

Le comportement des roches à grande profondeur

Présentation des recherches menées à la FPMs

Fanny Descamps et Jean-Pierre Tshibangu
fanny.descamps@fpm.s.ac.be

Le comportement des roches à grande profondeur

- Introduction – rappels théoriques
- Mise au point du système triaxial
- Premiers résultats
- Démarche globale
- Conclusions et perspectives

Le comportement des roches à grande profondeur

- **Introduction - rappels théoriques**
- Mise au point du système triaxial
- Premiers résultats
- Démarche globale
- Conclusions et perspectives

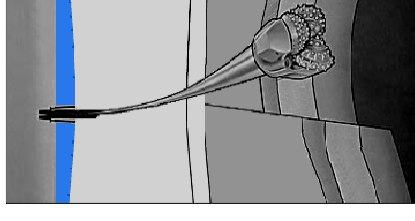
Introduction

Contexte :

- Forages pétroliers profonds
- Conditions de pression et de température sévères
- Exemple : vers 5000 m
 - $\sigma_{hr}, \sigma_v \geq 100$ MPa
 - $p_{\text{pore}} \approx 70$ MPa
 - $t_o \approx 200^\circ\text{C}$



Couplage thermo-hydro-mécanique



Introduction

- Loi de comportement en thermo-poro-élastoplasticité :
potentiel thermodynamique $\psi = \psi(T, \varepsilon_{ij}, m, s^p, \phi_r, \lambda)$

$$[N.D.] \quad [\sigma] = \dot{\varepsilon}^0 + l \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} + 2G \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} - bM \frac{\dot{m}}{r^0} - f \frac{\dot{\phi}_r}{r^0} - 3aKq \quad [1]$$

$$[D.] \quad [\sigma] = \dot{\varepsilon}^0 + l^0 \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} + 2G \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} - b(p - p^0) - 3a^0K^0q \quad [1]$$

$$p = p^0 + M \frac{\dot{m}}{r^0} + 3a_m M q$$

$$S = S^0 + m s_m^0 + 3a K \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} - 3a_m M \frac{\dot{m}}{r^0} - f \frac{\dot{\phi}_r}{r^0} + C \frac{q}{T^0}$$

5

Introduction

7 coefficients indépendants :

- 4 coefficients poroélastiques isothermes :
 - $\lambda^{(0)}$, G , coefficients de Lamé (non-)drainés
 - b , coefficient de Biot
 - M , module de Biot
- 3 coefficients thermiques :
 - $\alpha^{(0)}$, coefficient de dilatation thermique (non-)drainé
 - C_e , chaleur volumique à déformation constante

6

Introduction

- Coefficients élastiques isothermes :

$$[N.D.] \quad [\sigma] = \dot{\varepsilon}^0 + l \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} + 2G \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon}$$

$$[D.] \quad [\sigma] = \dot{\varepsilon}^0 + l^0 \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} + 2G \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon}$$

- Coefficient et module de Biot :

$$p = p^0 + M \frac{\dot{m}}{r^0} + b \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} \quad b = \frac{1}{B_s} \frac{K^0}{K} - \frac{K^0}{K}$$

$$B_s = - \frac{3(p - p_0)}{\operatorname{tr}[\varepsilon]} \quad M = B_s^2 \frac{K^2}{K - K^0}$$

7

Introduction

- Coefficients de dilatation :

$$[N.D.] \quad 0 = l \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} + 2G \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} - 3aKq \quad [1]$$

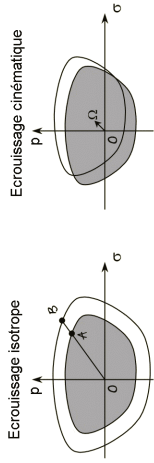
$$[D.] \quad 0 = l^0 \operatorname{tr} \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} + 2G \dot{\varepsilon} - e_p \dot{\varepsilon} - 3a^0K^0q \quad [1]$$

- Chaleur volumique : mesures en calorimétrie

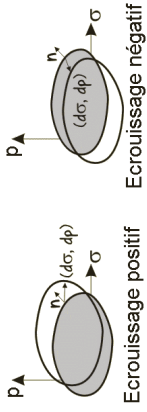
8

Introduction

- Critère de plasticité : quand y a-t-il évolution des déformations et de la porosité plastiques ?



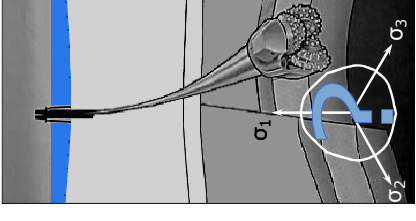
- Règle d'écoulement : comment ?



9

Introduction

- Questions :
 - Comment évoluent les courbes d'écrouissage avec la profondeur ?
 - Que deviennent les enveloppes limites dans les conditions de grande profondeur ?

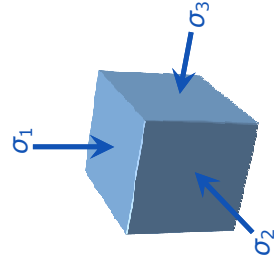


10

Introduction

Moyens disponibles

- Système polyaxial (véritable triaxial) :
 - ✓ 3 contraintes principales différentes
 - ✓ Confinement jusque 100 MPa
 - ✗ Pas de pression de pore
 - ✗ Pas de contrôle en température

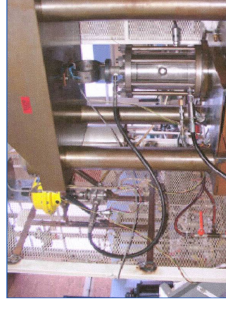
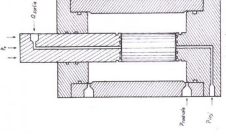


11

Introduction

Moyens disponibles

- Système triaxial :
 - ✓ Pression de pore
 - ✗ Confinement limité à 30 MPa
 - ✗ Pas température
 - ✗ Contrôle manuel inadapté au nombre de paramètres à contrôler

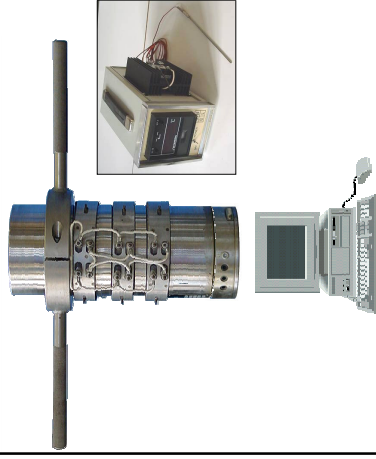


12

Introduction

Moyens disponibles

- Développement d'un nouveau système triaxial :



- Cellule triaxiale avec provisions pour fluide de pore et système de chauffe
- Gestion automatisée pour permettre des essais triaxiaux avec contrôle de la pression de pore et de la température

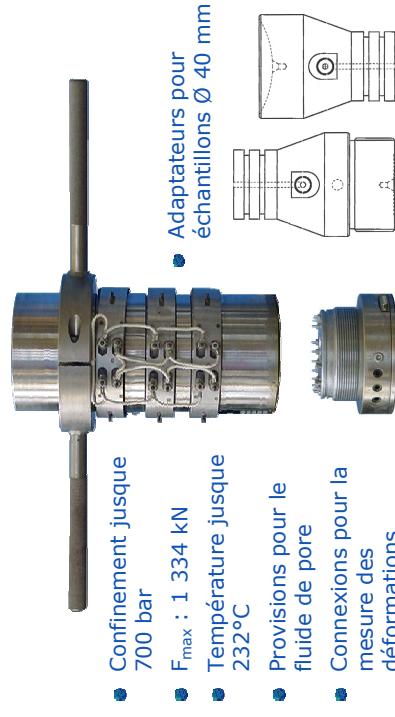
13

Le comportement des roches à grande profondeur

- Introduction
- **Mise au point du système triaxial**
- Premiers résultats
- Démarche globale
- Conclusions et perspectives

14

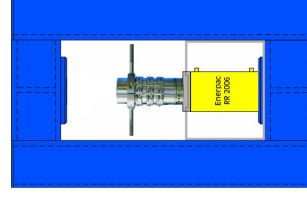
Mise au point d'un système triaxial automatisé



- Confinement jusque 700 bar
- F_{max} : 1 334 kN
- Température jusque 232°C
- Provisions pour le fluide de pore
- Connexions pour la mesure des déformations
- Adaptateurs pour échantillons Ø 40 mm

15

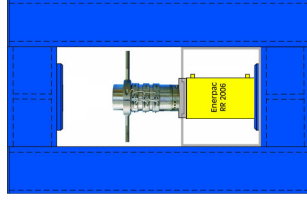
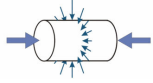
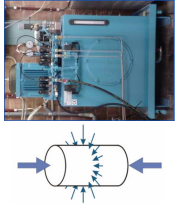
Mise au point d'un système triaxial automatisé



- Bâti :
 - Assemblage de poutrelles HEM260
 - Rigidité globale : $3 \cdot 10^9$ N/m
 - Vérin double effet 200 t

16

Mise au point d'un système triaxial automatisé

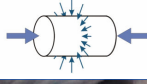


17

Mise au point d'un système triaxial automatisé

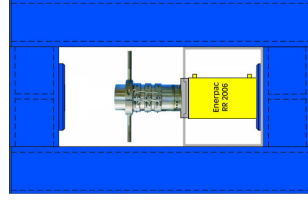
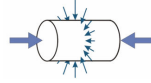
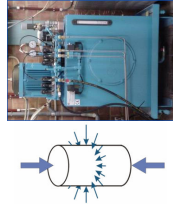
Banc hydraulique :

- Contrainte axiale et confinement
- Pompe à 2 débits
- Automatisation :
 - Distributeurs à commande électromagnétique
 - Electrovanes
 - Carte d'acquisition-commande dans le PC



18

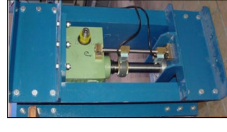
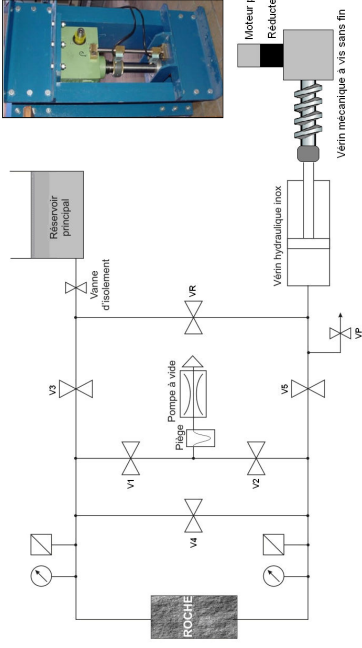
Mise au point d'un système triaxial automatisé



1

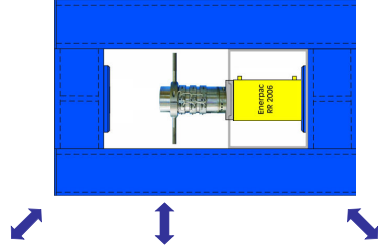
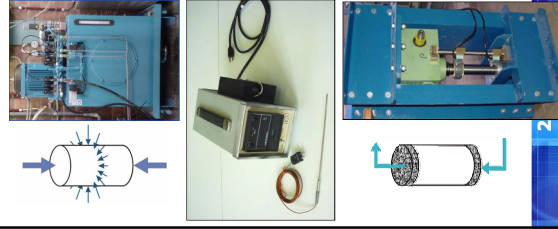
Mise au point d'un système triaxial automatisé

- Circuit de fluide de pore : dimensionné jusque 700 bar



20

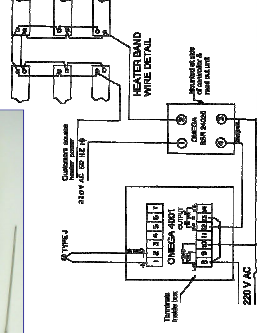
Mise au point d'un système triaxial automatisé



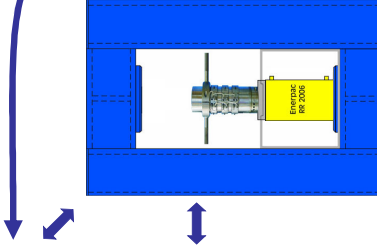
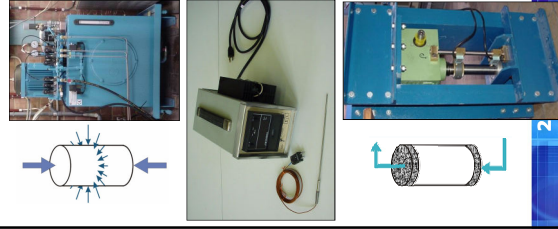
Mise au point d'un système triaxial automatisé



- Contrôle en température :
 - Thermocouple type J
 - 3 résistances chauffantes sur la cellule
 - Electronique de contrôle :
 - Bloc de puissance pour alimenter les résistances
 - Régulateur à partir de la mesure du thermocouple



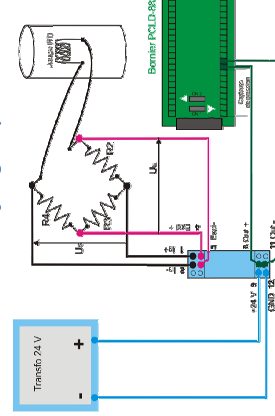
Mise au point d'un système triaxial automatisé



Mise au point d'un système triaxial automatisé

Mesure des déformations

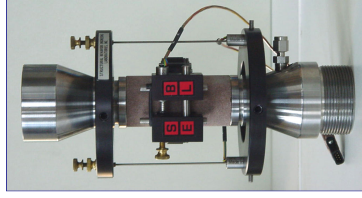
- Jauges de déformation :
 - Pont complété par 3 résistances de précision (350 Ω)
 - Module ADAM : alimentation et amplification
 - Possibilité de connecter 4 jauges (2 axiales et 2 latérales)



Mise au point d'un système triaxial automatisé

Mesure des déformations

- Extensomètres :
 - LVDT avec une plage de ± 2.54 mm
 - 2 extensomètres axiaux
 - 1 extensomètre circonférentiel
 - Conditionneur de signal



25

Mise au point d'un système triaxial automatisé

Partie logicielle

- Objectifs :
 - Gestion des essais
 - Traitement des résultats
 - Evolutif
- Méthode :
 - Programmation orientée objet
 - Expérience en Turbo Pascal

} Delphi

26

Le comportement des roches à grande profondeur

- Introduction
- Mise au point du système triaxial
- **Premiers résultats**
- Démarche globale
- Conclusions et perspectives

29

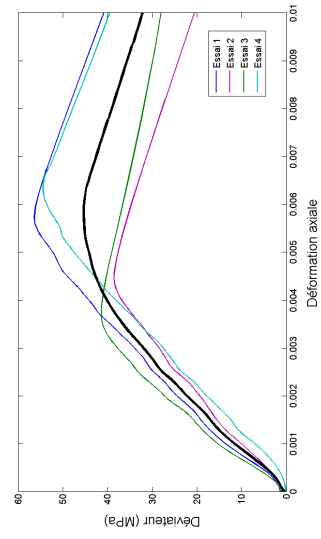
Premiers résultats

- Essais triaxiaux à des confinements de 0, 10 et 20 MPa
- Essais uniaxiaux à des températures de 25, 50 et 75°C
- Roche : Grès des Vosges
 - Composition :
 - 70 à 95 % quartz
 - feldspaths, argiles, oxydes et micas
 - Porosité :
 - environ 20%
 - presque totalement connectée

30

Premiers résultats

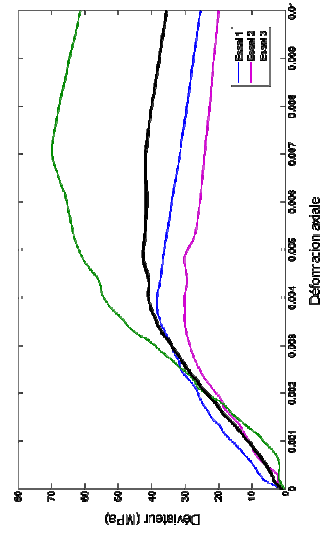
- Essais triaxiaux conventionnels : confinement nul



31

Premiers résultats

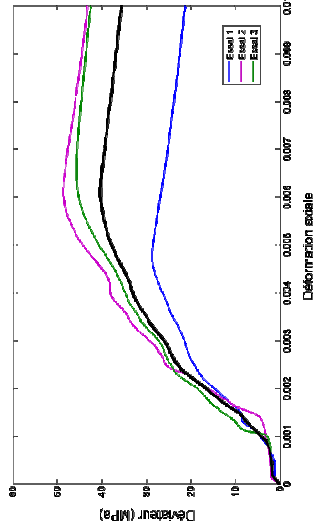
- Essais triaxiaux conventionnels : confinement 10 MPa



32

Premiers résultats

- Essais triaxiaux conventionnels : confinement 20 MPa



33

Premiers résultats

Confin. (MPa)	σ_E (MPa)	ϵ_E	σ_R (MPa)	ϵ_R	E (MPa)	P_R (MPa)	Q_R (MPa)
0	44	0,00438	51	0,00559	9 965	17	51
10	41	0,00245	57	0,00561	16 831	26	47
20	43	0,00211	66	0,00599	19 183	35	46

- Influence du confinement sur :
 - la résistance : augmente
 - la plastification : rupture fragile (uniaxial) puis plastification augmente
 - le module d'Young : augmente
 - le comportement post-rupture : apparition d'une résistance résiduelle

34

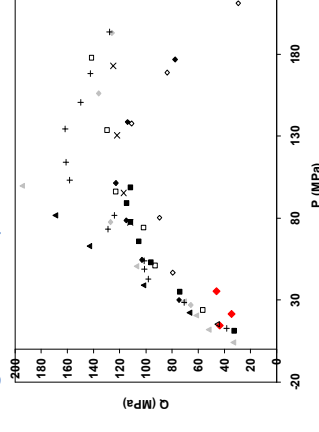
Premiers résultats

- Comparaison avec les résultats d'autres chercheurs :
 - Module d'Young : valeurs proches de Gatelier et al. (2002)
 - E = 11 000 MPa en compression uniaxiale
 - E = 25 000 MPa à 25 MPa de confinement
 - Déformations : moindres que celles données dans les courbes d'érouissage de Bésuelle et al. (2003)

35

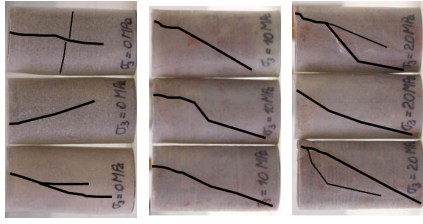
Premiers résultats

- Comparaison avec les résultats d'autres chercheurs :
 - Plan (P,Q) : plage de contrainte moyenne limitée mais ordres de grandeur comparables

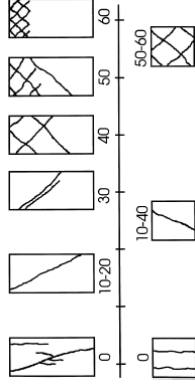


36

Premiers résultats



- Angle de rupture des échantillons :
 - Fissure subverticale en compression uniaxiale
 - Angle de rupture augmente avec le confinement
 - Semblable aux résultats de Bésuelle et al. (2000)



37

Premiers résultats

- Essais uniaxiaux avec température :

T° (°C)	σ_E (MPa)	ϵ_E	σ_R (MPa)	ϵ_R	E (MPa)	P_R (MPa)	Q_R (MPa)
25	44	0,00438	51	0,00559	9 965	17	51
50	55	0,00615	62	0,00738	10 689	21	62
75	48	0,00492	51	0,00566	10 069	17	51

- Comparaison avec les travaux d'autres chercheurs : Homand-Etienne et Houpert (1999) sur le Grès à Voltzia
 - Résistance presque constante de 20 à 400°C
 - Module d'Young : diminue -15% à 75°C ➔ nécessité d'un étalonnage des extensomètres en fonction de la température

38

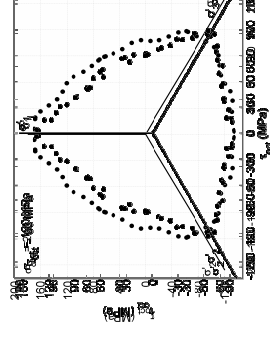
Le comportement des roches à grande profondeur

- Introduction
- Mise au point du système triaxial
- Premiers résultats
- **Démarche globale**
- Conclusions et perspectives

39

Démarche globale

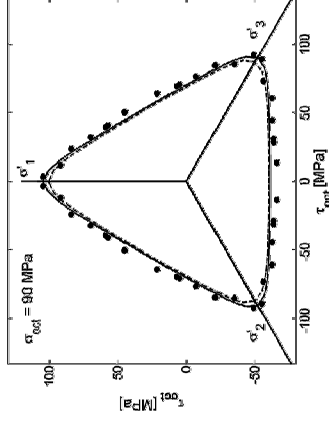
- Essais polyaxiaux :
 - Enveloppes limites tridimensionnelles
 - Evolution de la forme de l'enveloppe avec la contrainte moyenne



40

Démarche globale

- Modélisation des enveloppes limites octaédriques :



Critère de Kim-Lade :

$$R_t = 8 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = 2,4 \cdot 10^{23}$$

$$m = 6,41$$

Critère d'Ewv :

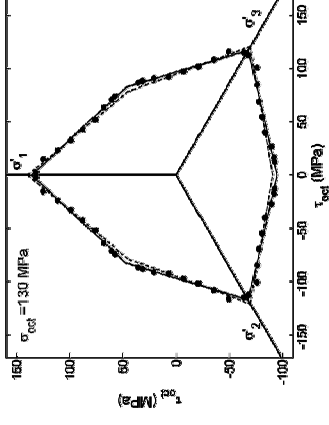
$$S = R_t = 8 \text{ MPa}$$

$$\eta_1 = 209$$

41

Démarche globale

- Modélisation des enveloppes limites octaédriques :



Critère de Mohr-Coulomb

Méthode 1 :

$$q = 2,78$$

$$C_0 = 224 \text{ MPa}$$

$$\varphi = 28,1^\circ$$

$$C = 67 \text{ MPa}$$

Méthode 2 :

$$q = 3,72$$

$$C_0 = 200 \text{ MPa}$$

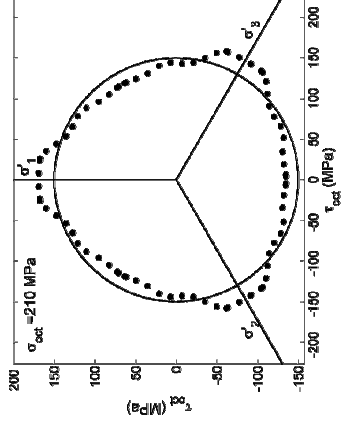
$$\varphi = 35,5^\circ$$

$$C = 52 \text{ MPa}$$

42

Démarche globale

- Modélisation des enveloppes limites octaédriques :



Critère de Drucker-Prager

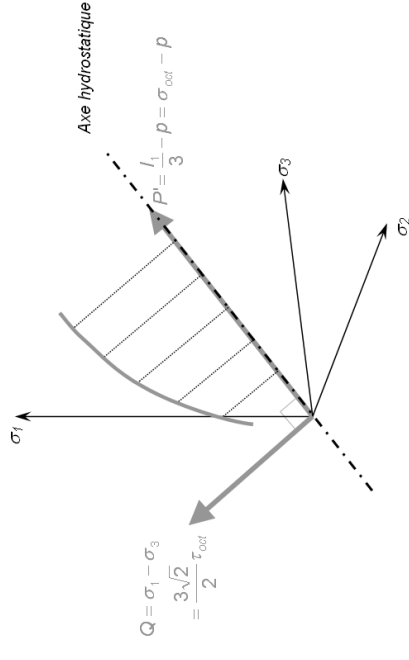
$$a = -0,728$$

$$k = 33,4$$

$$\text{Rayon du cercle} = 152 \text{ MPa}$$

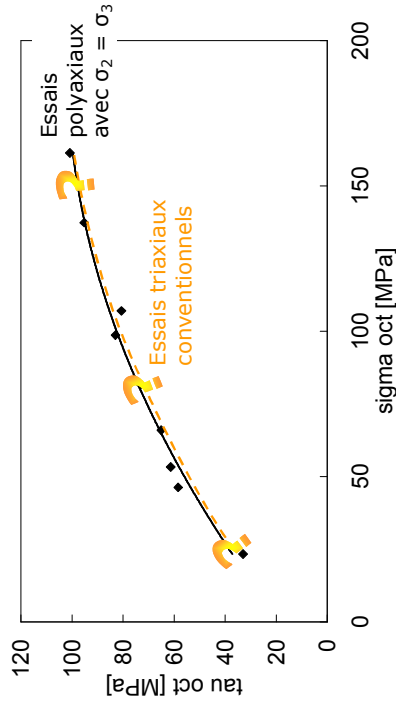
43

Démarche globale



44

Démarche globale

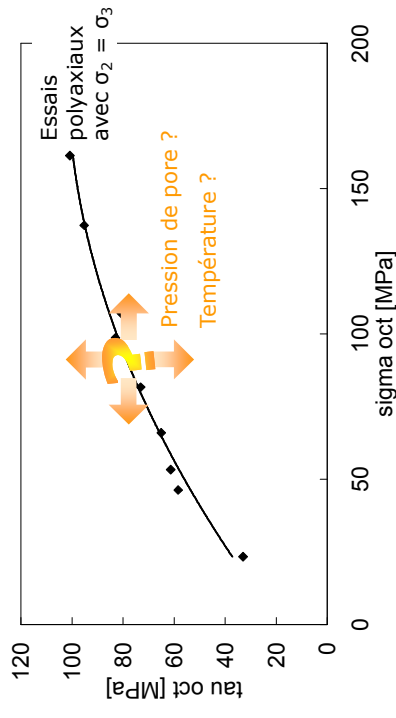


45

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS



Démarche globale



46

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS



Le comportement des roches à grande profondeur

- Introduction
- Mise au point du système triaxial
- Premiers résultats
- Démarche globale
- **Conclusions et perspectives**

47

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS



Conclusions et perspectives

- Comportement des roches à grande profondeur :
 - Etats de contrainte véritables triaxiaux, jusque 100 MPa de confinement
 - Pressions de pore : x 10 MPa
 - Température : jusque 200°C
- Démarche utilisée à la FPMs :
 - Combinaison d'un système polyaxial et d'un triaxial
 - Triaxial pour contrôler la pression de pore et la température

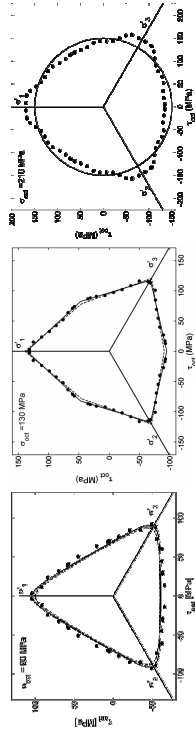
48

FACULTÉ POLYTECHNIQUE DE MONS



Conclusions et perspectives

- Essais polyaiaux : étude de l'évolution des enveloppes limites octaédrique avec la contrainte moyenne



- Essais triaxiaux : évolution de ces enveloppes avec la pression de pore et la température