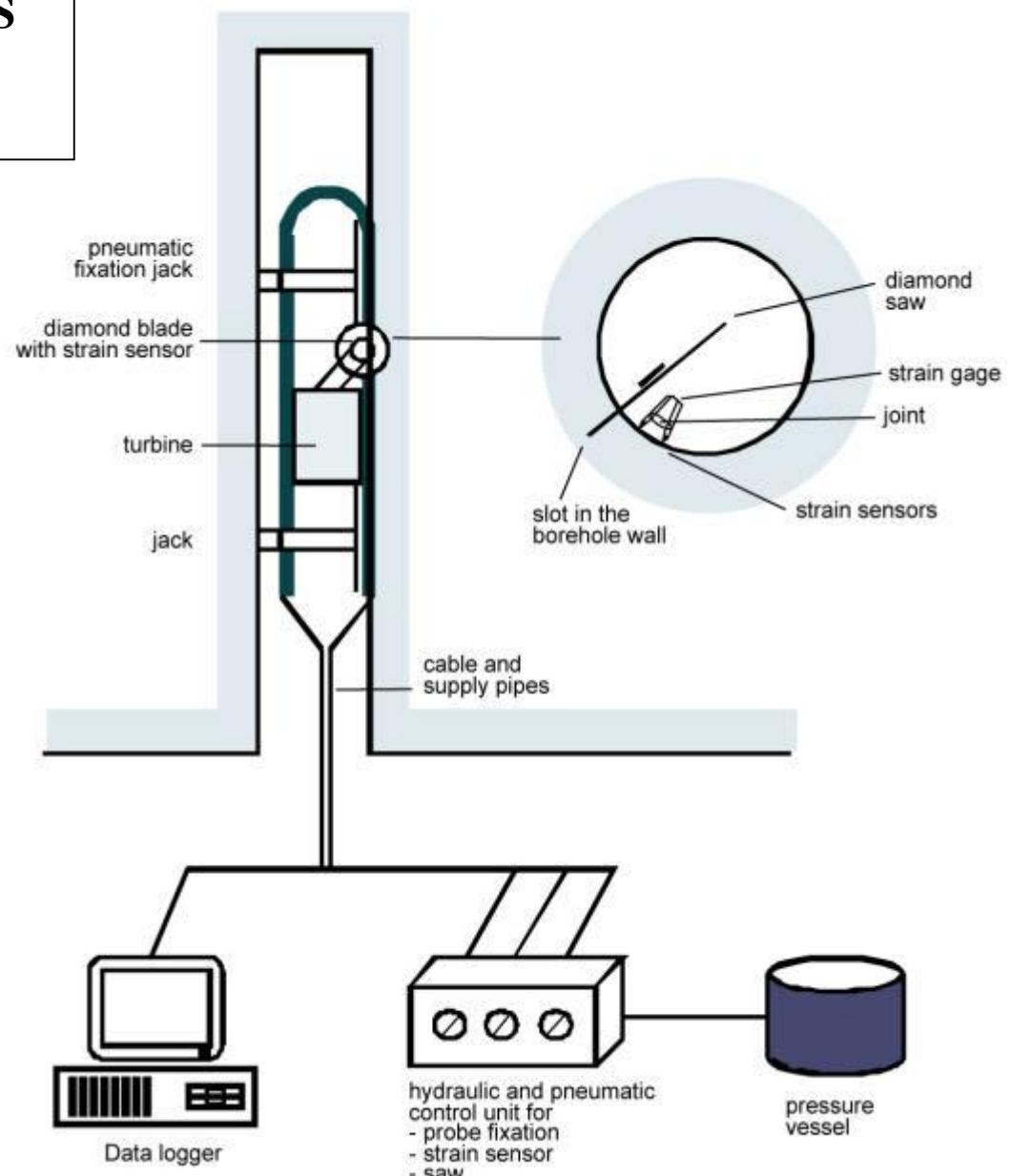
La cellule permet de mesurer la déformation résultant du relâchement des contraintes radiales autour du petit forage



Cellule de déformation pour la mesure des contraintes par surcarottage, développée en Australie (Worotnicki and Walton 1976)

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par relâchement des contraintes : borehole slotter

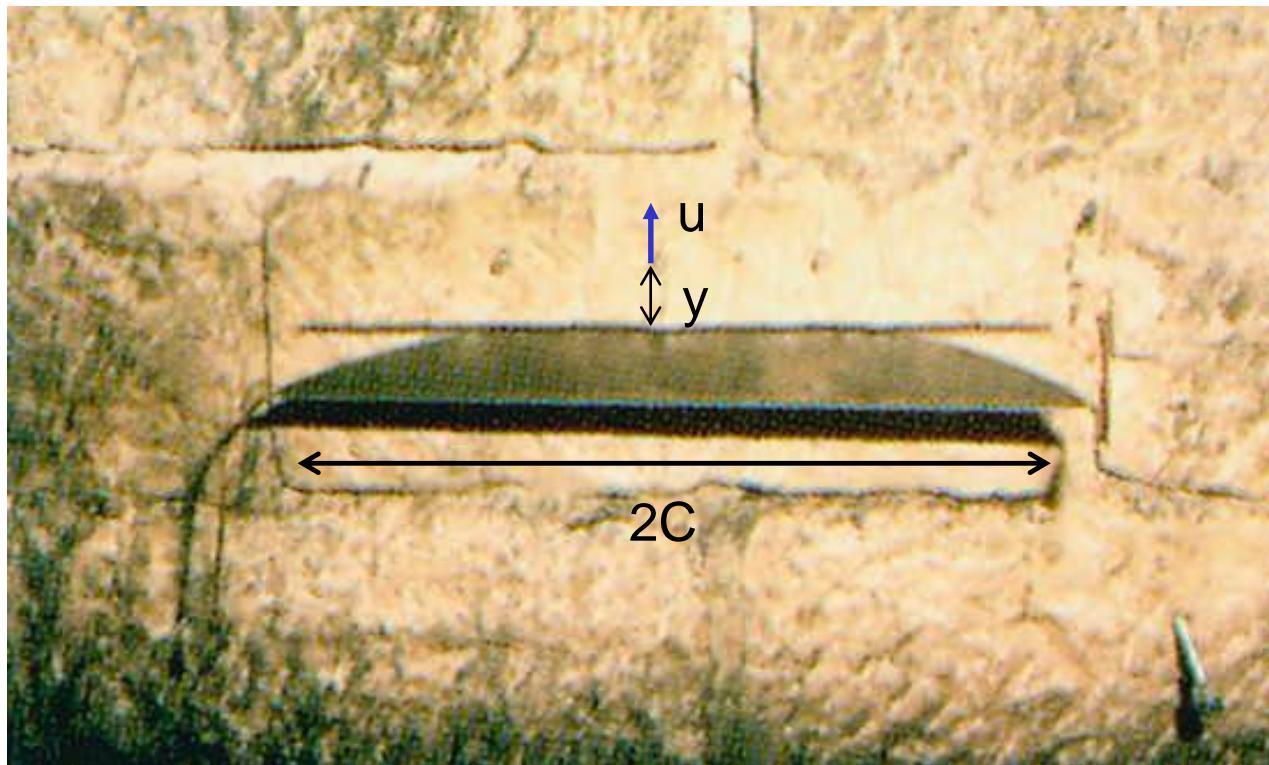


(d'après GIF – Mesure des contraintes primaires, <http://www.gif-ettlingen.de>)

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par rétablissement des contraintes après relâchement

Méthode du vérin plat



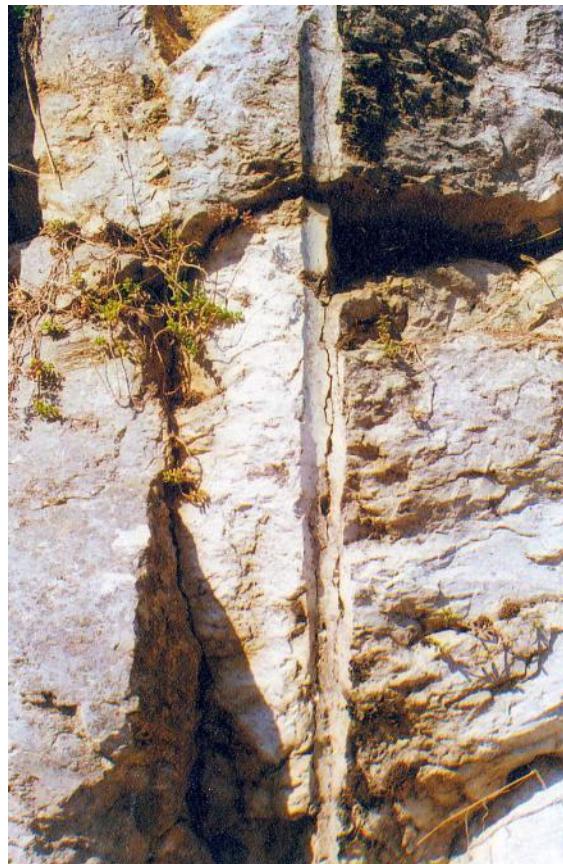
(photo CFMR, 2004)

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par fracturation hydraulique

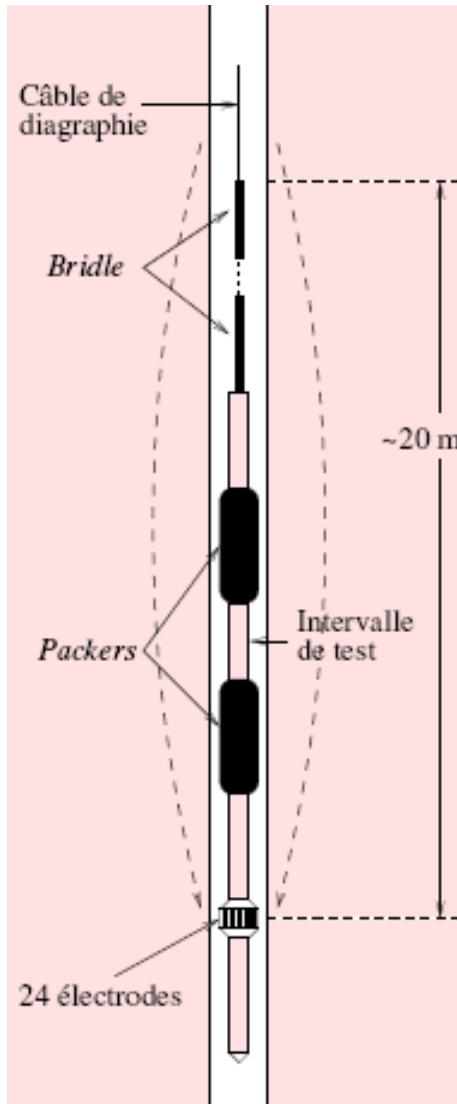
Effet d'une pression appliquée dans un forage : exemple d'un tir de mine

Fractures radiales due à un excès de contrainte orthoradiale de traction



3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par fracturation hydraulique

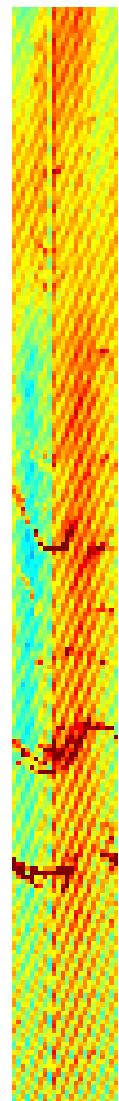


Matériel pour
fracturation
hydraulique
(d'après Fontbonne,
2005)

Obturateurs (packers) pour
injection ou fracturation
hydraulique (*site Roctest*)



Fractures observées
par diagraphie
électrique
(d'après Fontbonne, 2005)



3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par fracturation hydraulique

Cas d'un forage vertical, avec rupture en traction suivant une fracture radiale

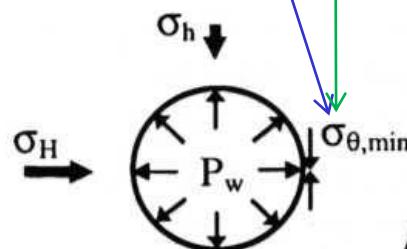
0) without p_w $\sigma_{\theta \min} = 3\sigma_h - \sigma_H$

(roche imperméable)

1) with p_w

$$\sigma_{\theta \min} = 3\sigma_h - \sigma_H - p_w$$

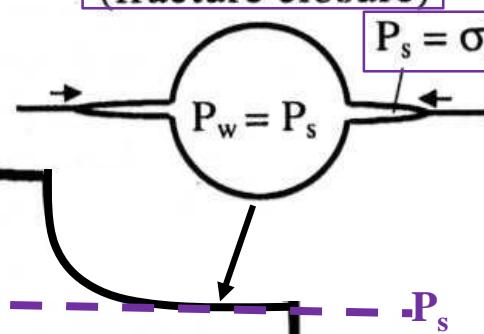
1) Initial conditions



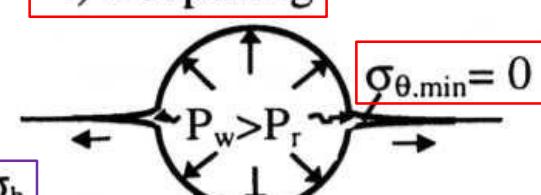
2) Fracturing $\sigma_{\theta \min} \leq -\sigma_t$



3) Shut-in
(fracture closure)



4) Reopening



Pression
(au-dessus de la nappe)

First pressurization

Second pressurization

(d'après Fontbonne, 2005)

3. MESURE DES CONTRAINTES

Méthodes par fracturation hydraulique

Cas d'un forage vertical, avec rupture en traction suivant une fracture radiale

0) without p_w $\sigma_{\theta \min} = 3\sigma_h - \sigma_H$

(roche perméable)

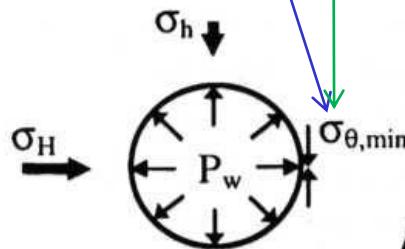
1) with p_w

$$\sigma_{\theta \min} = 3\sigma_h - \sigma_H - p_w$$

2) Fracturing $\sigma_{\theta \min} \leq -\sigma_t$

4) Reopening

1) Initial conditions



3) Shut-in
(fracture closure)

$$P_s = \sigma_h$$

Well-pressure, P_w

Injection flow, Q_w

Time

Pression

(d'après Fontbonne, 2005)

First pressurization

Second pressurization