

# Mesure des vitesses de déformation du sel sous faibles chargements mécaniques

J.F. Béraud, P.Bérest, J.P.Charpentier, V. de Greef,  
H.Gharbi, F.Valès

Laboratoire de Mécanique des Solides - École Polytechnique

**B.Brouard**

Brouard Consulting

**P.A. Blum**

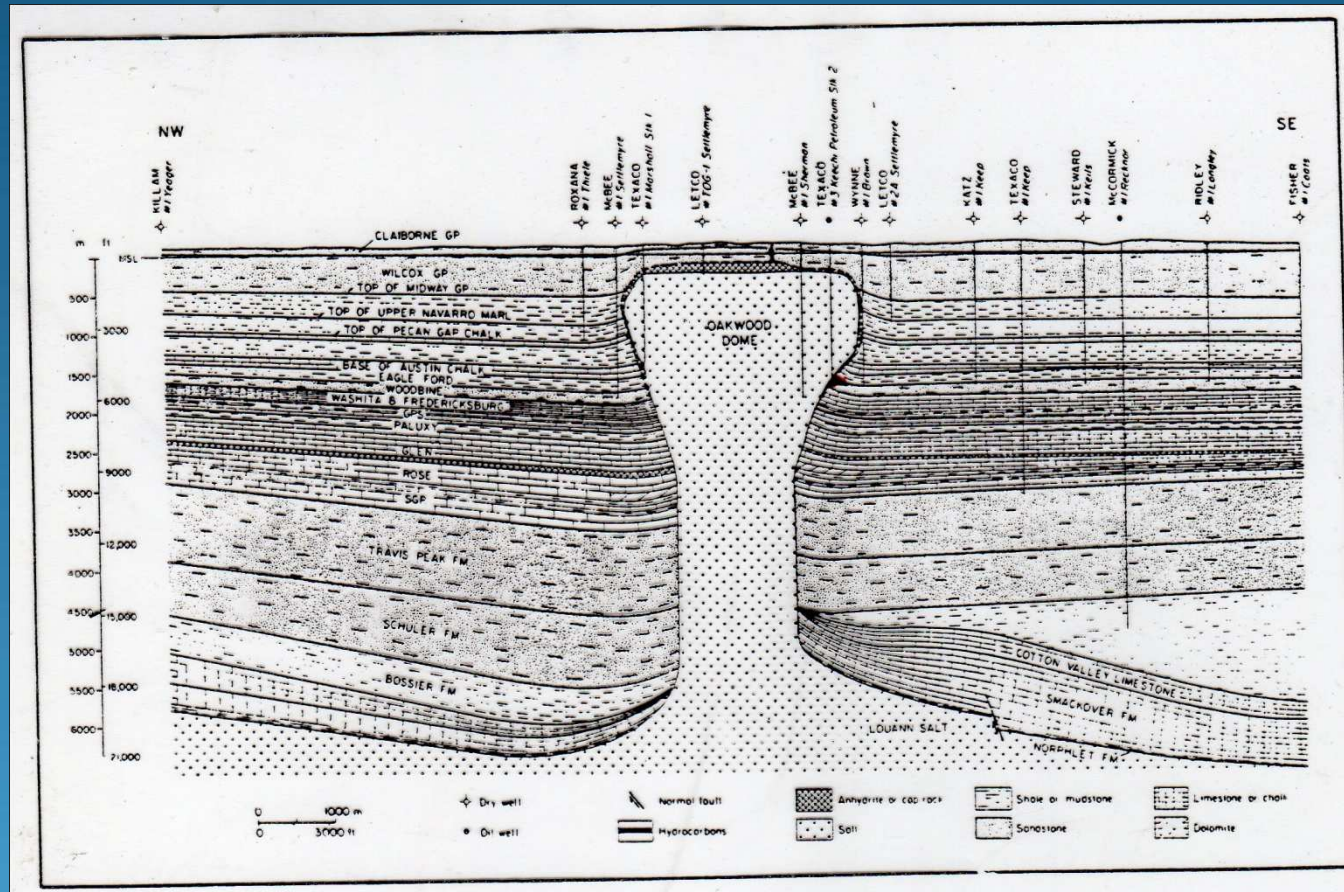
Institut de Physique du Globe – Paris



# Essais de fluage faible vitesse

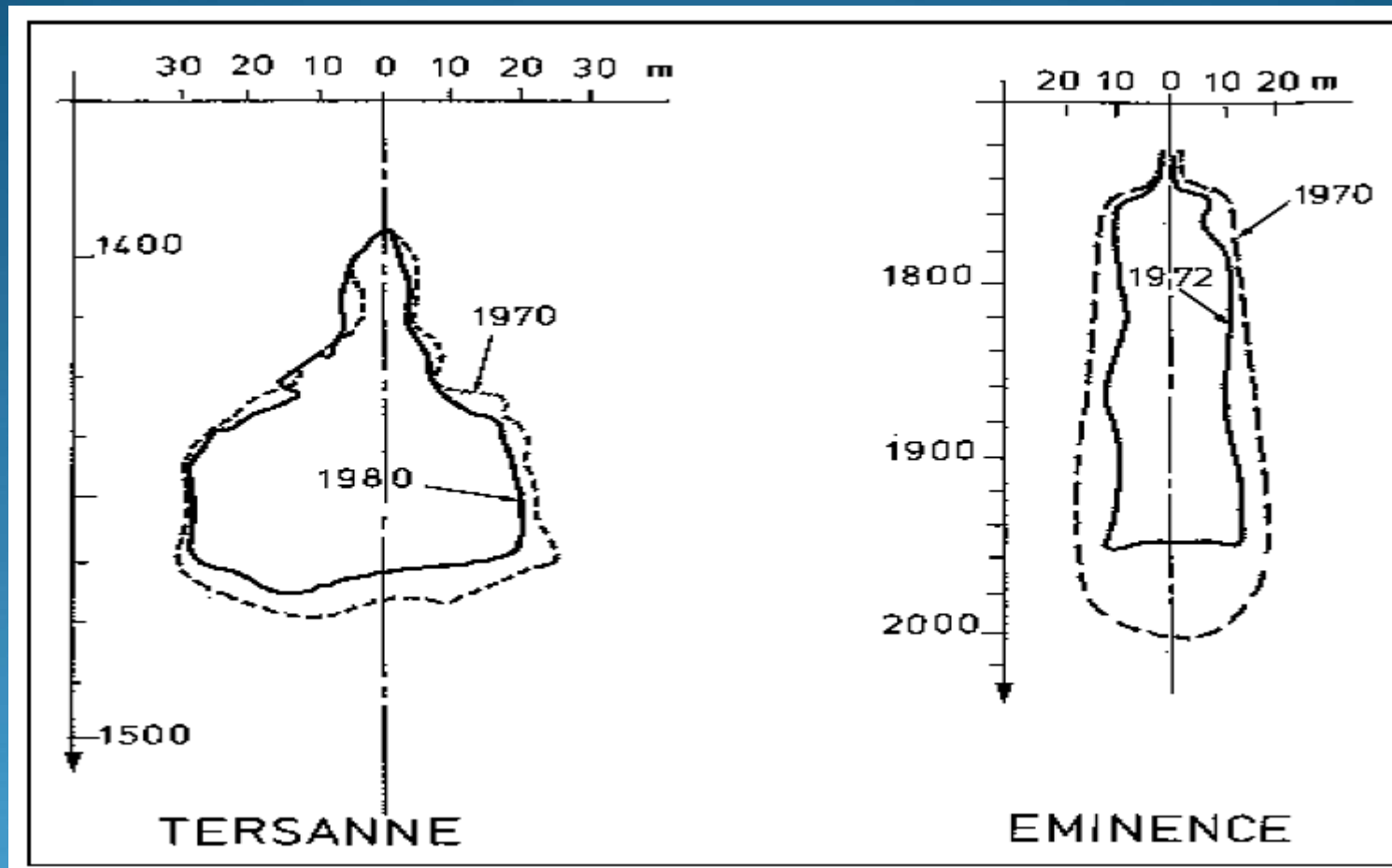
1. Comportement du sel
2. Difficultés soulevées par les faibles vitesses
3. Dispositions retenues
4. Le problème de la température
5. Principaux résultats
6. Conséquences pour le comportement des cavités

# DOMES DE SEL

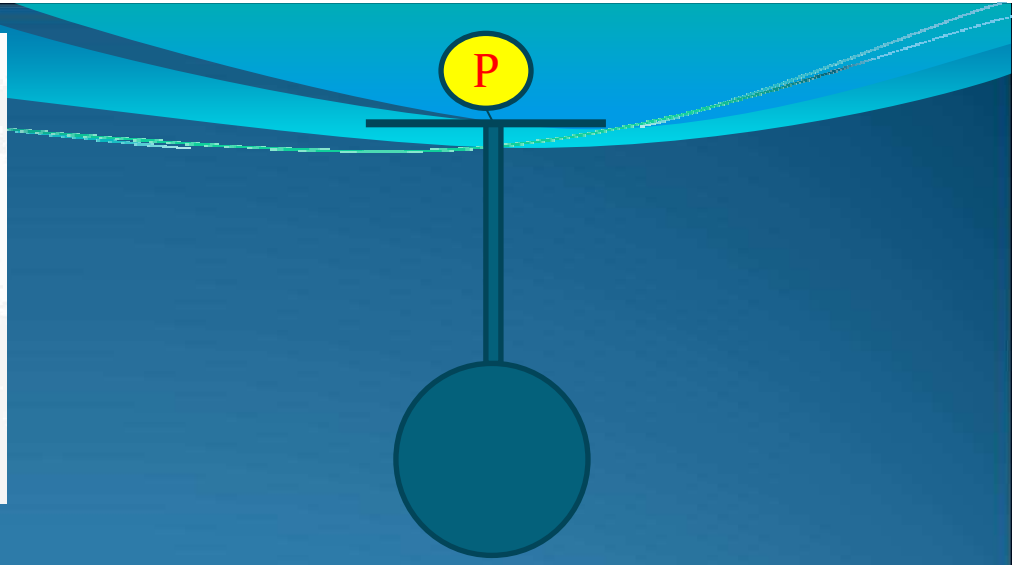
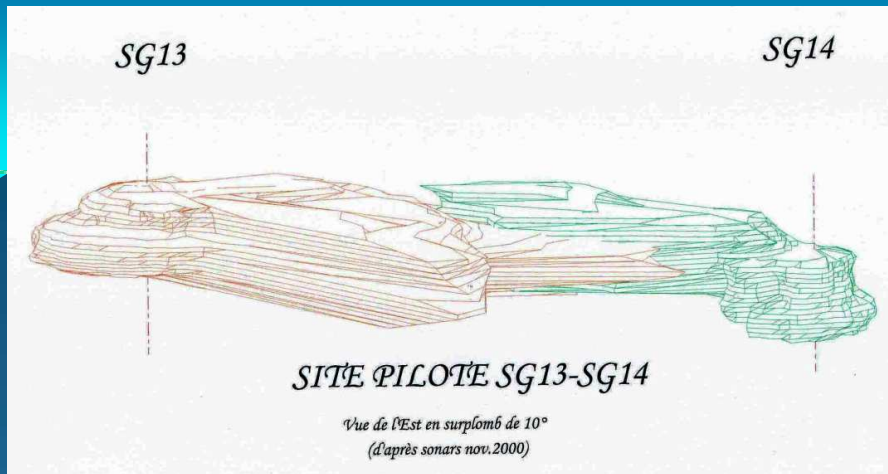


$$(1 \text{ mm/an}) / (1 \text{ km}) \sim 3 \cdot 10^{-14} \text{ s}^{-1}$$

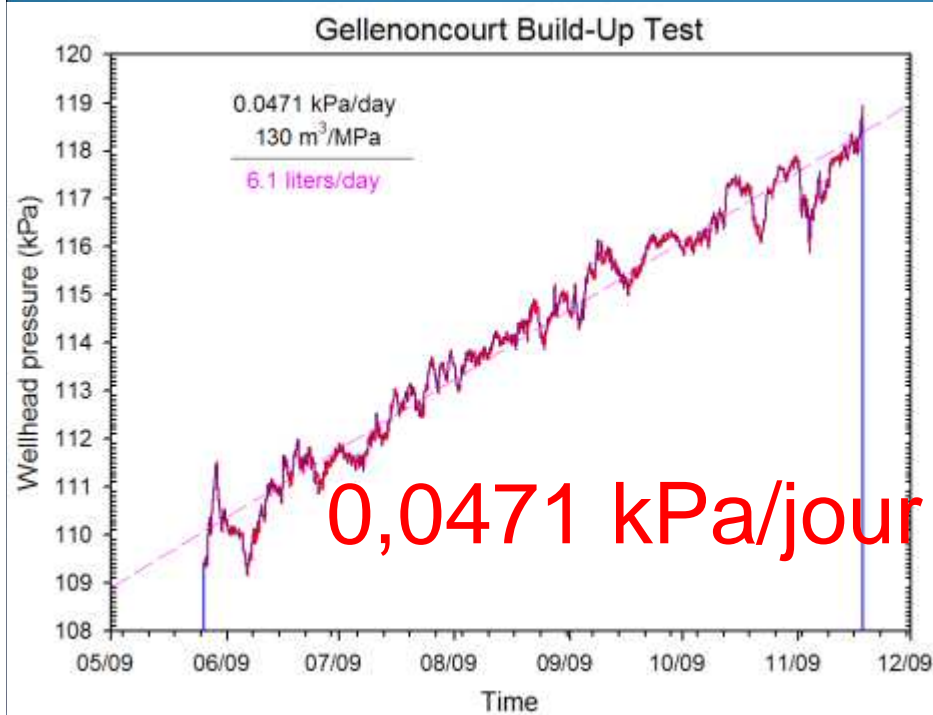
# CAVERNES SOUTERRAINES PROFONDES



(1%/an) ~  $3 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$

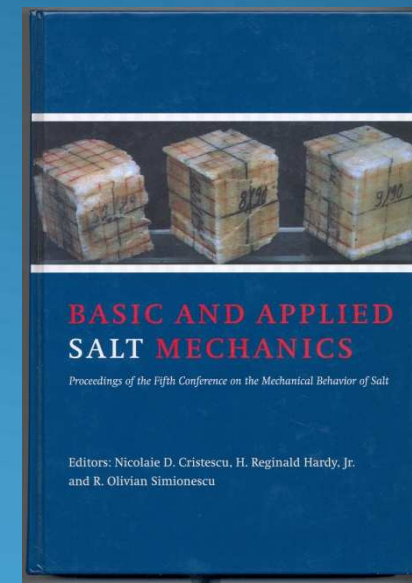
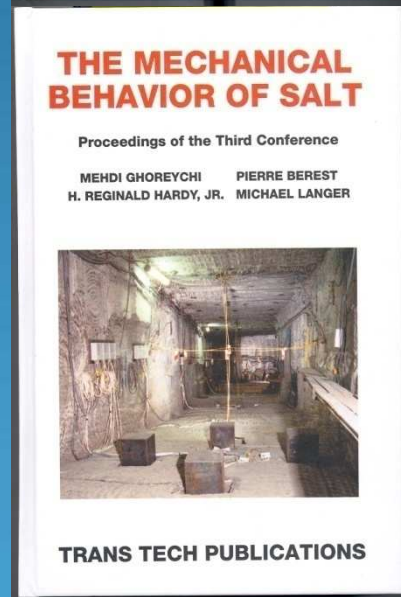
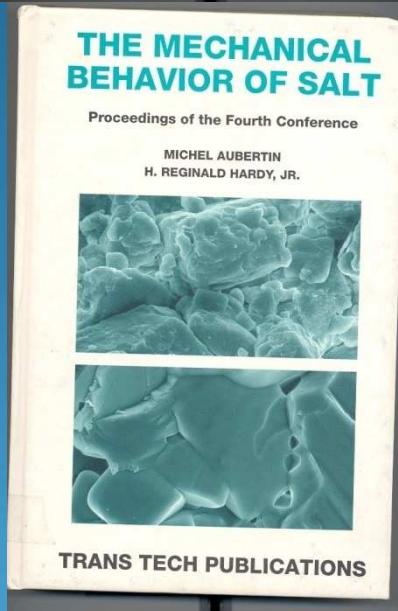
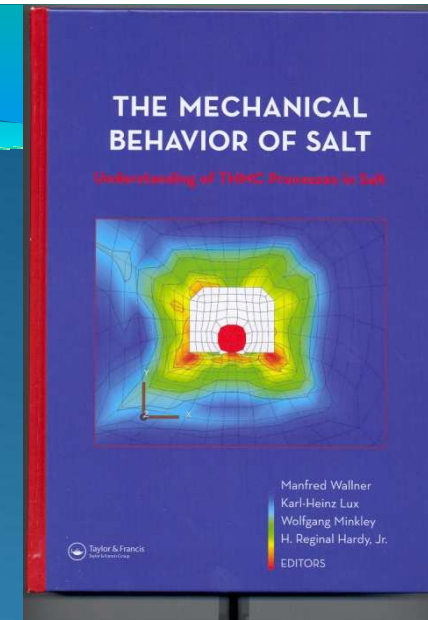
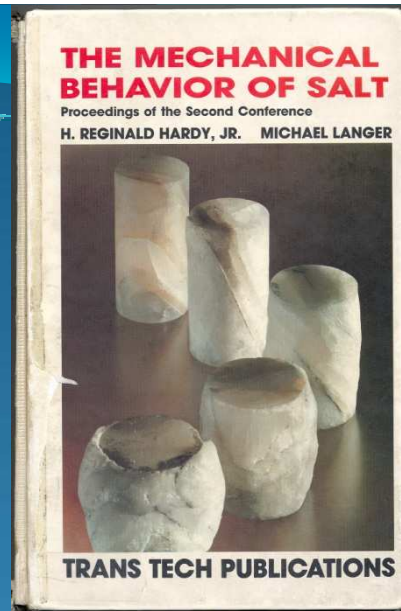
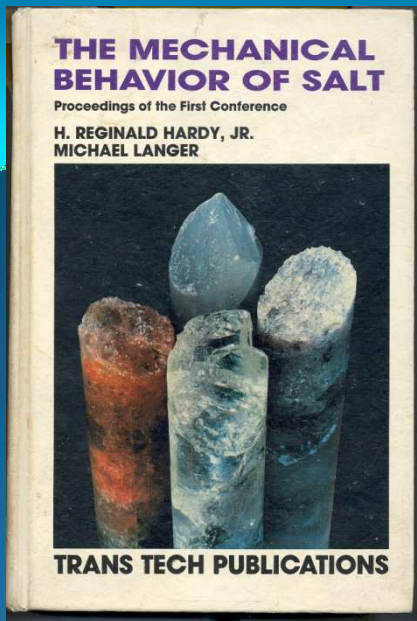


Gellenoncourt, CSME  
250 m de profondeur



$3 \cdot 10^{-13} / s$

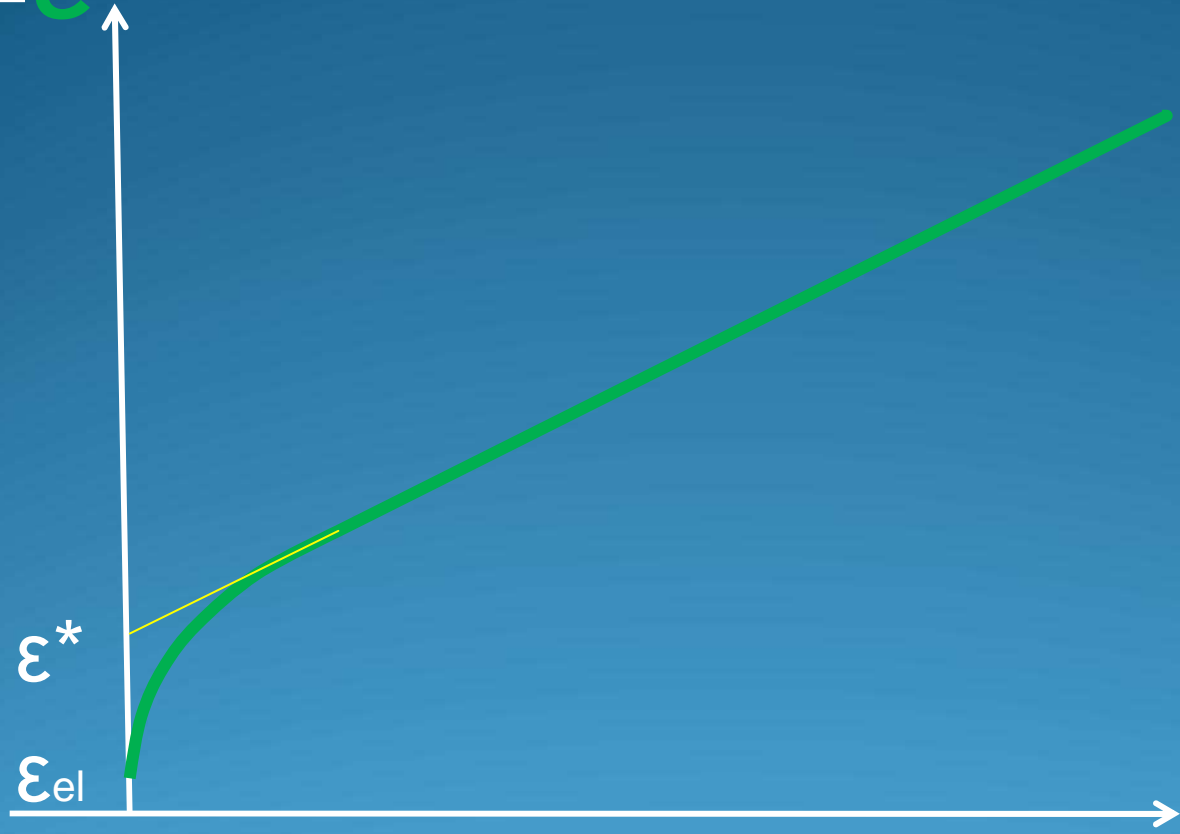




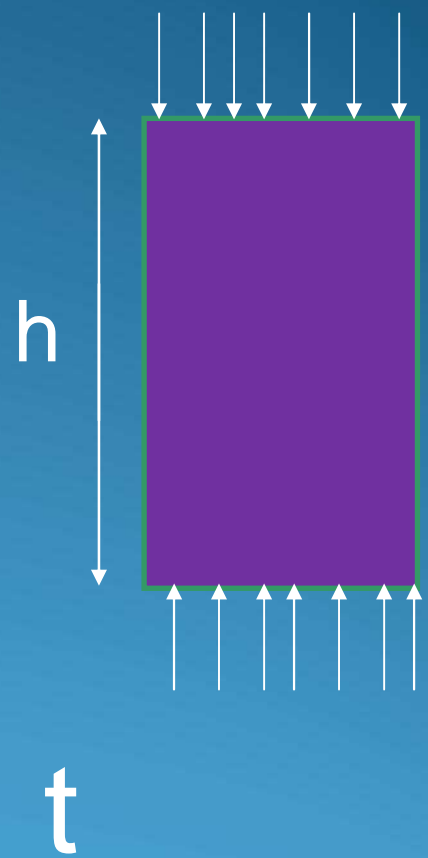
La 7<sup>ème</sup> Conférence se tiendra à l'Ecole des Mines, 17-19 avril 2012

CFMR. 10 juin 2010

$$\Delta h / h = \epsilon$$

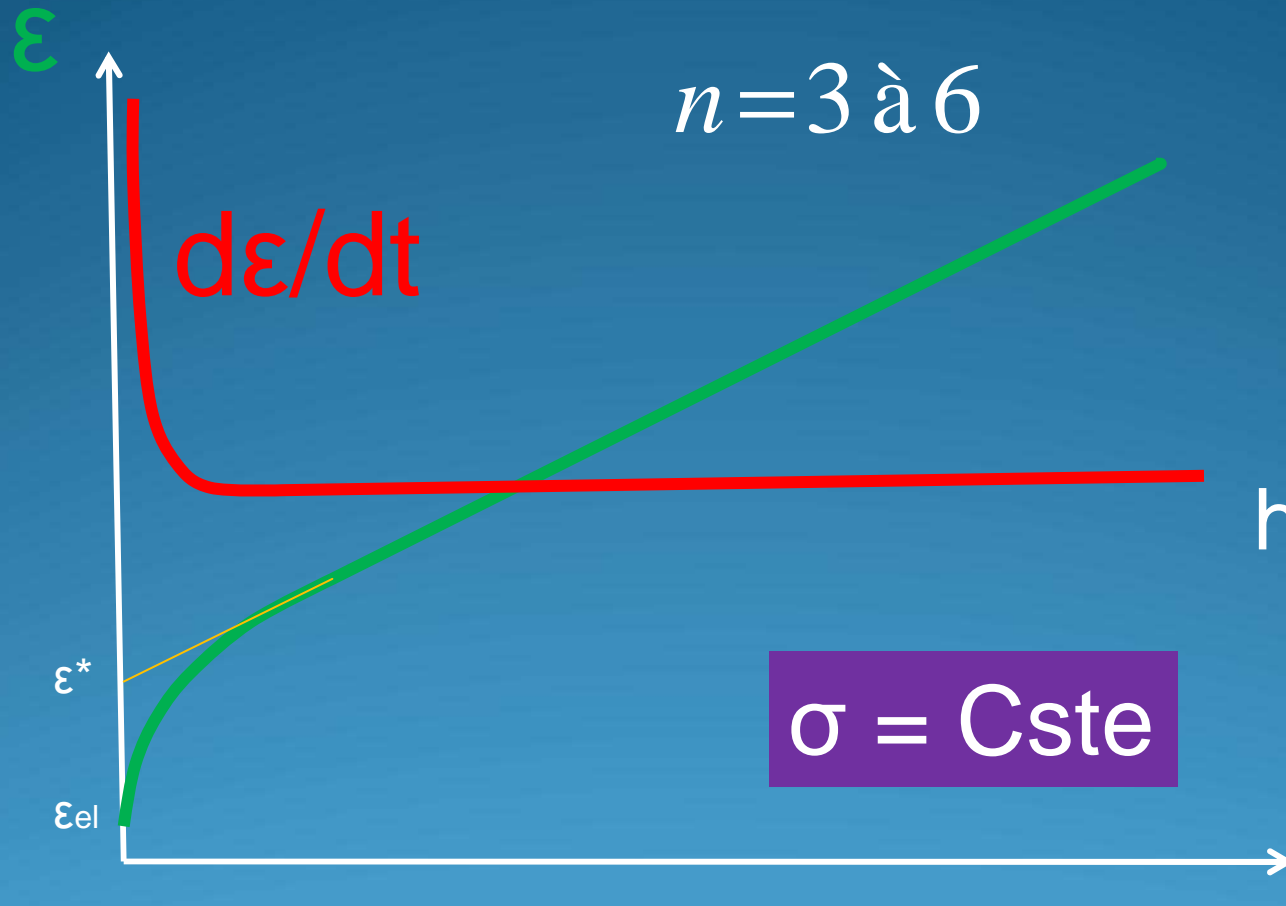


$$\sigma = Cste$$



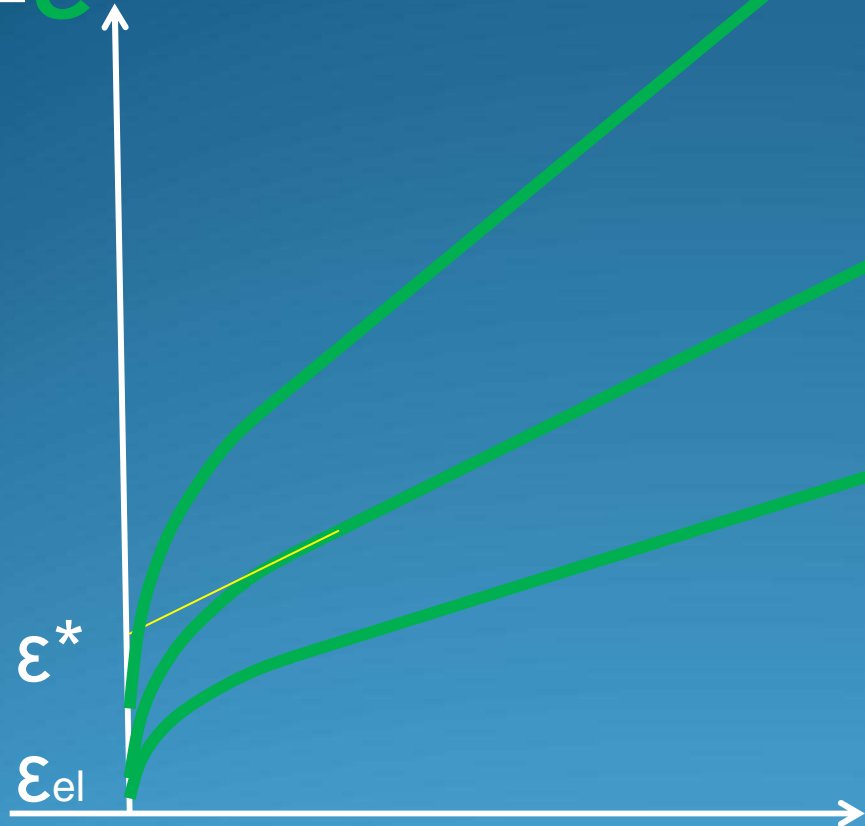
$$d\varepsilon/dt = A(T) \sigma^n$$

$$n = 3 \text{ à } 6$$





$$\Delta h / h = \epsilon$$



$$\dot{\epsilon}^{vp} = A(T) \sigma^n$$

$$n = 3 \text{ à } 6$$

T : 20°C à 80°C,  $\sigma$  : 5 à 20 MPa

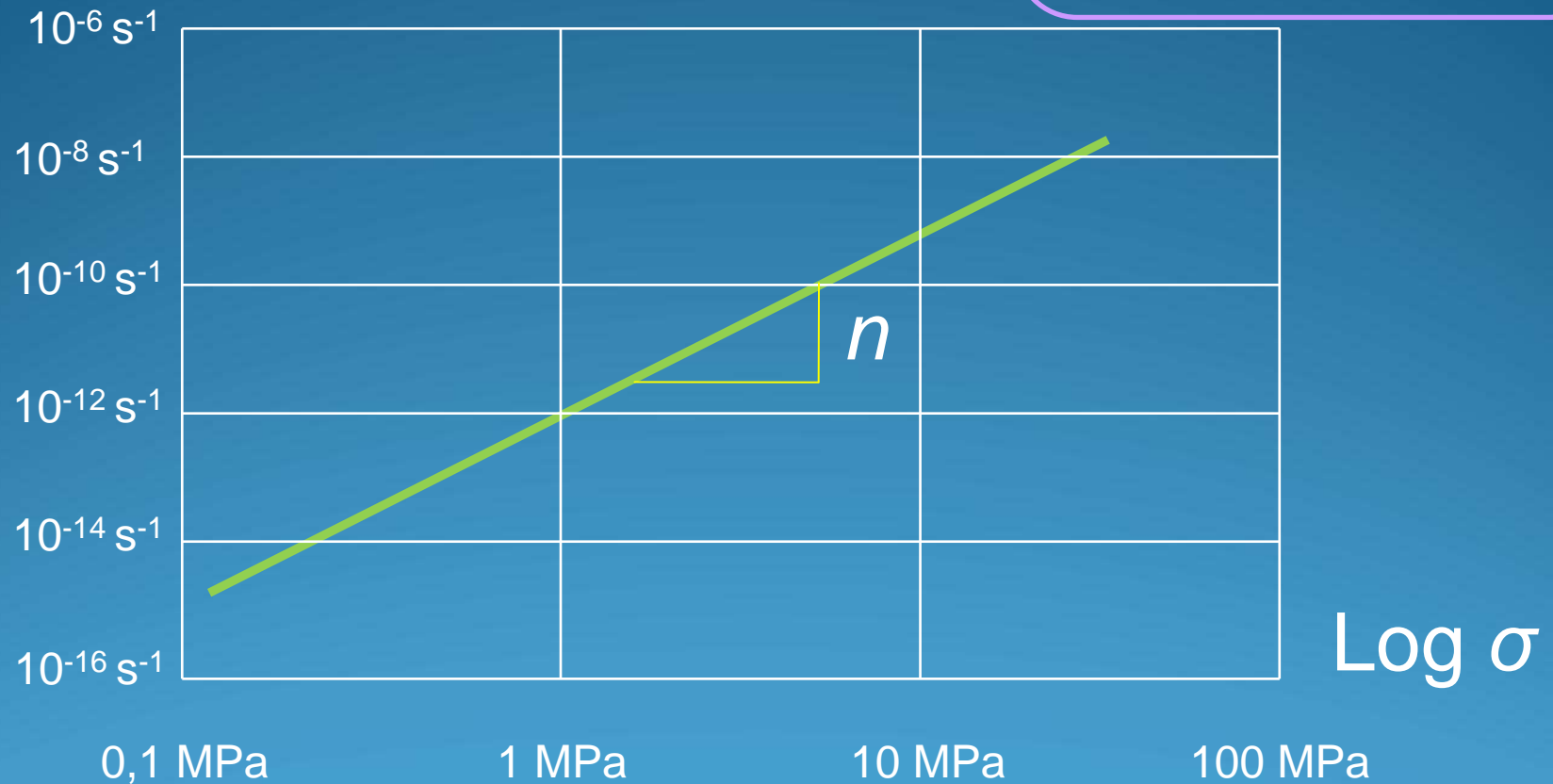
# Parameters of the Norton-Hoff law

No	Facility	$n$	$T^* = Q/R$ (K)	$A^*$ (year <sup>-1</sup> .MPa <sup>-<math>n</math>)</sup>
1	Avery Island (after D.V.)	3.14	6495	$1.30 \cdot 10^4$
2	WIPP	5.0	5035	1.04
3	Salado (WIPP7)	5.09	8333	$3.67 \cdot 10^4$
4	Asse (after W.)	6.25	9969	$2.51 \cdot 10^4$
5	West Hackberry (WH1)	4.73	6606	452.31
6	West Hackberry (WH2)	4.99	10766	0.94
7	Bryan Mound (BM3C)	4.54	7623	$1.32 \cdot 10^3$
8	Bryan Mound (BM4C)	5.18	8977	$1.04 \cdot 10^5$
9	Bayou Choctaw (BC1)	4.06	5956	64.03
10	Etrez	3.1	4100	0.64
11	Avery Island (after S. and al.)	4.0	6565	2081
12	Salina	4.1	8715	$2.7752 \cdot 10^5$
13	Palo Duro - Unit 4	5.6	9760	$1.806 \cdot 10^5$
14	Palo Duro - Unit 5	5.3	9810	$2.52 \cdot 10^5$
15	Asse (B.G.R.)	5.0	6495	65.7

$$\dot{\epsilon}^{vp} = A(T) \sigma^n$$

$$n = 3 \text{ à } 6$$

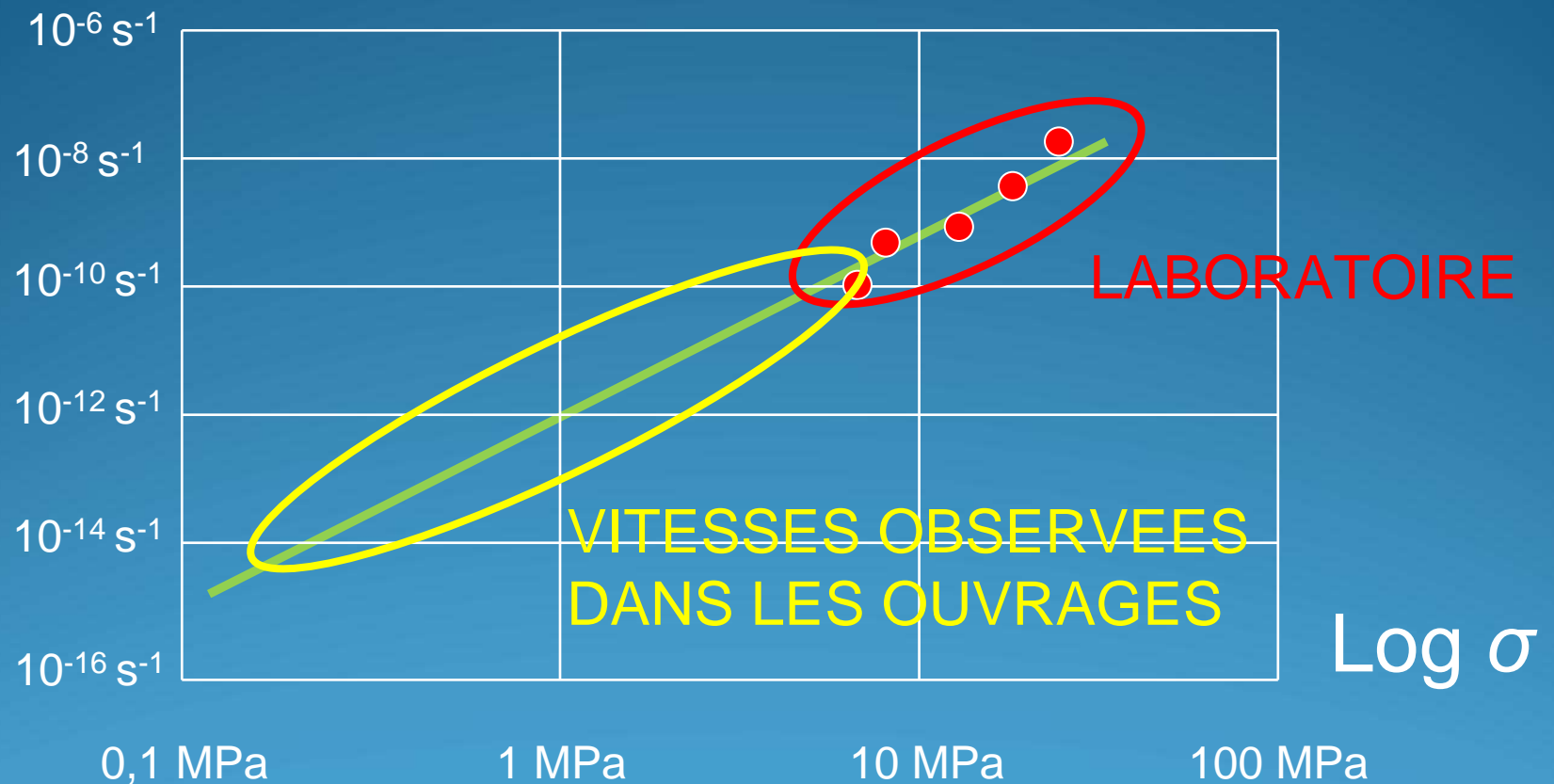
Log  $\dot{\epsilon}$



$$\dot{\epsilon}^{vp} = A(T) \sigma^n$$

$$n = 3 \text{ à } 6$$

Log  $\dot{\epsilon}$



# Essais de fluage faible vitesse

1. Comportement du sel
2. **Difficultés soulevées par les faibles vitesses**
3. Dispositions retenues
4. Le problème de la température
5. Principaux résultats
6. Conséquences pour le comportement des cavités



# Problèmes posés par le fluage à petites charges et petites vitesses (1)

Les bâtis de fluage servo-contrôlés de mécanique des roches sont dimensionnés pour la gamme de contrainte

$$\sigma = 5 - 30 \text{ MPa}$$

# Problèmes posés par le fluage à petites charges et petites vitesses (2)

- On vise la mesure de taux de déformation

$$\dot{\epsilon} = \dot{H} / H \approx 10^{-12} s^{-1} \quad (10^{-7} \text{ jour}^{-1})$$

- L' éprouvette a une hauteur  $H = 0,1 \text{ m}$

En un jour le déplacement est  $\Delta H = 0,01 \text{ micromètre}$

## Problèmes posés par le fluage à petites charges et petites vitesses (3)

On vise la mesure de taux de fluage établi

$$\dot{\epsilon} \approx 10^{-12} s^{-1} \quad (3 \times 10^{-5} an^{-1})$$

Le coefficient de dilatation thermique du sel est

$$\alpha = 4 \times 10^{-5} / ^\circ C$$

Une variation de température de  $\Delta T = 1^\circ C$   
a le même effet ( $\alpha \Delta T$ ) qu'une année de fluage établi

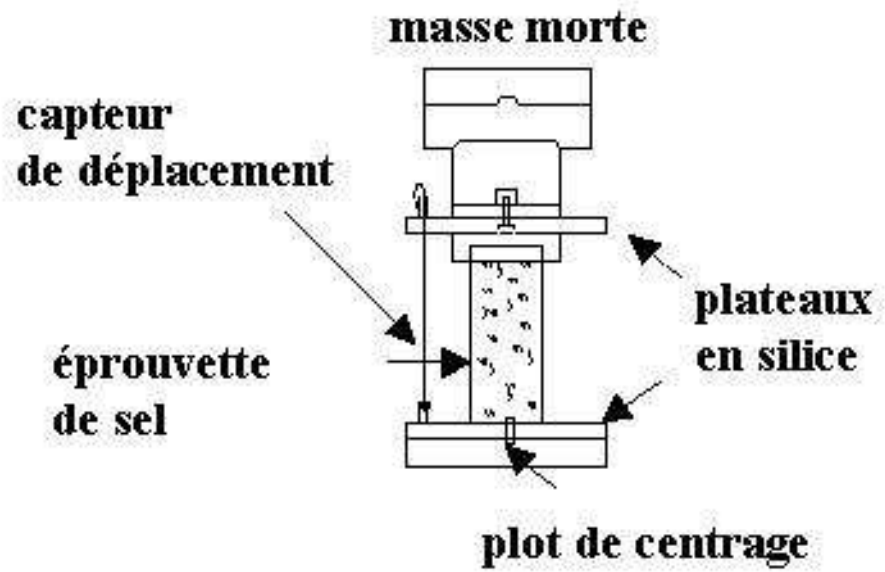
# Essais de fluage faible vitesse

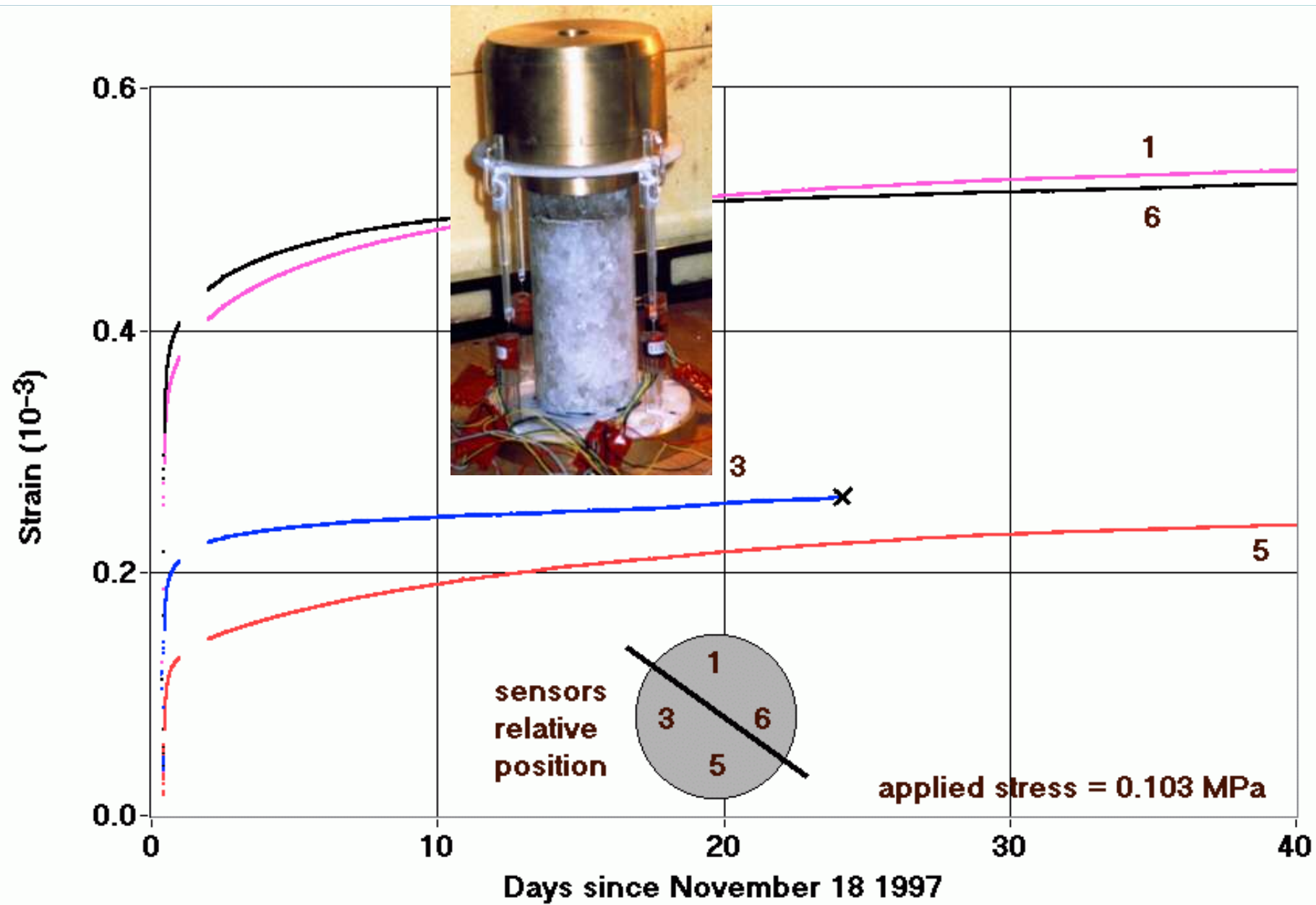
1. Comportement du sel
2. Difficultés soulevées par les faibles vitesses
3. **Dispositions retenues**
4. Le problème de la température
5. Principaux résultats
6. Conséquences pour le comportement des cavités

Pour résoudre ces problèmes :

(1) On applique des charges mortes







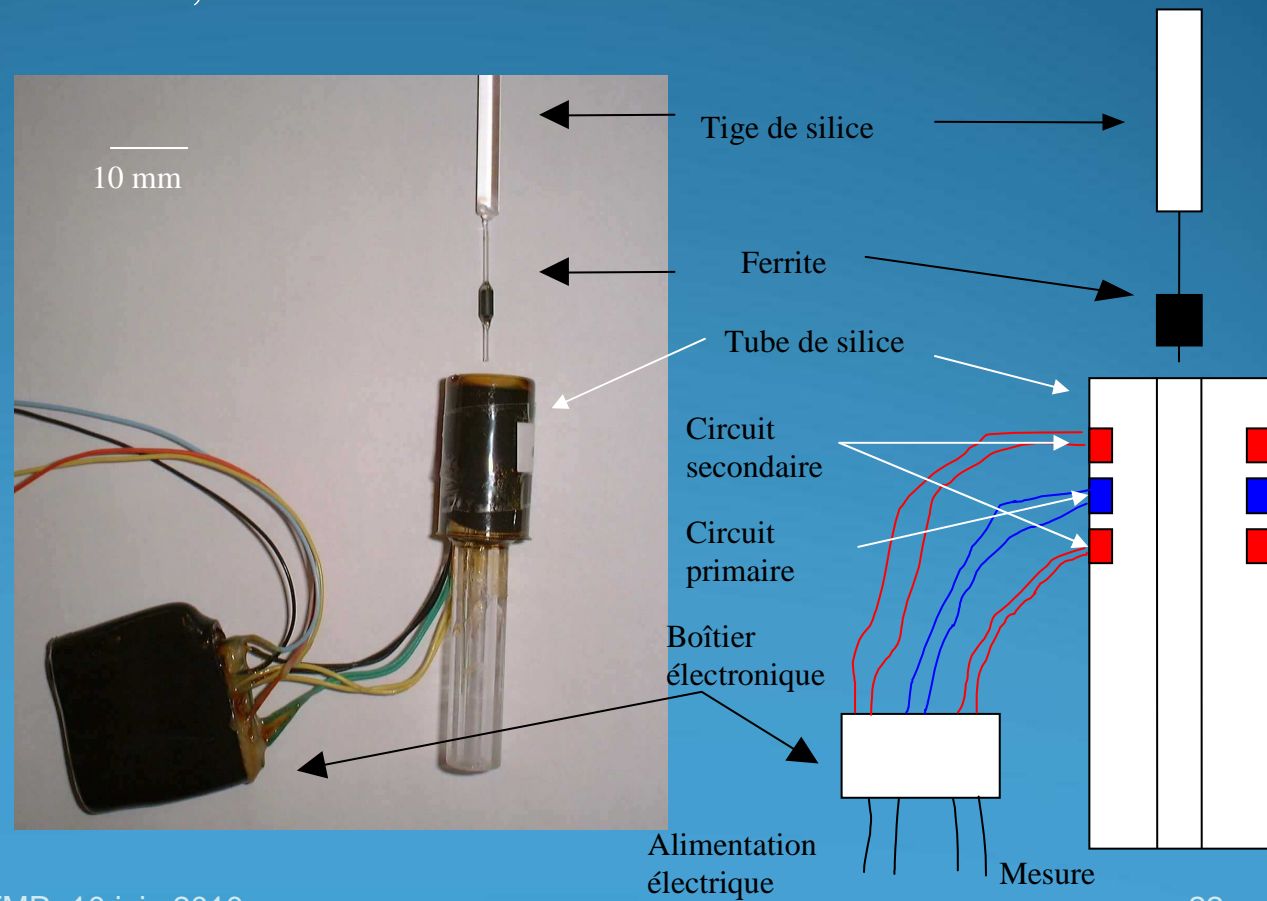
Pour résoudre ces problèmes :

- (1) On applique des charges mortes
- (2) Les capteurs de déplacement ont une résolution du nanomètre

# Capteur de déplacement LVDT

(conception P.A.Blum - IPGP) :

- transformateur différentiel,
- corps en silice,
- course de 2 mm
- résolution de l'ordre du nanomètre,
- stabilité



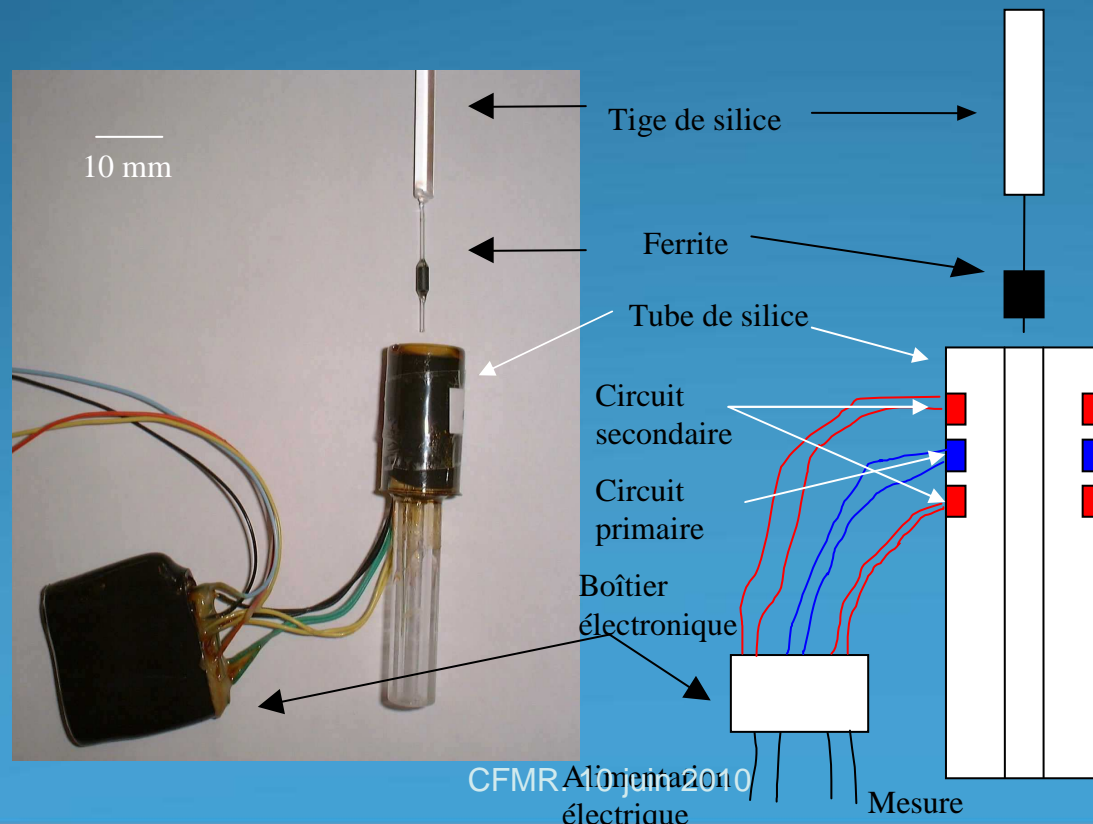
# Capteur de déplacement LVDT

(conception P.A.Blum - IPGP) :

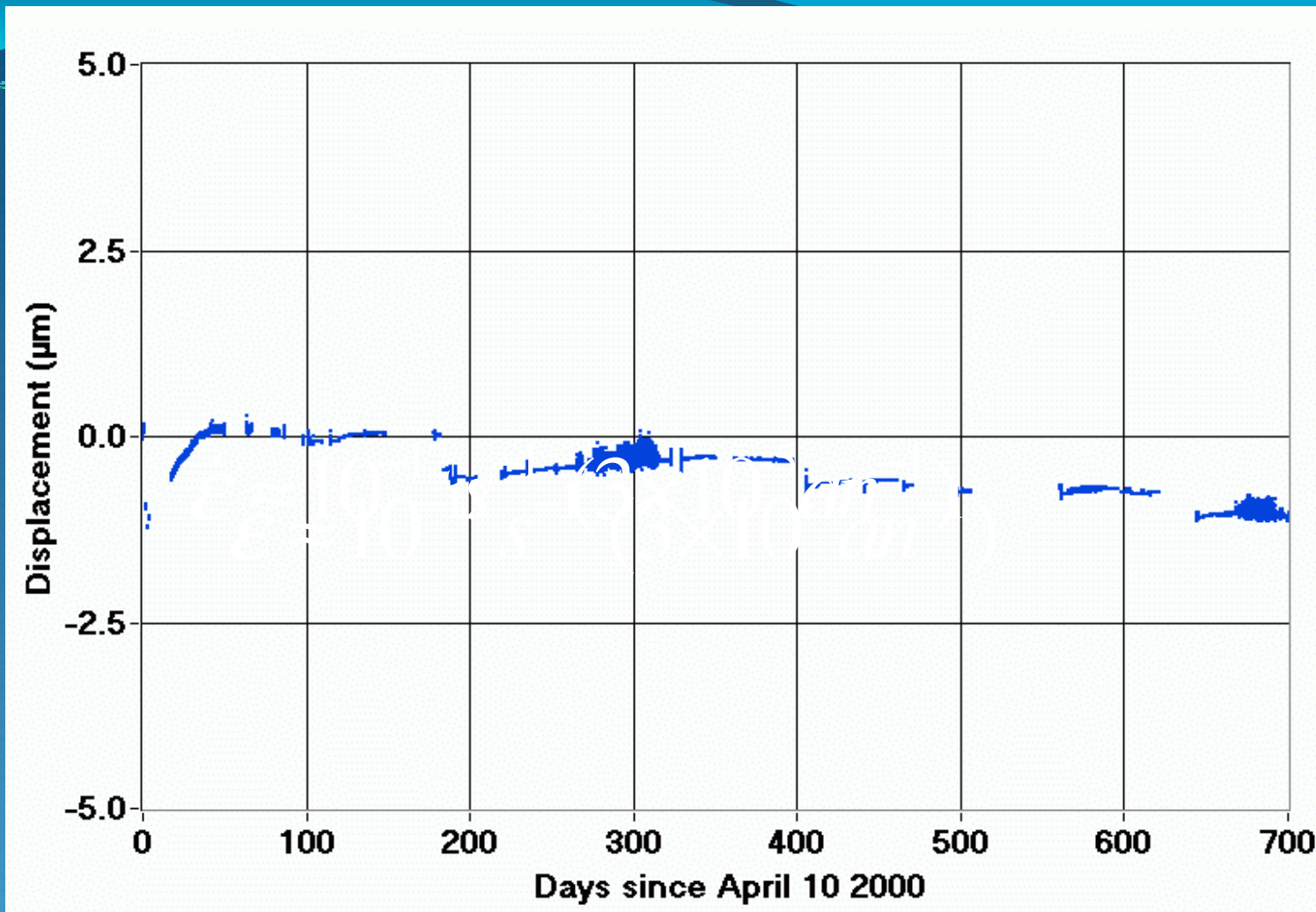
- résolution de l'ordre du nanomètre

$$1 \mu m \rightarrow 1 mV$$

$$0,001 \mu m \leftarrow 0,001 mV$$







ESSAI SUR EPROUVETTE TEMOIN EN DURALUMIN :  
 $H = 0,1 \text{ m}$ ,  $\Delta H = 1 \mu$  en 700 jours, dérive :  $1,5 \cdot 10^{-13} \text{ s}^{-1}$

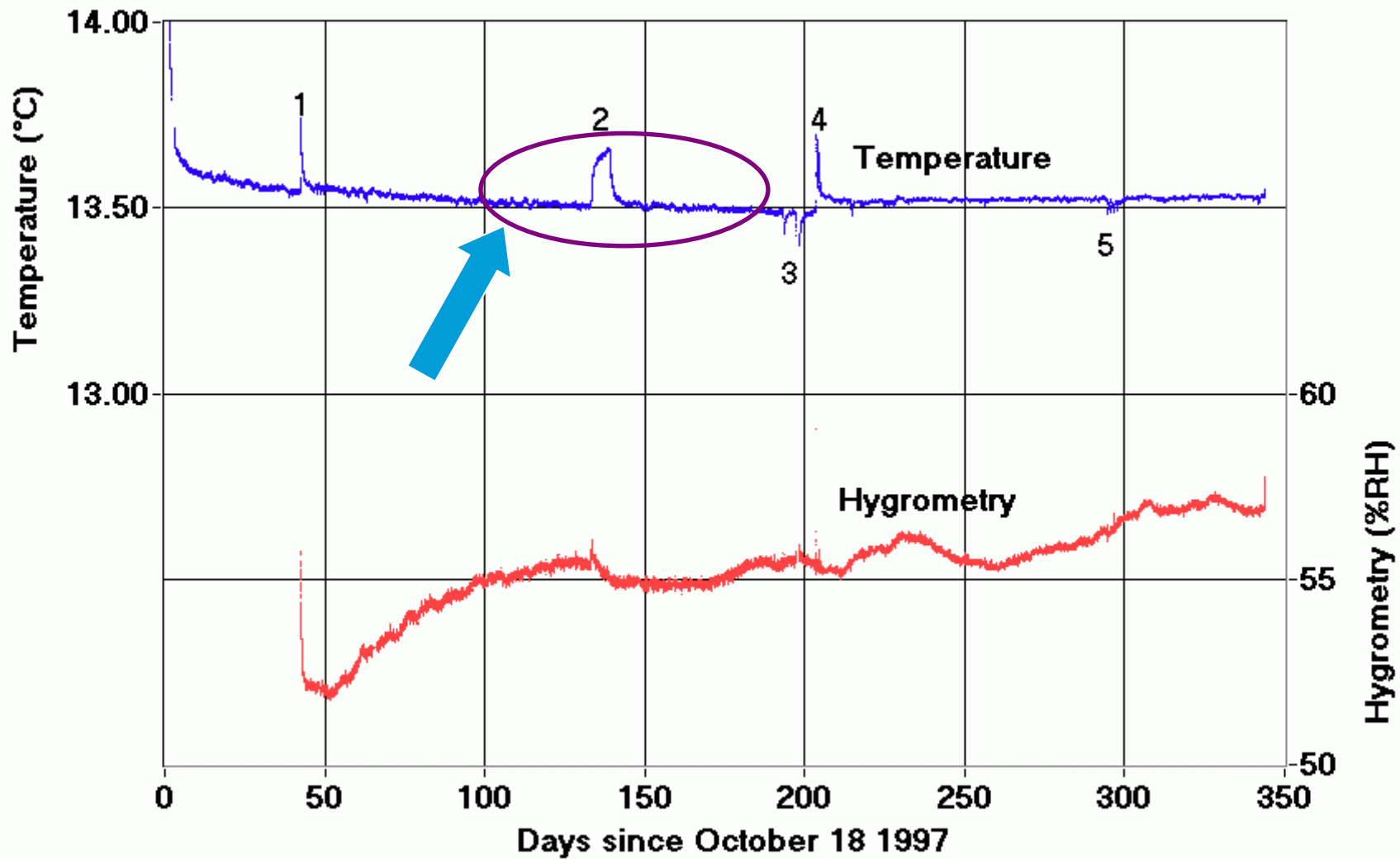
## Pour résoudre ces problèmes :

- (1) On applique des charges mortes
- (2) Les capteurs de déplacement ont une résolution du nanomètre
- (3) Les bâtis sont placés dans une galerie de mine, à 160 m de profondeur, où les fluctuations naturelles de température sont de l'ordre de 0,01 °C



# Essais de fluage faible vitesse

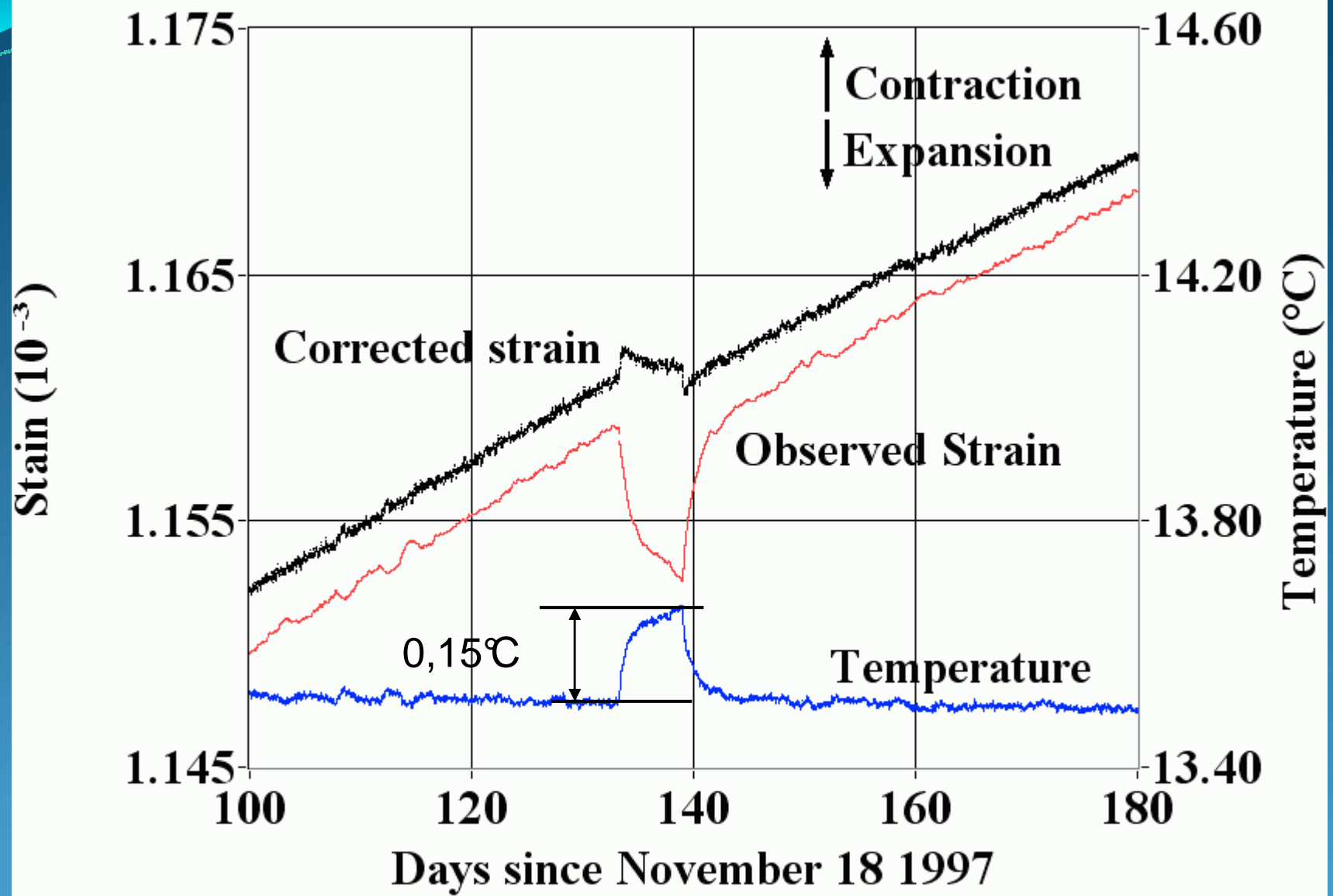
1. Comportement du sel
2. Difficultés soulevées par les faibles vitesses
3. Dispositions retenues
4. **Le problème de la température**
5. Principaux résultats
6. Conséquences pour le comportement des cavités



## TEMPERATURE DANS LA GALERIE

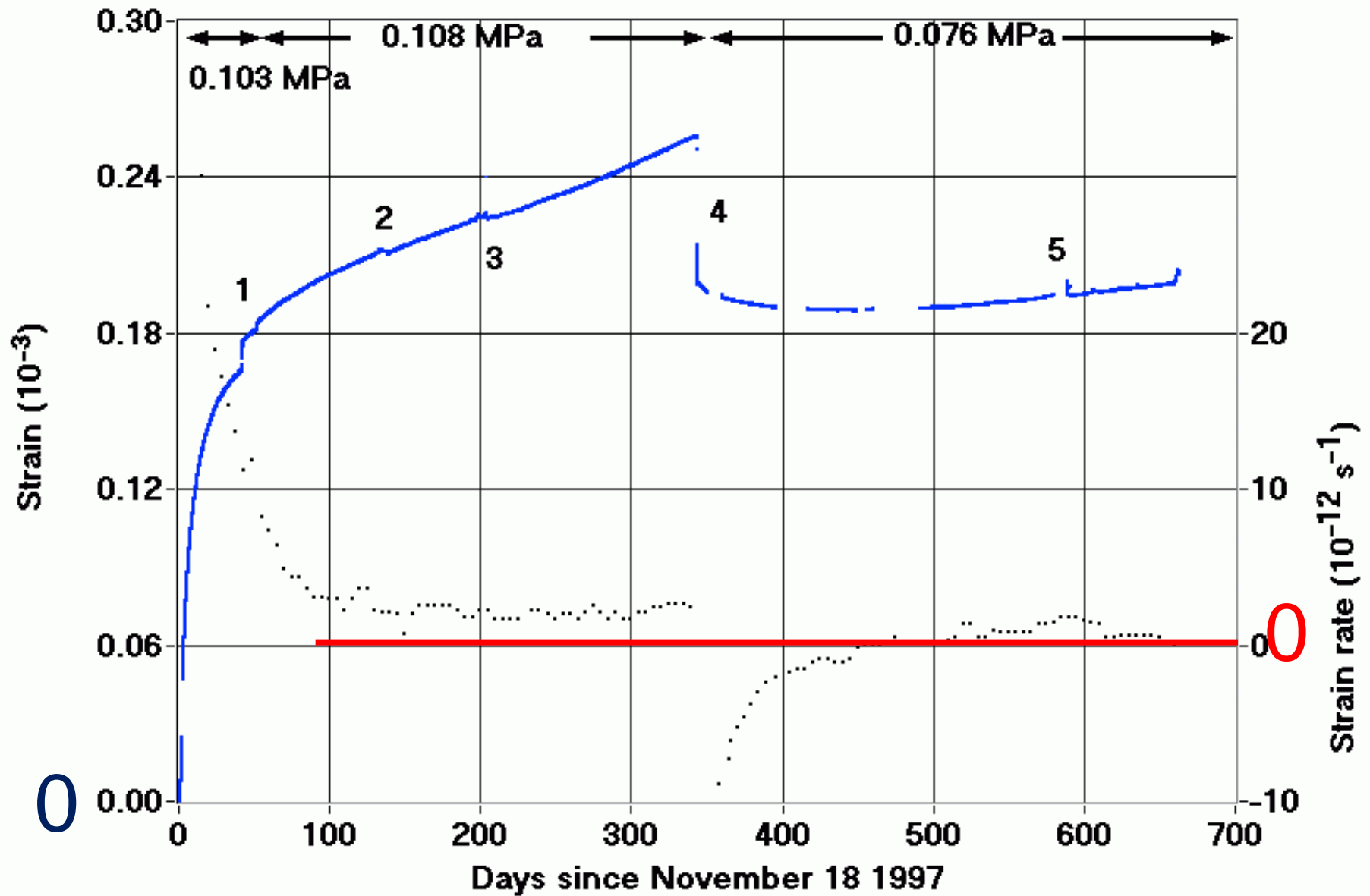
1, 2, 4 : présence humaine 3, 5 : panne de courant

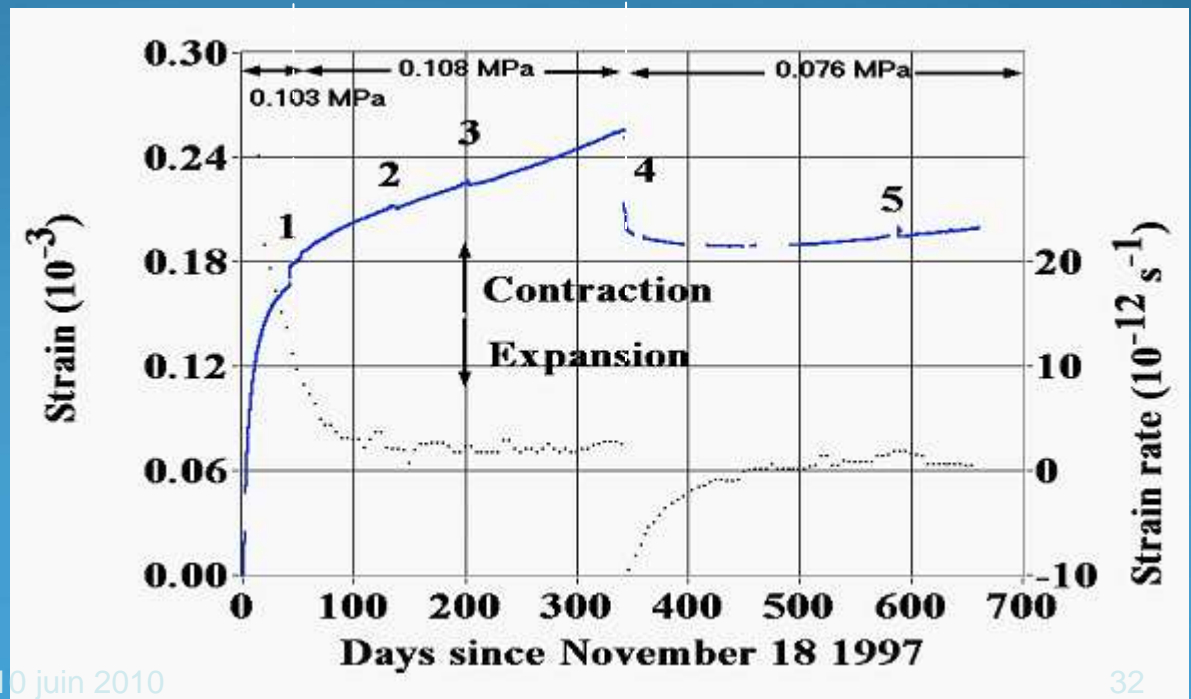
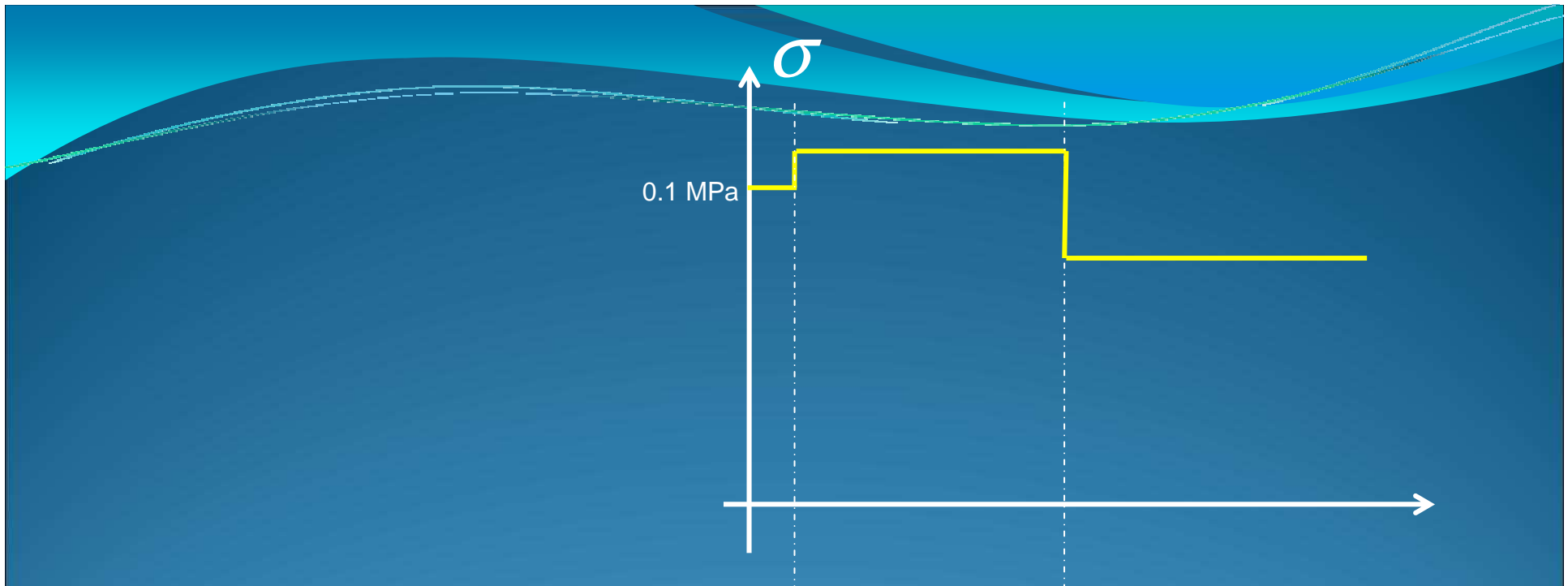




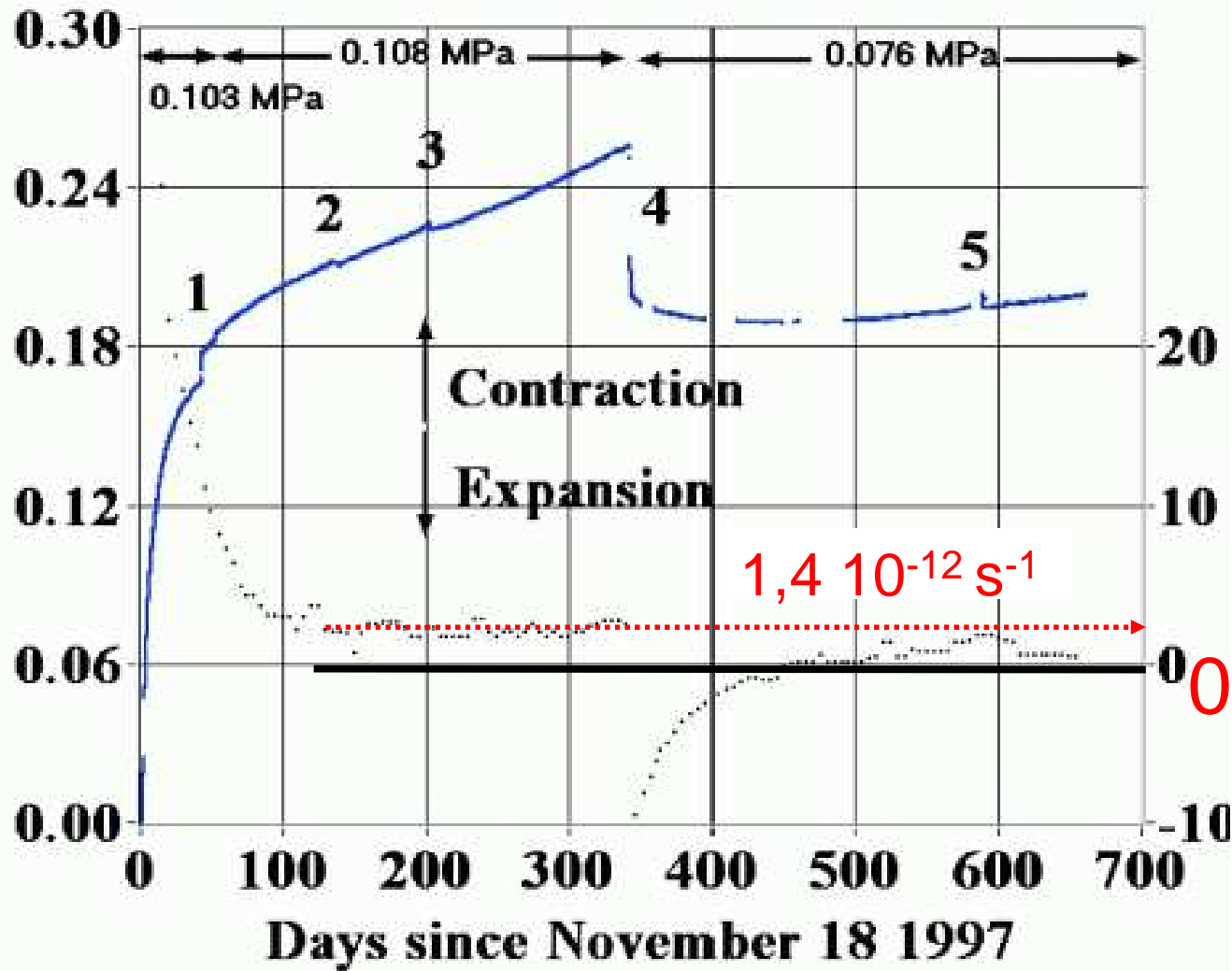
# Essais de fluage faible vitesse

1. Comportement du sel
2. Difficultés soulevées par les faibles vitesses
3. Dispositions retenues
4. Le problème de la température
5. **Principaux résultats**
6. Conséquences pour le comportement des cavités

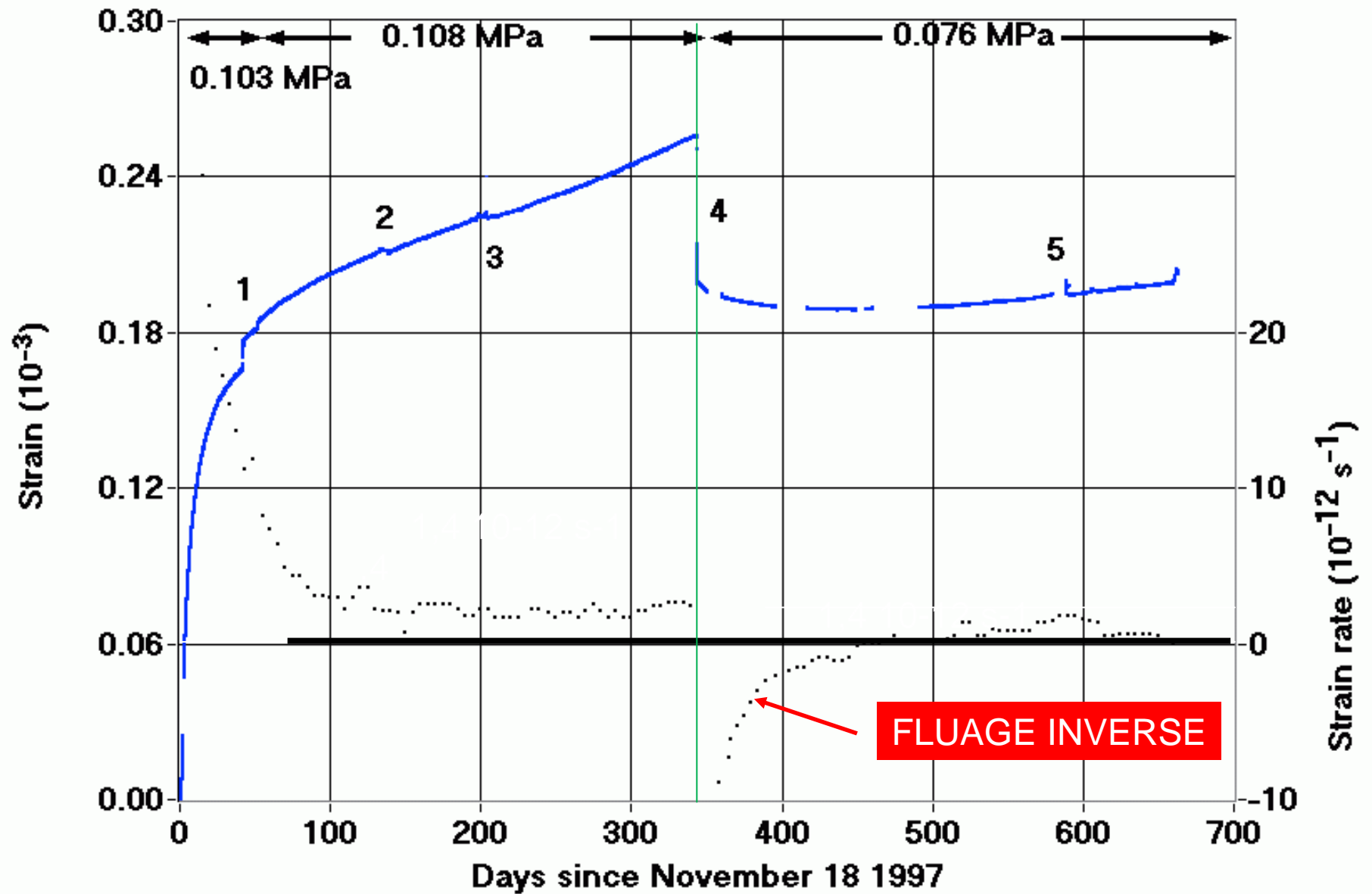




Déformation ( $10^{-3}$ )

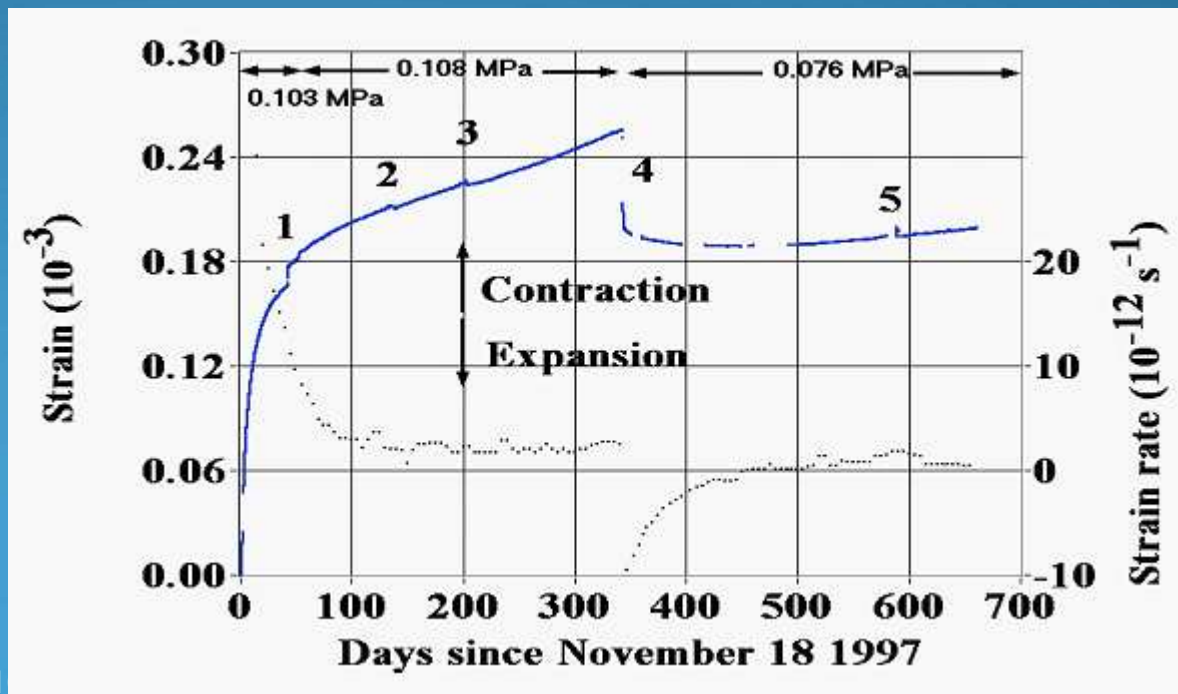


Taux de Déformation ( $10^{-12} \text{ s}^{-1}$ )



# Qualitativement, même comportement que sous forte contrainte :

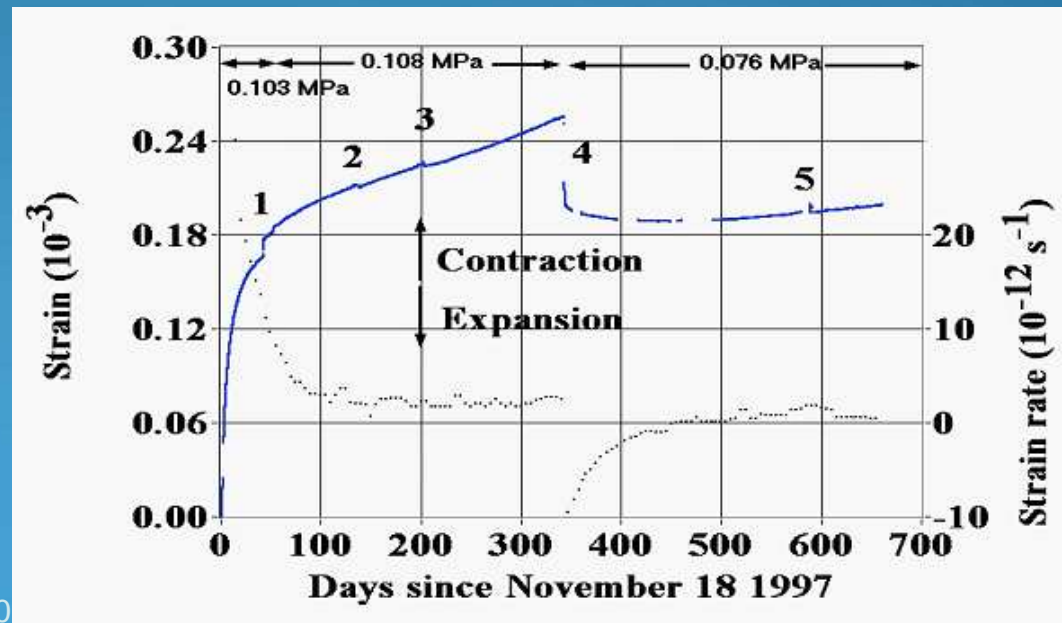
- ① Fluage transitoire rapide
- ② Evoluant vers un fluage à vitesse constante
- ③ Fluage « inverse » en cas de déchargement





## Quantitativement :

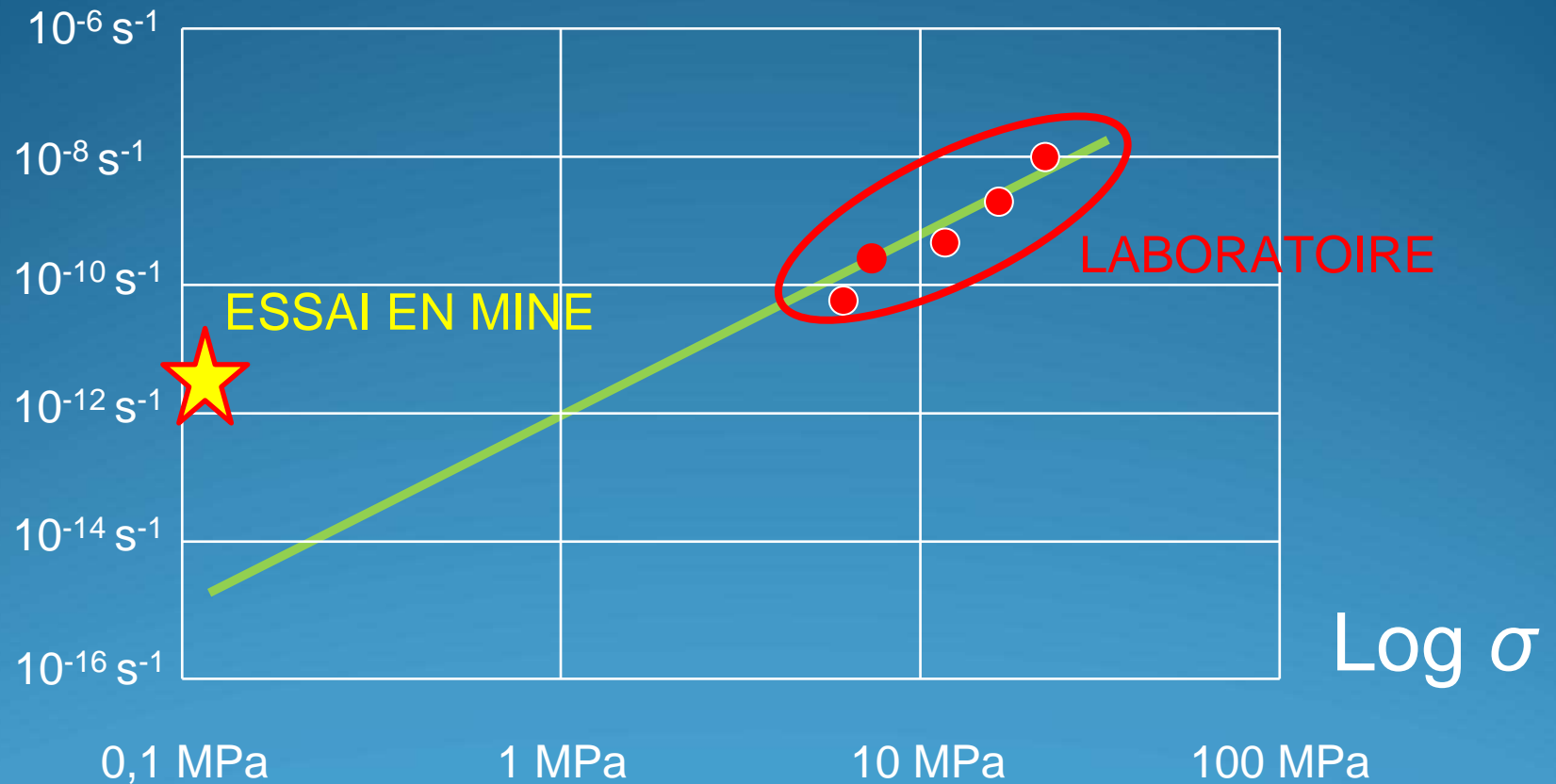
- ⦿ Le fluage « inverse » est plus long
- ⦿ Les vitesses de déformation sont beaucoup plus rapides que ce qu'on aurait pu extrapoler d'essais sous fort chargement



$$\dot{\epsilon}^{vp} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n$$

$n = 3 \text{ to } 6$

# Log $\dot{\epsilon}$

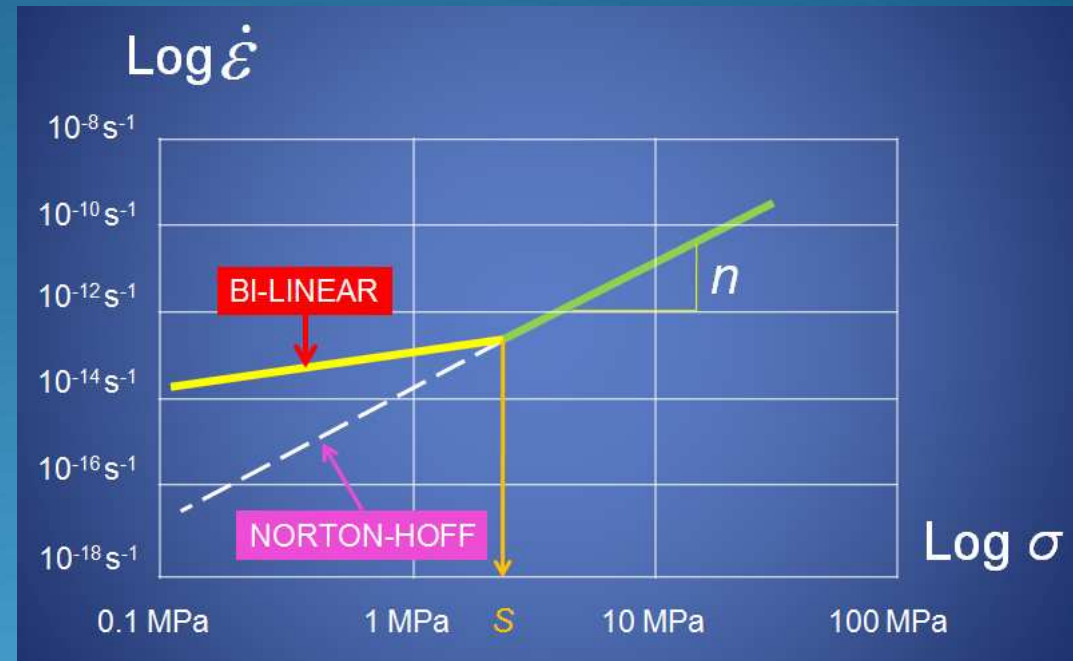


# Essais de fluage faible vitesse

1. Comportement du sel
2. Difficultés soulevées par les faibles vitesses
3. Dispositions retenues
4. Le problème de la température
5. Principaux résultats
6. **Conséquences pour le comportement des cavités**

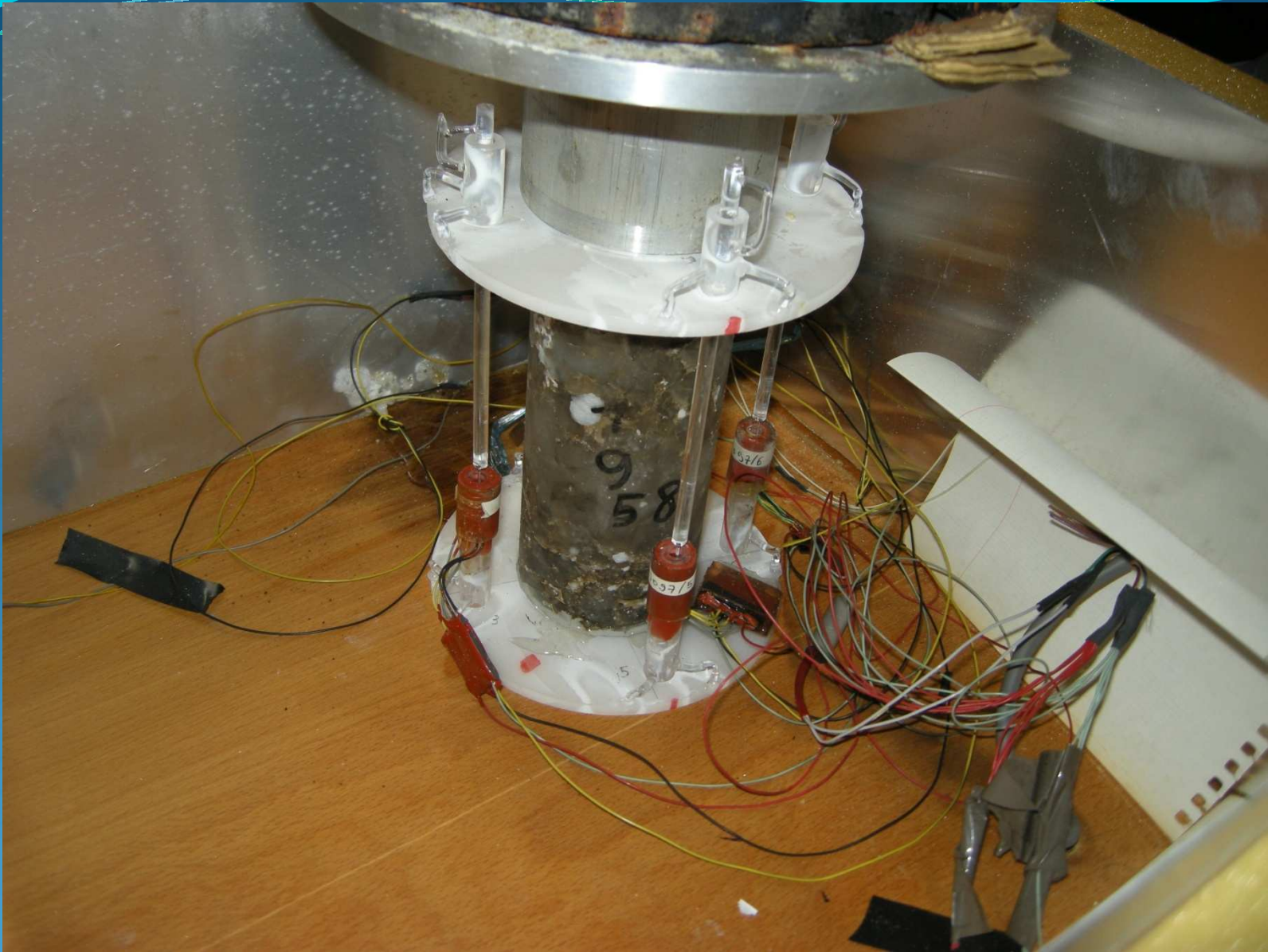
# CAVITE SPHERIQUE

$$\left. \frac{\dot{V}}{V} \right|_{SS}^{BL} = -\frac{3}{2} A^* \left\{ \frac{3}{2n} \left[ P_\infty - P_c + \frac{2}{3} (n-1) S \right] \right\}^n$$



$$\left. \frac{\dot{V}}{V} \right|_{SS}^{NH} = -\frac{3}{2} A^* \left[ \frac{3}{2n} (P_\infty - P_c) \right]^n$$

**REMERCIEMENTS :  
COMPAGNIE  
DES SALINS DU MIDI ET  
DES SALINES DE L'EST**



# Essais de fluage faible vitesse

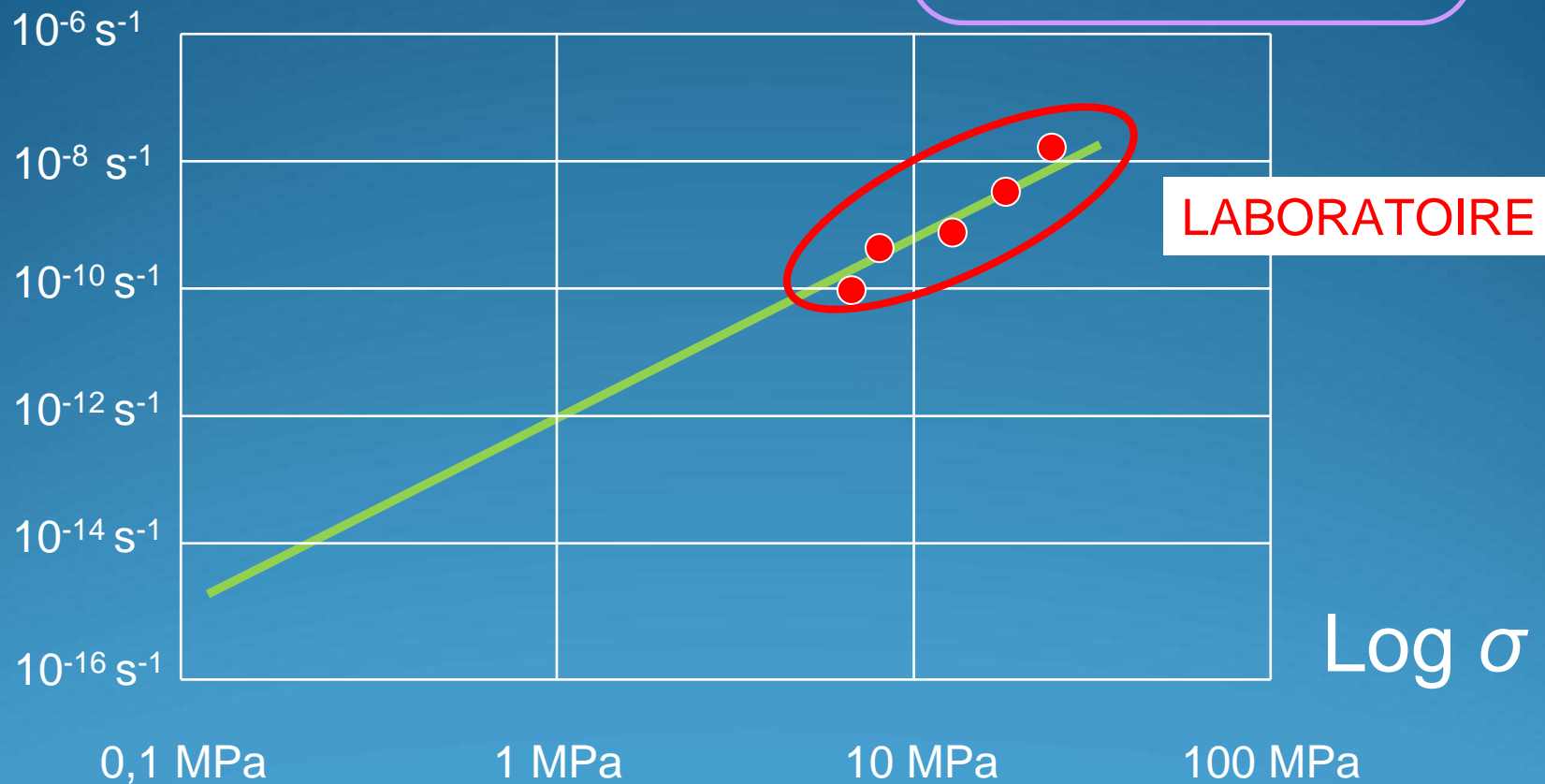
1. Comportement du sel
2. **Comportement des cavités**
3. Difficultés soulevées par les faibles vitesses
4. Dispositions retenues
5. Le problème de la température
6. Principaux résultats
7. Conséquences pour le comportement des cavités



$$\dot{\epsilon}^{vp} = A(T) \sigma^n$$

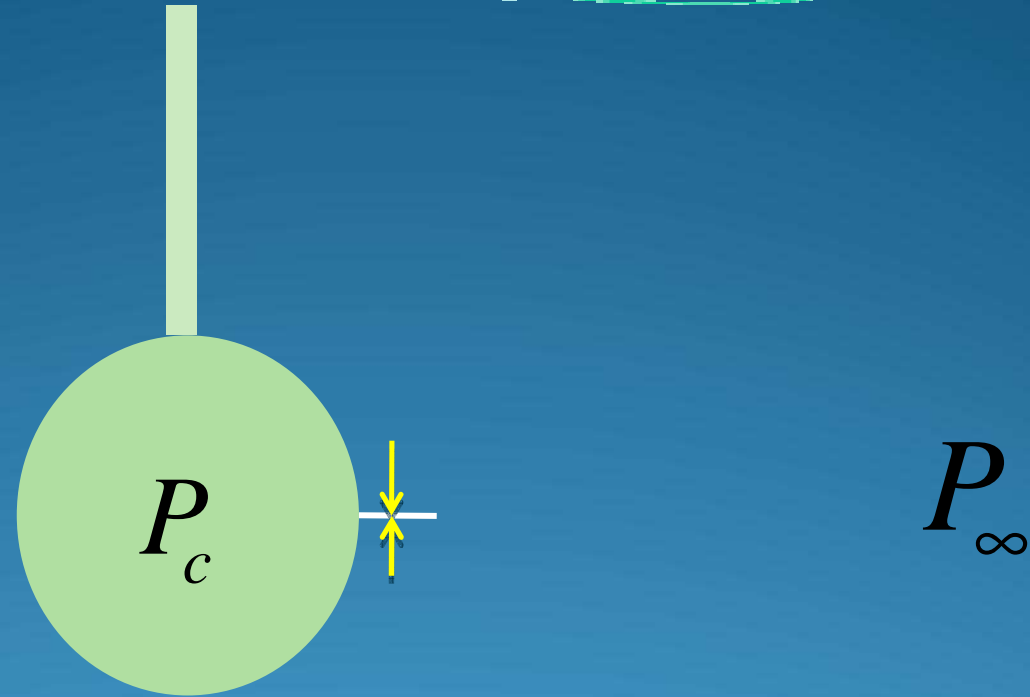
$$n = 3 \text{ à } 6$$

Log  $\dot{\epsilon}$



Log  $\sigma$



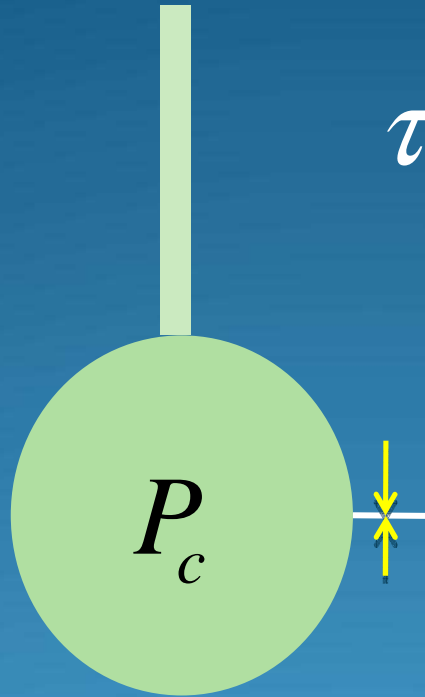


# ELASTIQUE

$$\varepsilon = M \sigma$$

$$\tau_{\max} \approx \frac{3}{4} (P_{\infty} - P_c) \left( \frac{a}{r} \right)^3$$

$P_{\infty}$

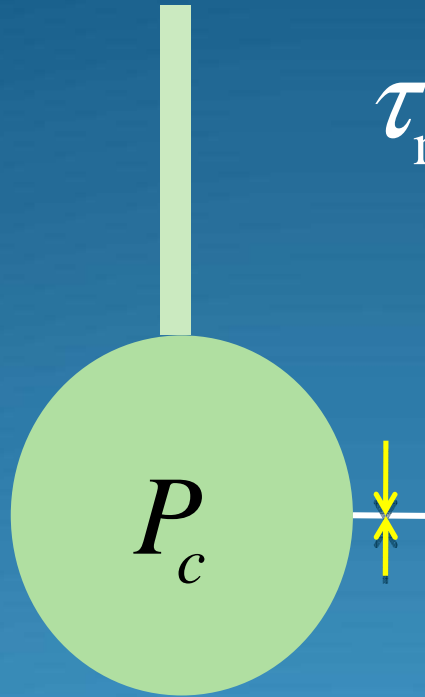


# ELASTIQUE

$$\varepsilon = B \sigma$$

$$\tau_{\max} \approx (P_{\infty} - P_c) \left( \frac{a}{r} \right)^3$$

$P_{\infty}$

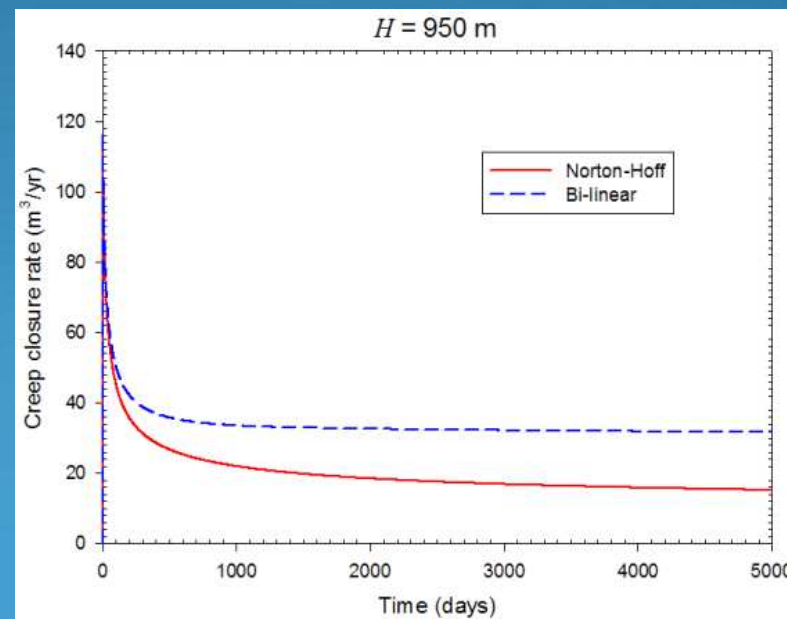
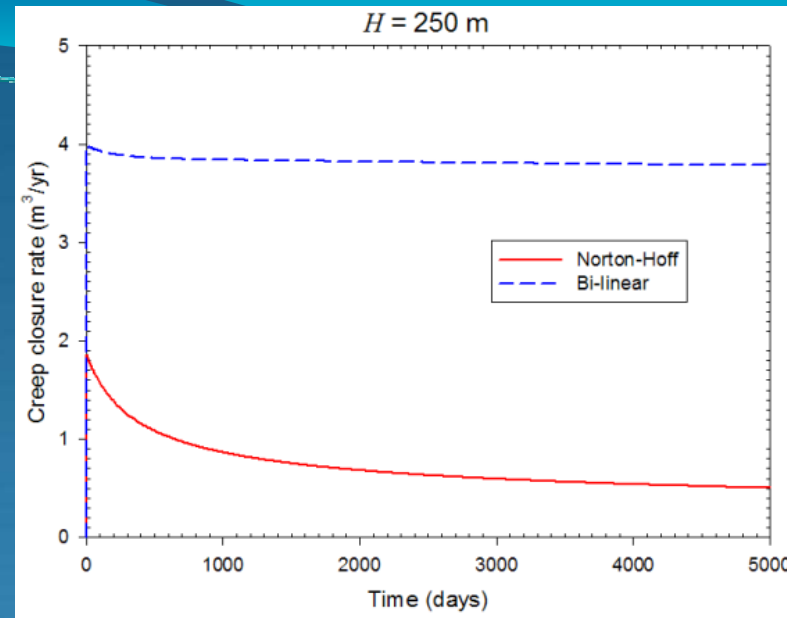
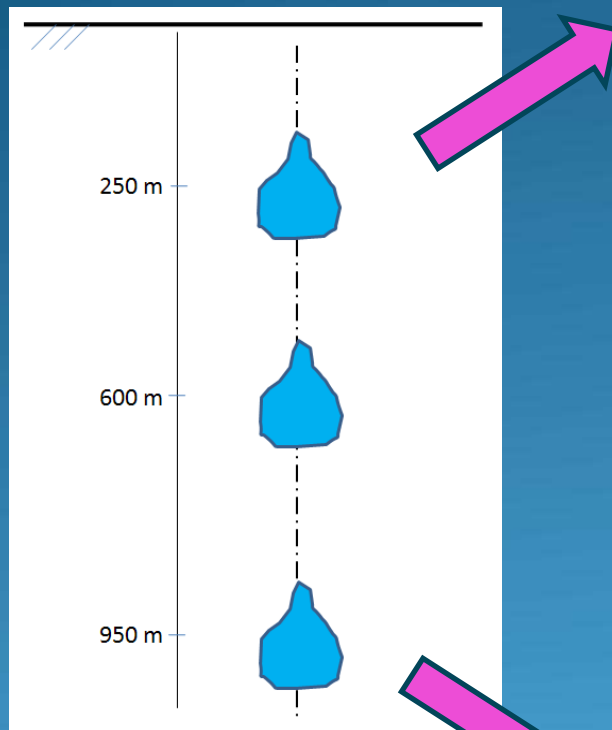


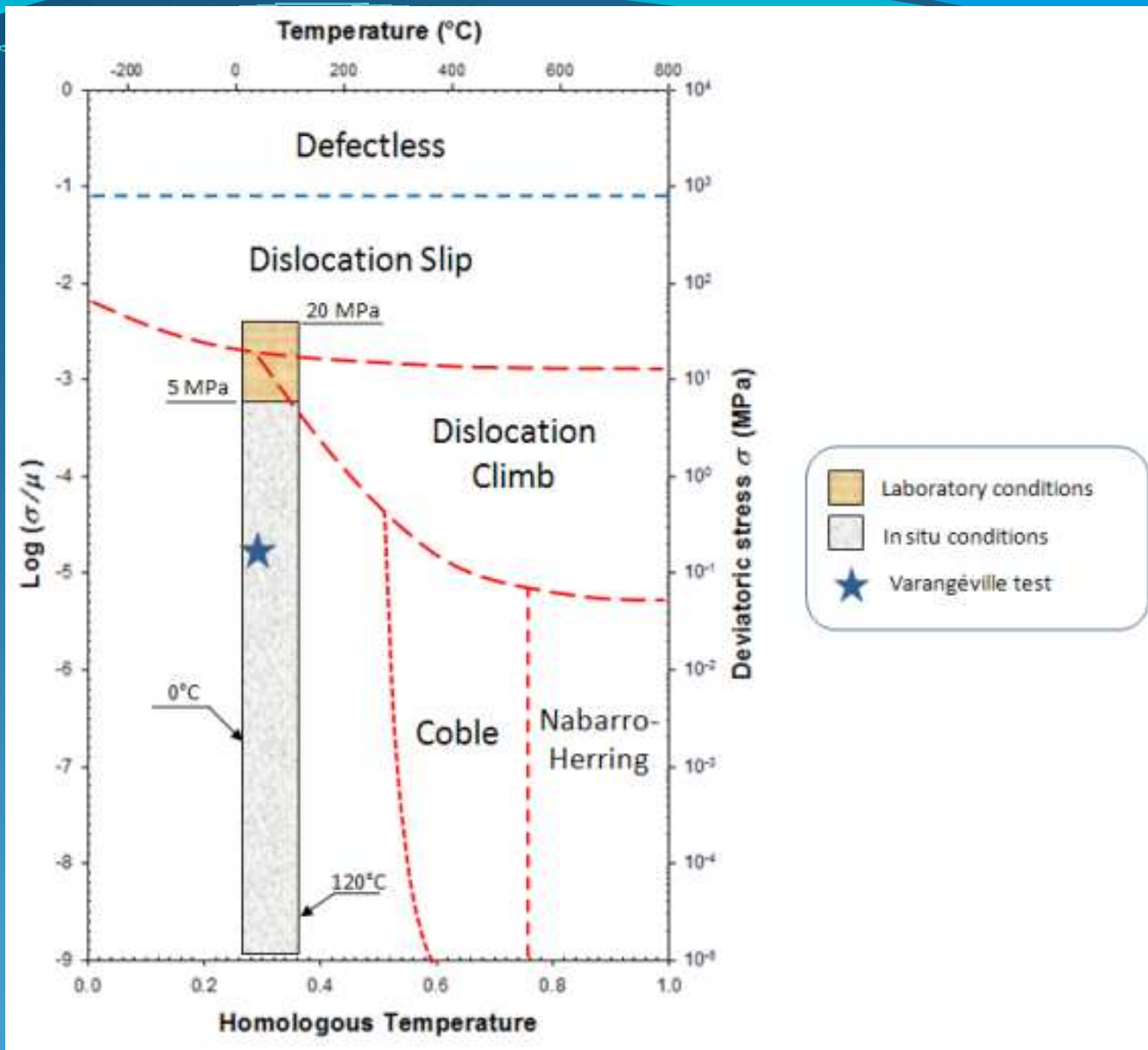
# VISCO-ELASTIQUE

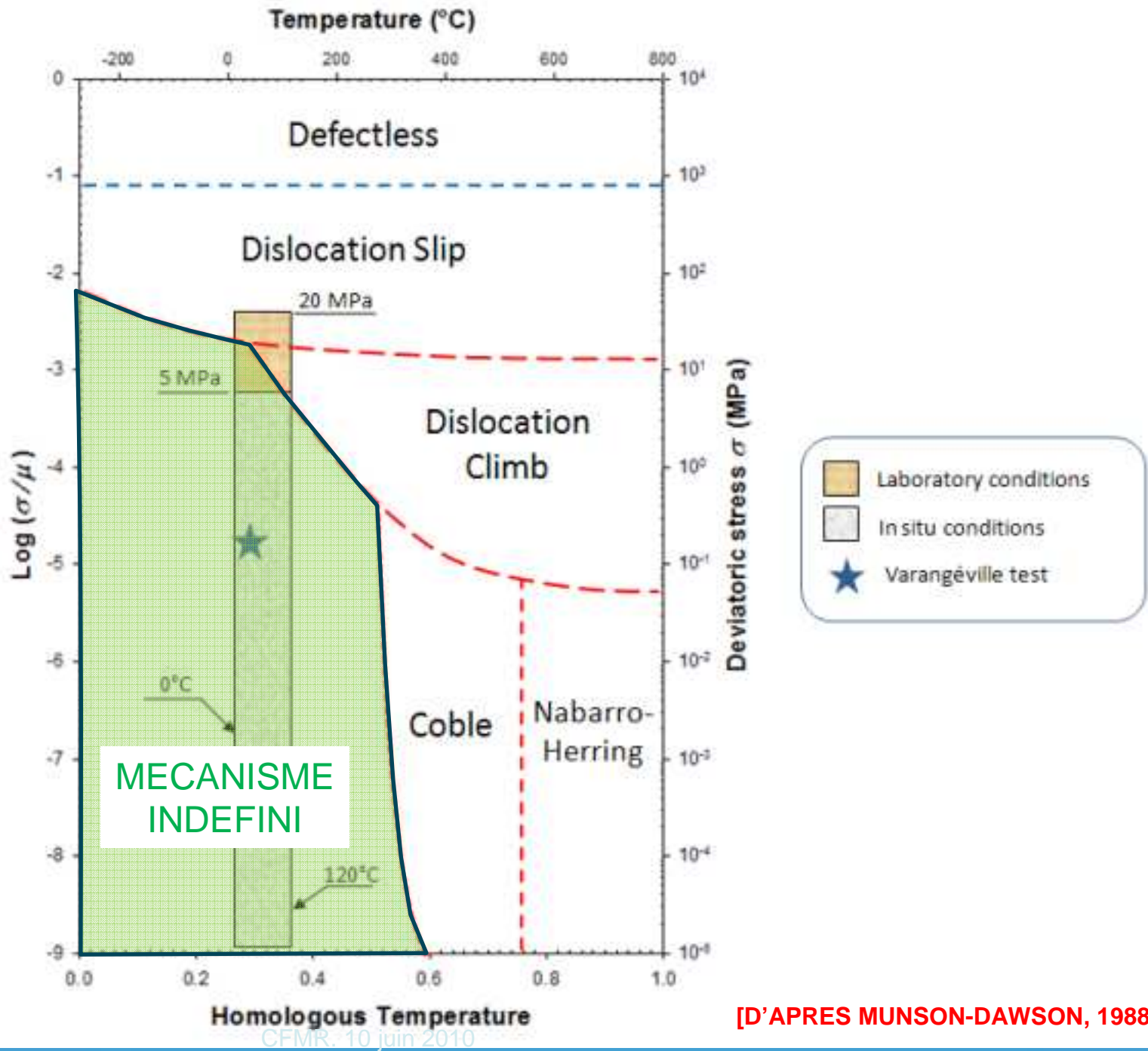
$$\dot{\varepsilon}^{vp} = A \sigma^n$$

$$\tau_{\max} \approx \left( \frac{P_{\infty} - P_c}{n} \right) \left( \frac{a}{r} \right)^{3/n}$$

$$n=3 \text{ à } 6$$

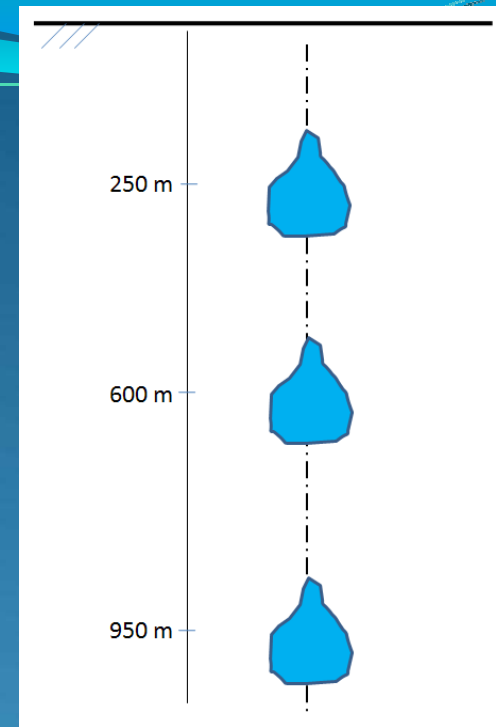
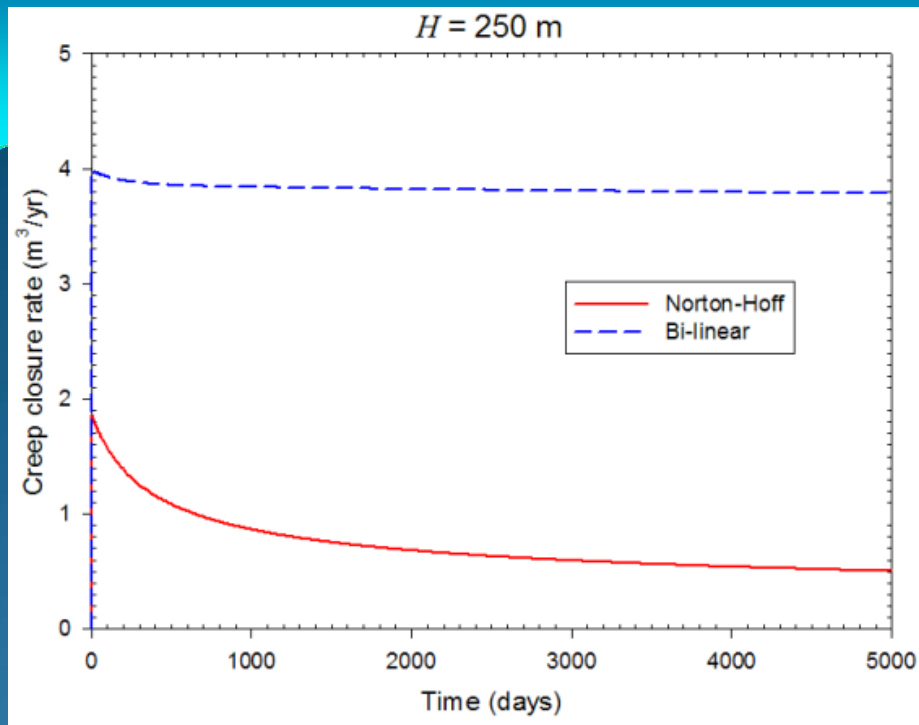






- Laboratory conditions
- In situ conditions
- ★ Varangéville test

[D'APRES MUNSON-DAWSON, 1988]





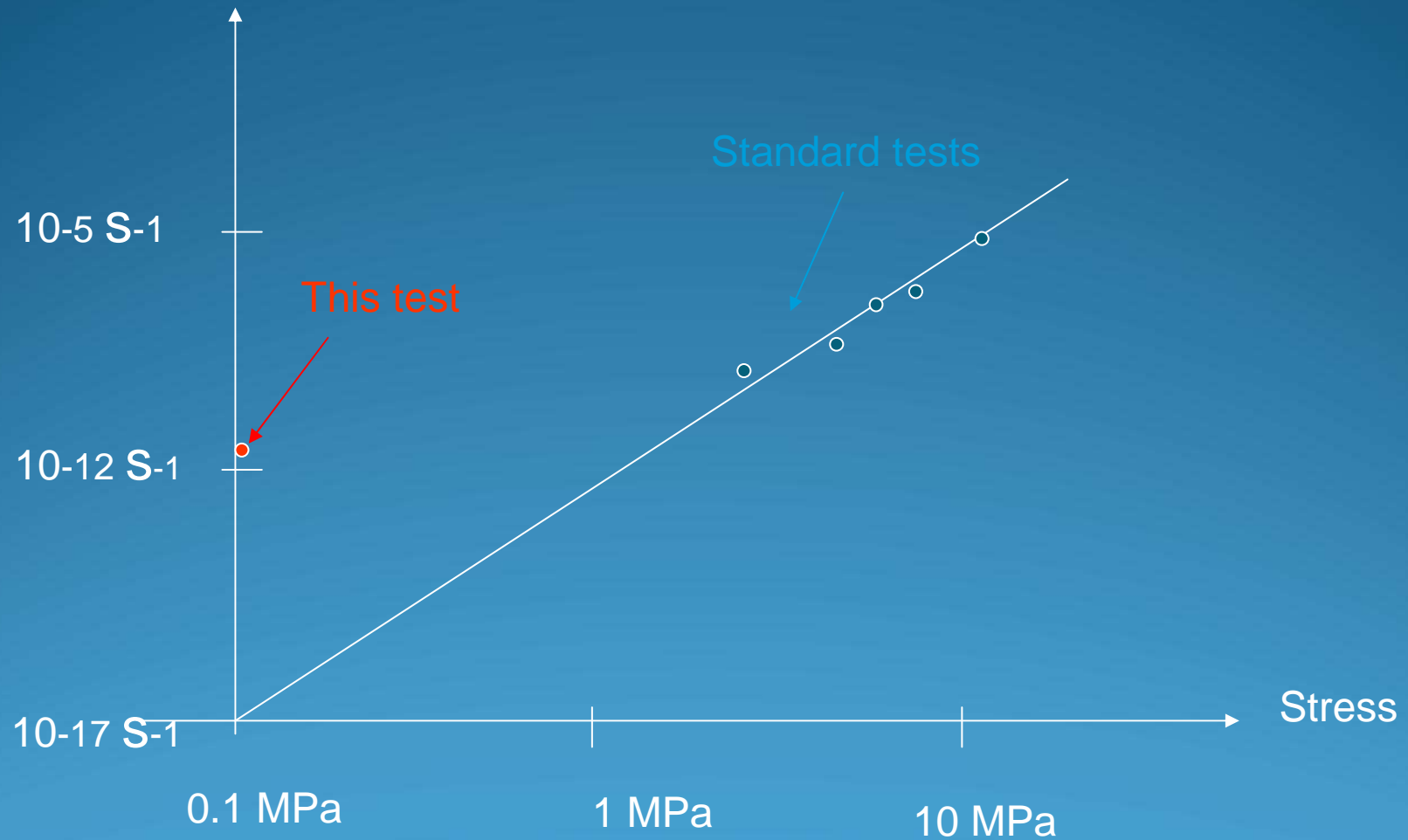
CFMR. 10 juin 2010

51

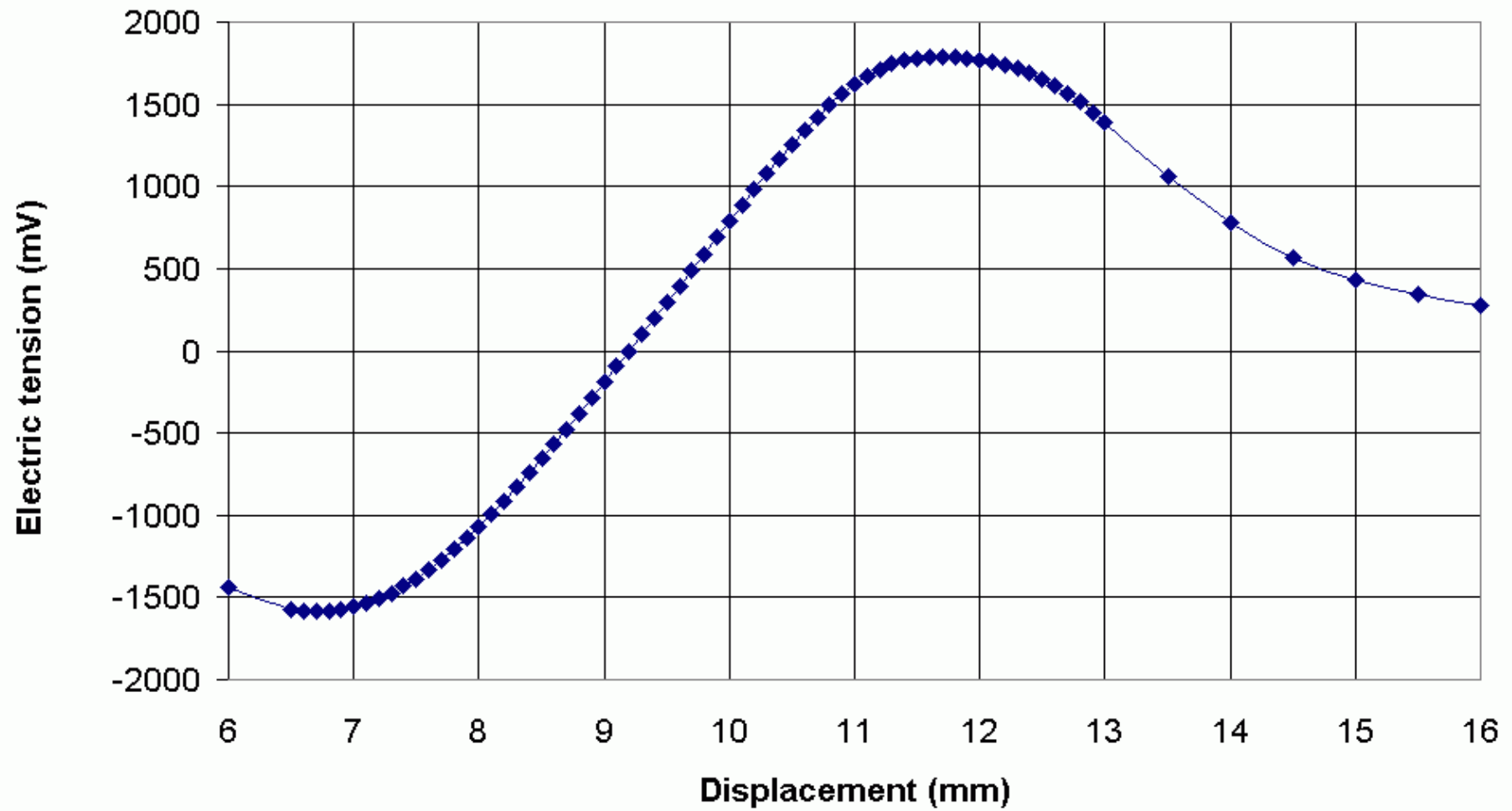


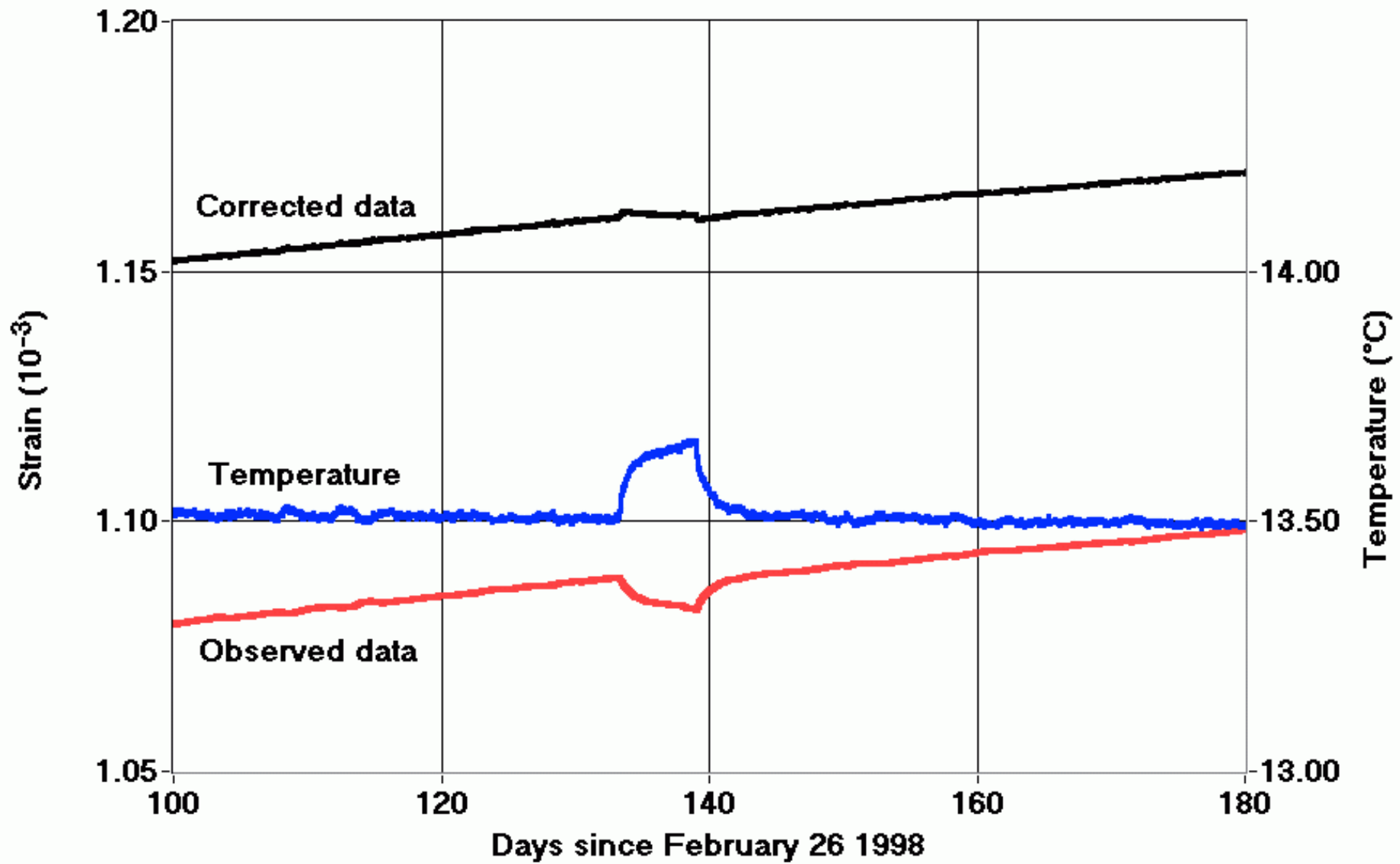


Strain rate



Sensor 11 - Calibrating curve.



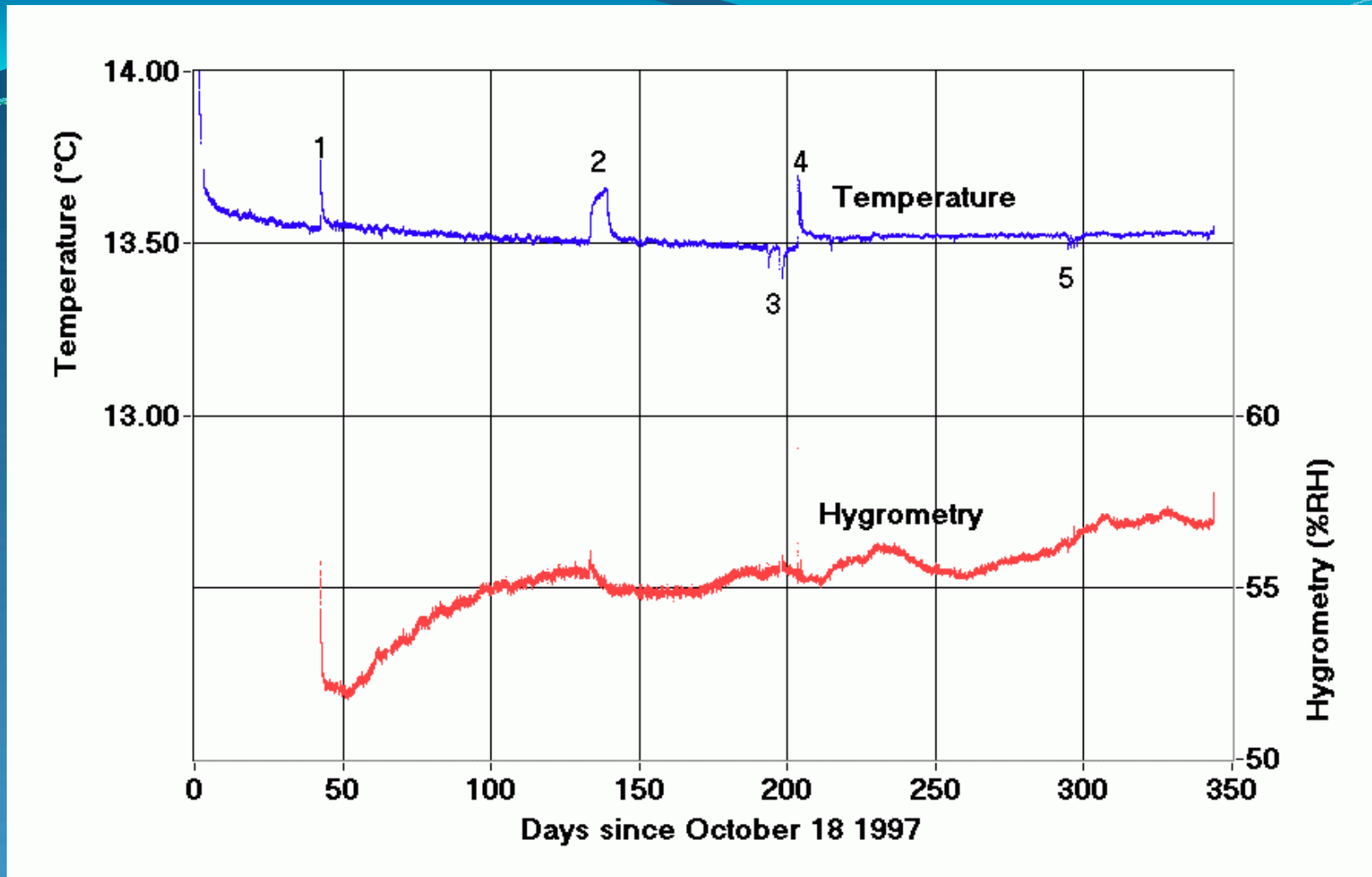




$$\dot{\epsilon}^{vp} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n$$

$$300 \text{ K} < T < 375 \text{ K}$$

$$5 \text{ MPa} < \sigma < 25 \text{ MPa}$$



## TEMPERATURE DANS LA GALERIE

1, 2, 4 : présence humaine 3, 5 : panne de courant



# Rotation des plateaux

On dispose 4 capteurs de déplacement  
diamétralement opposés 2 à 2

Ce qui donne :

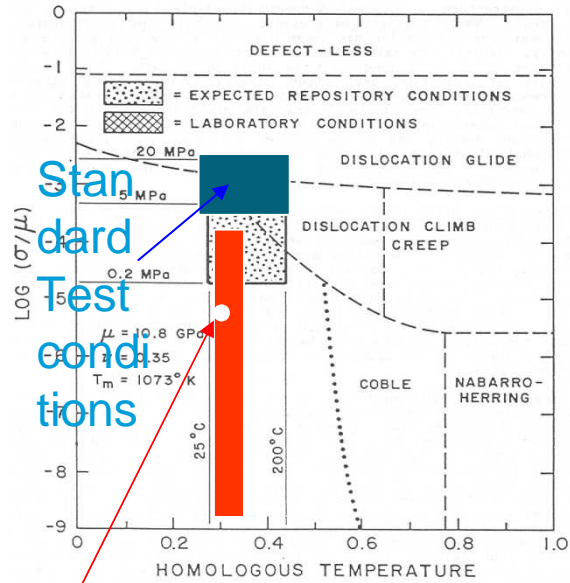
- Une certaine redondance
- La possibilité d'apprécier la rotation du plateau supérieur, sensible surtout au début de l'essai (écrasement des aspérités)

$\sigma$

0.1 MPa

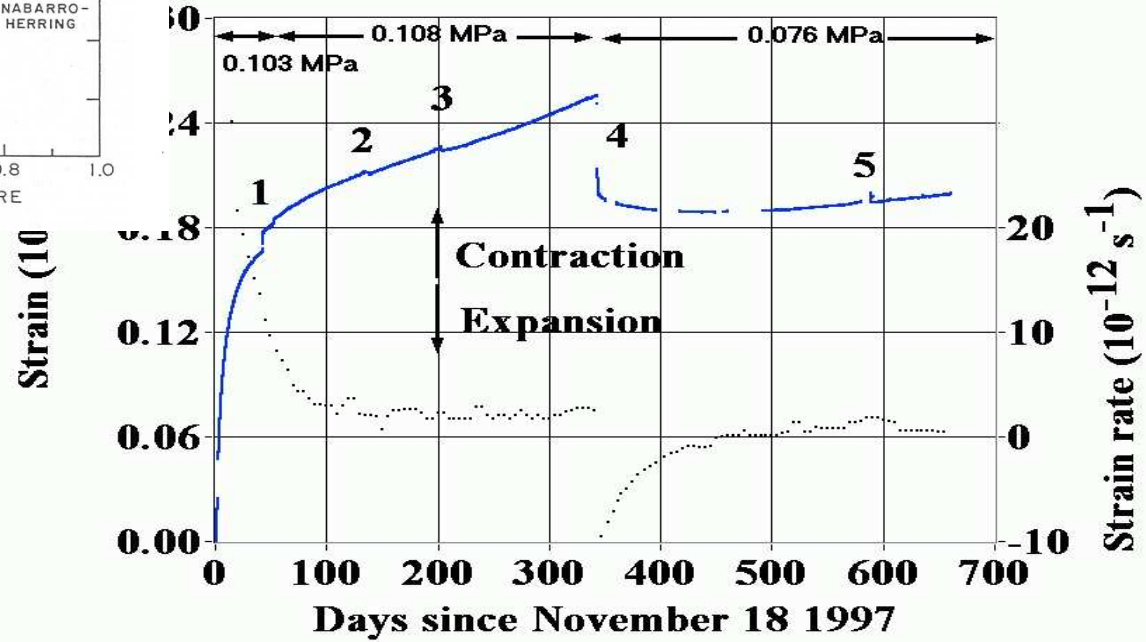
t

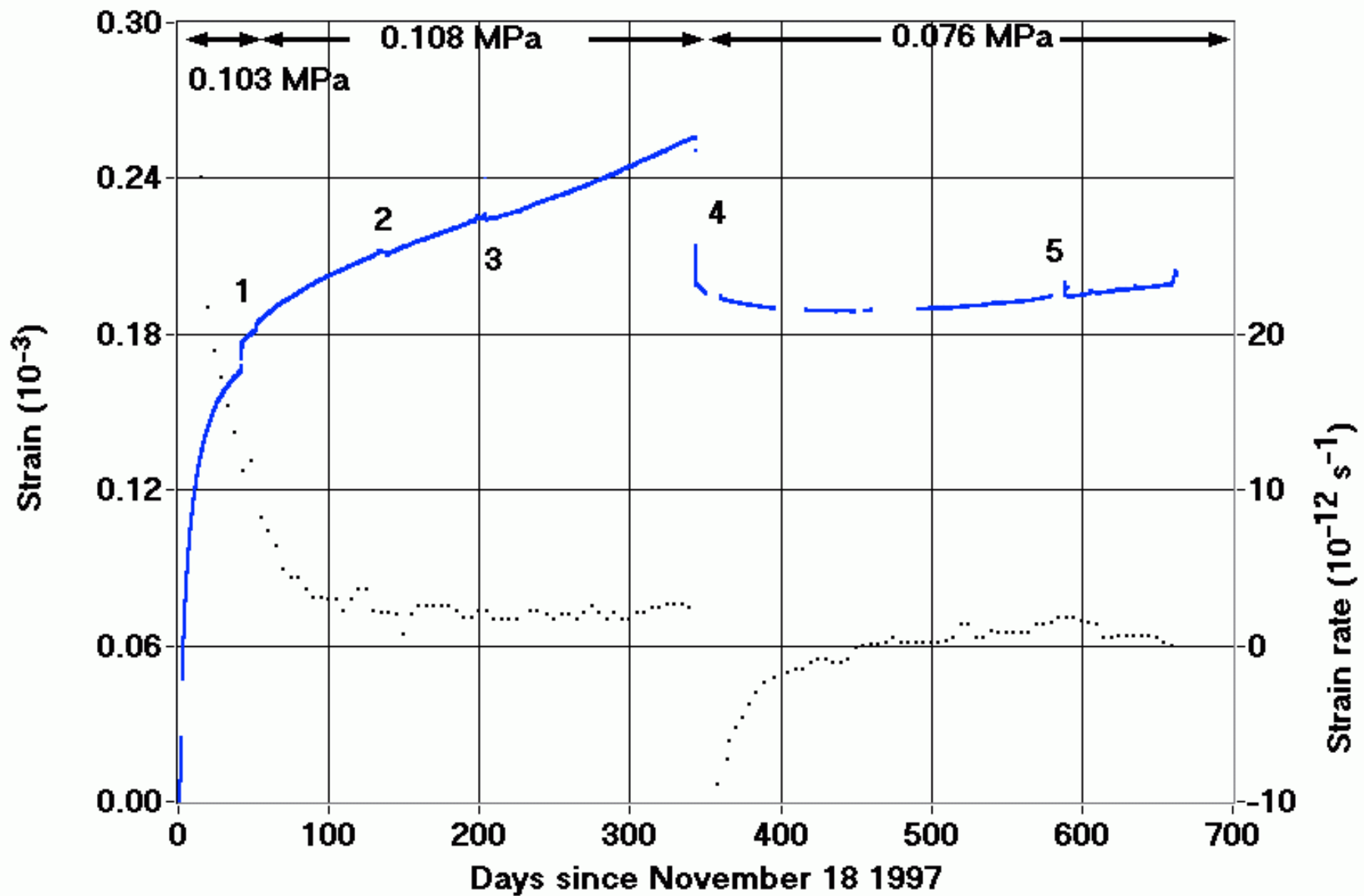
t

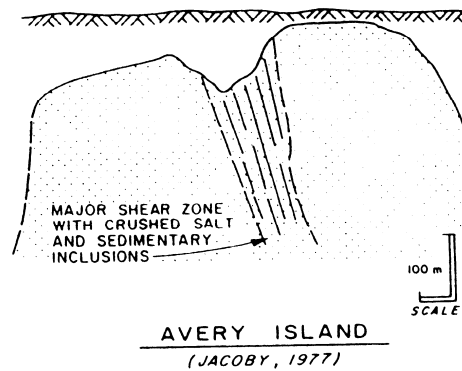
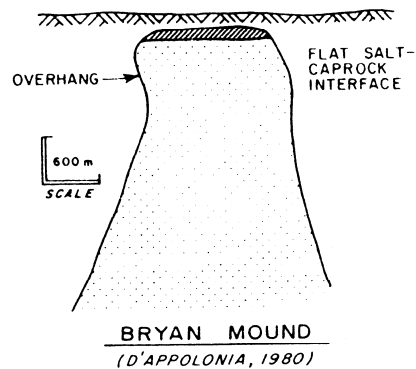
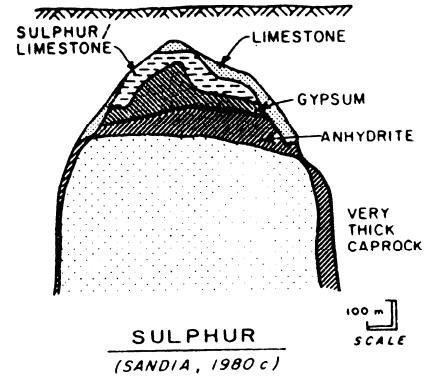
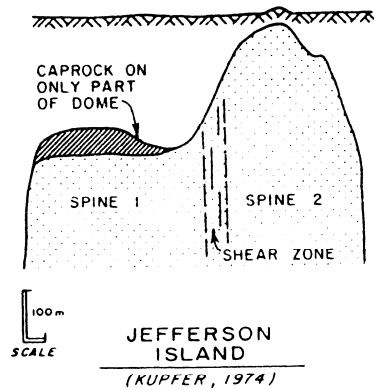
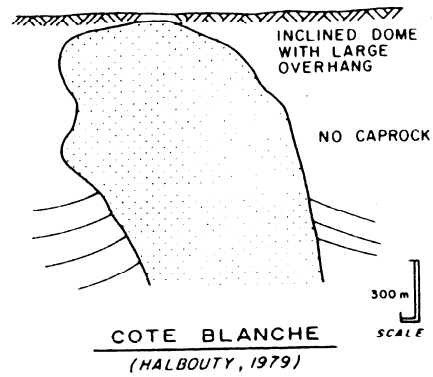
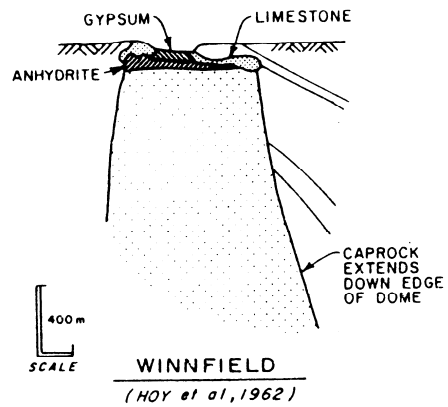


Standard Test conditions

This test







# Domes du Golfe du Mexique

(Kelsall and Nelson, 1983)

# 3 ESSAIS ONT ÉTÉ EFFECTUÉS

Day (since November 18, 1997)	1	42	204	343	520	660
Test no. 0 Duralumin sample	$\sigma = 0 \text{ MPa}$					
Test no. 1 Phenoblastic salt	$\sigma = 0.103 \text{ MPa}$	$\sigma = 0.108 \text{ MPa}$	$\sigma = 0.076 \text{ MPa}$			
Test no. 2 Pure salt				$\sigma = 0.102 \text{ MPa}$		
Test no. 3 Intermediate quality				$\sigma = 0.021 \text{ MPa}$	$\sigma = 0.054 \text{ MPa}$	

# Quartier Saint Maximilien, après l'effondrement (Remerciements : Archives CSME)







(Courtesy of Geostock)

$\sigma$

$h$

$$\varepsilon = \Delta h / h$$

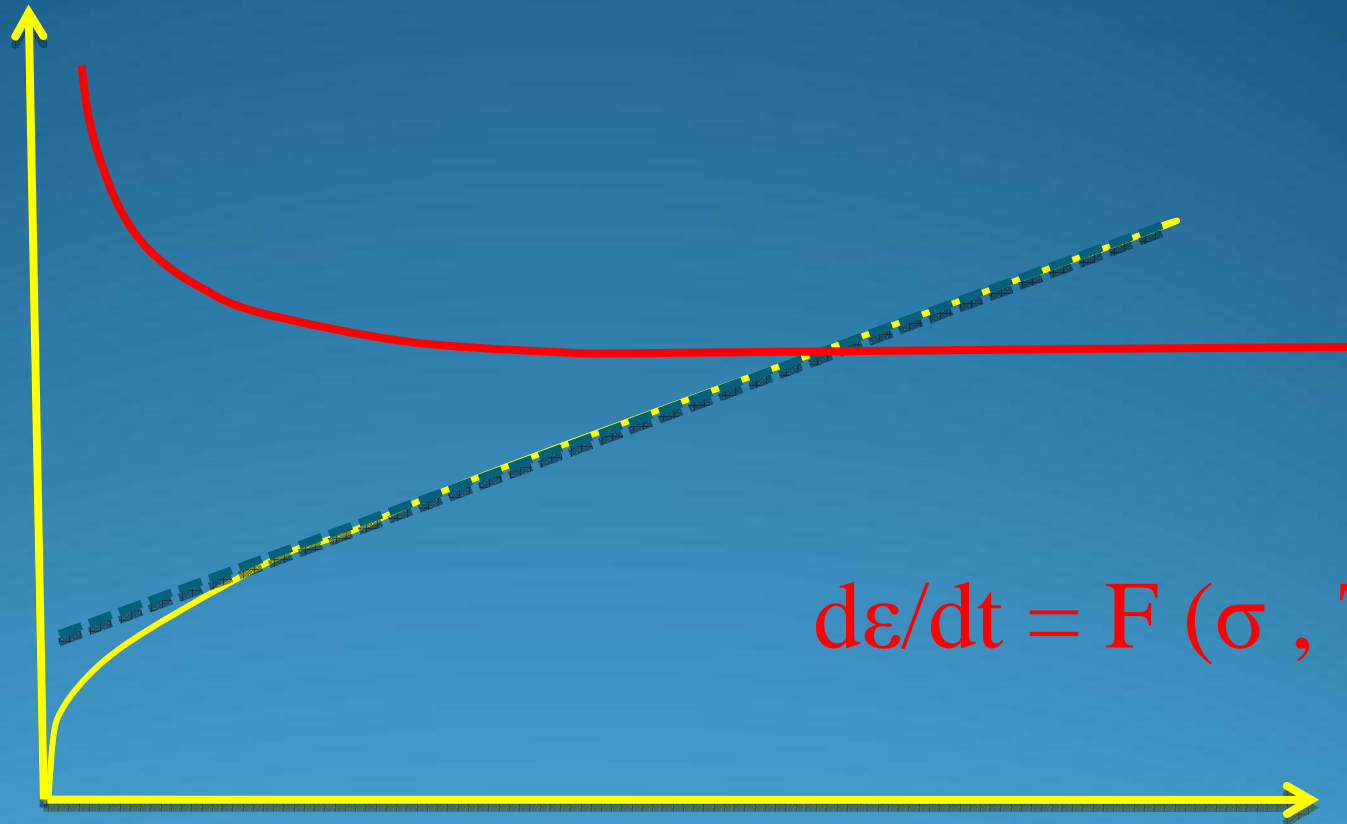


DEFORMATION



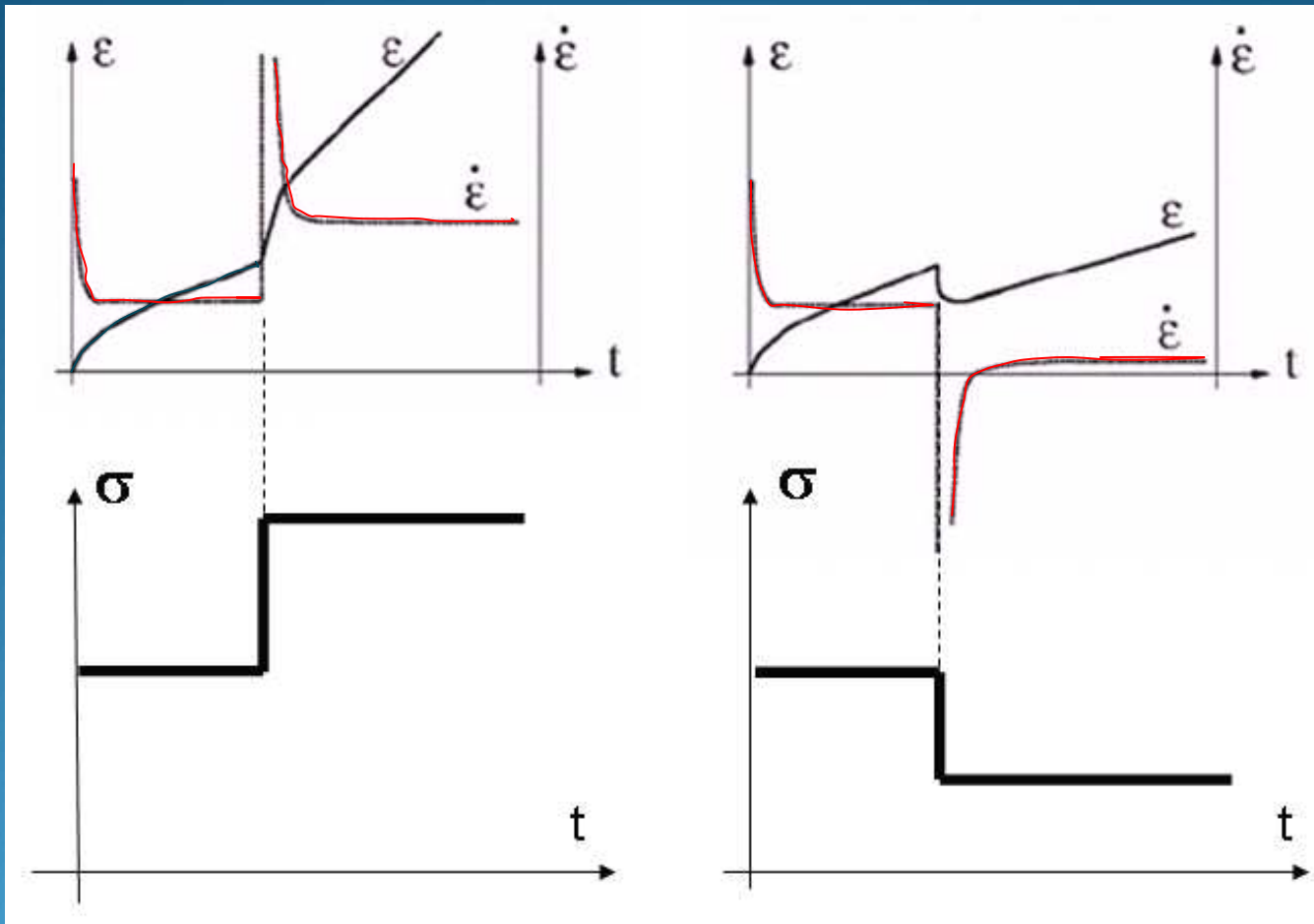
TEMPS

DEFORMATION



$$d\epsilon/dt = F(\sigma, T)$$

TEMPS



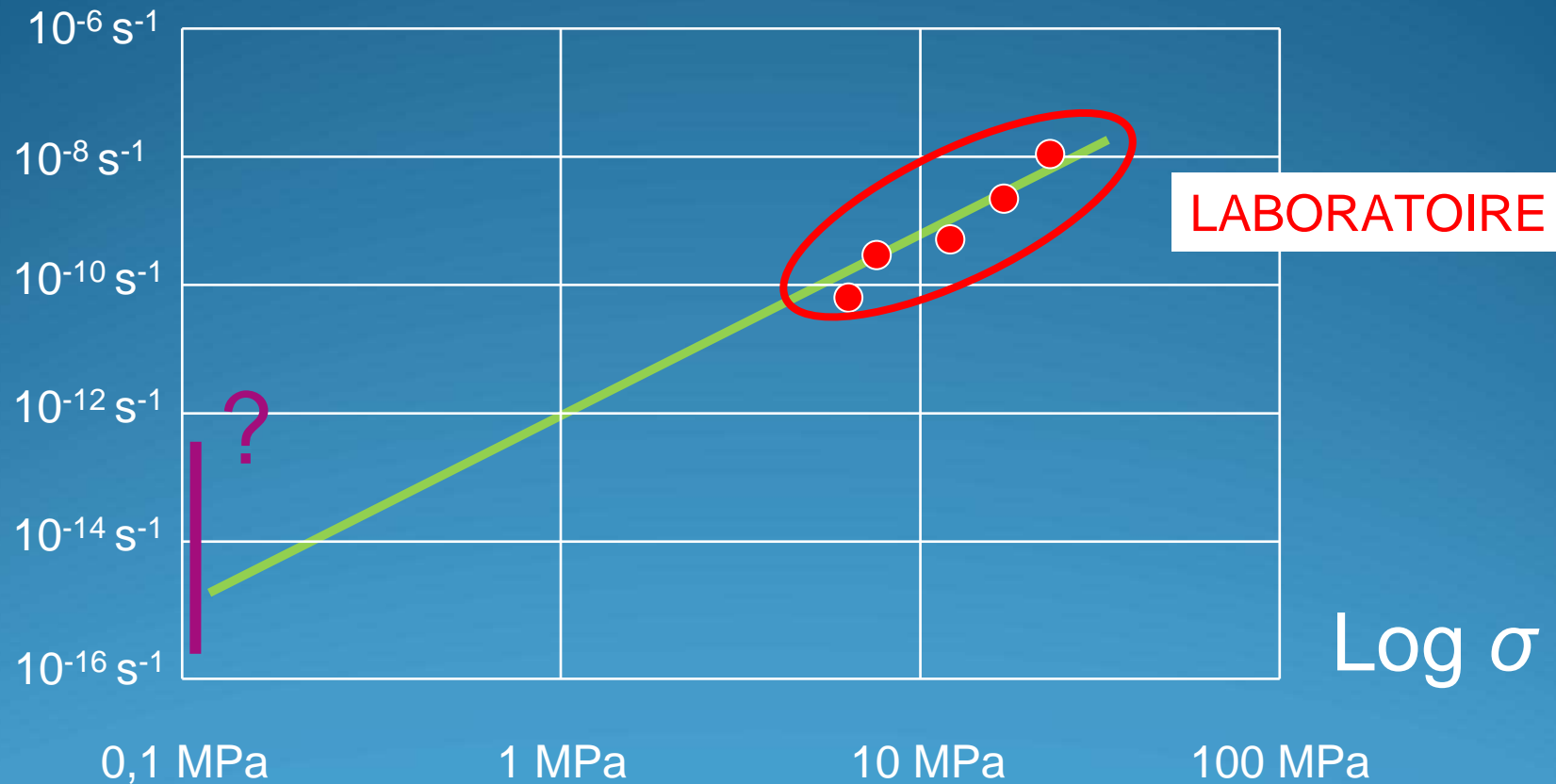
a. charge

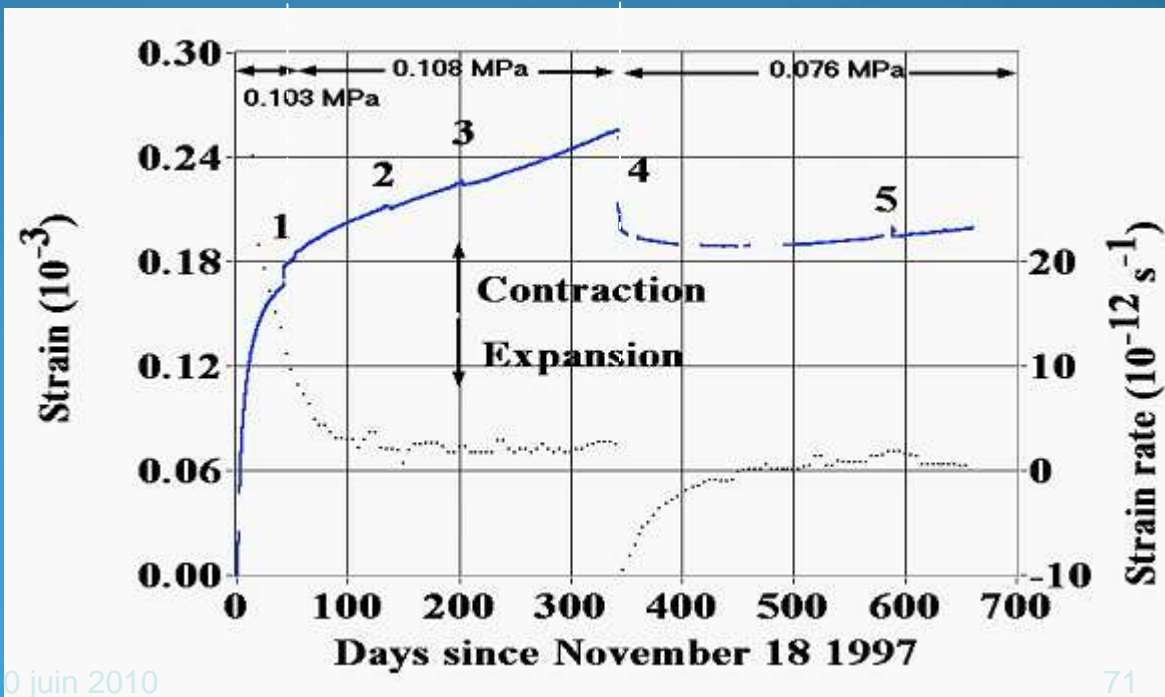
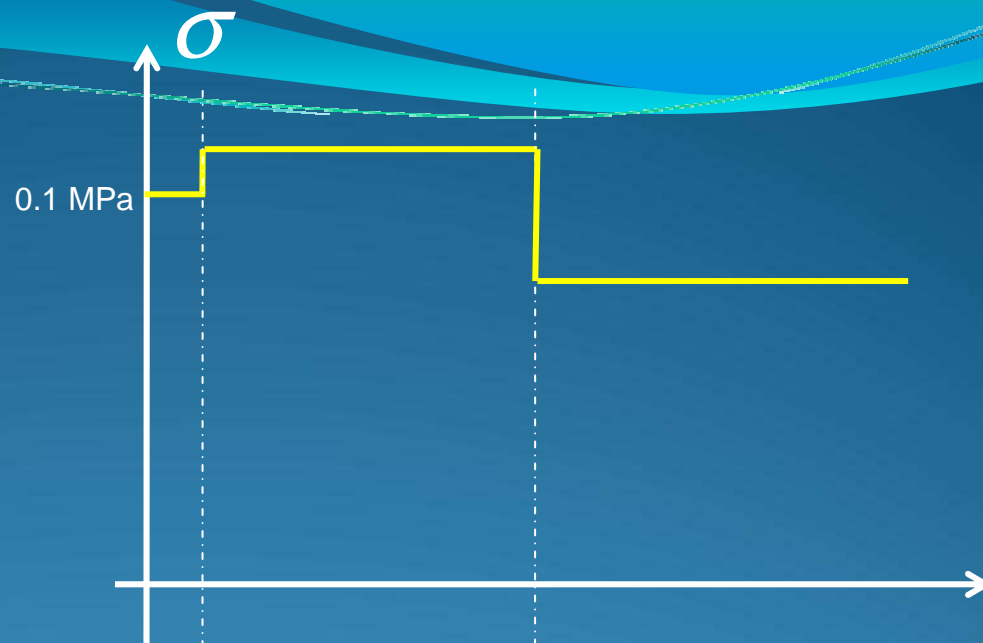
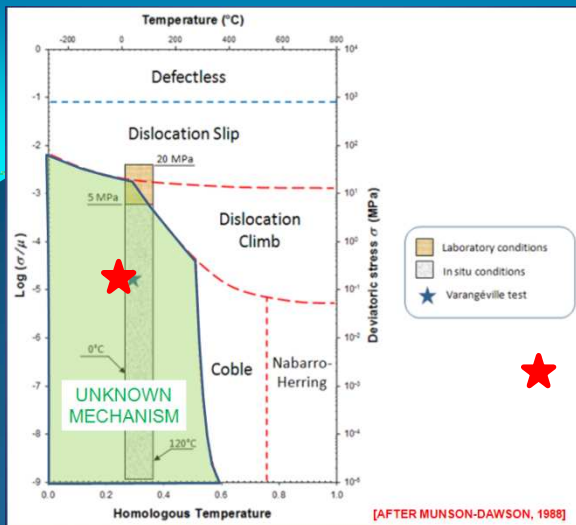
b. décharge

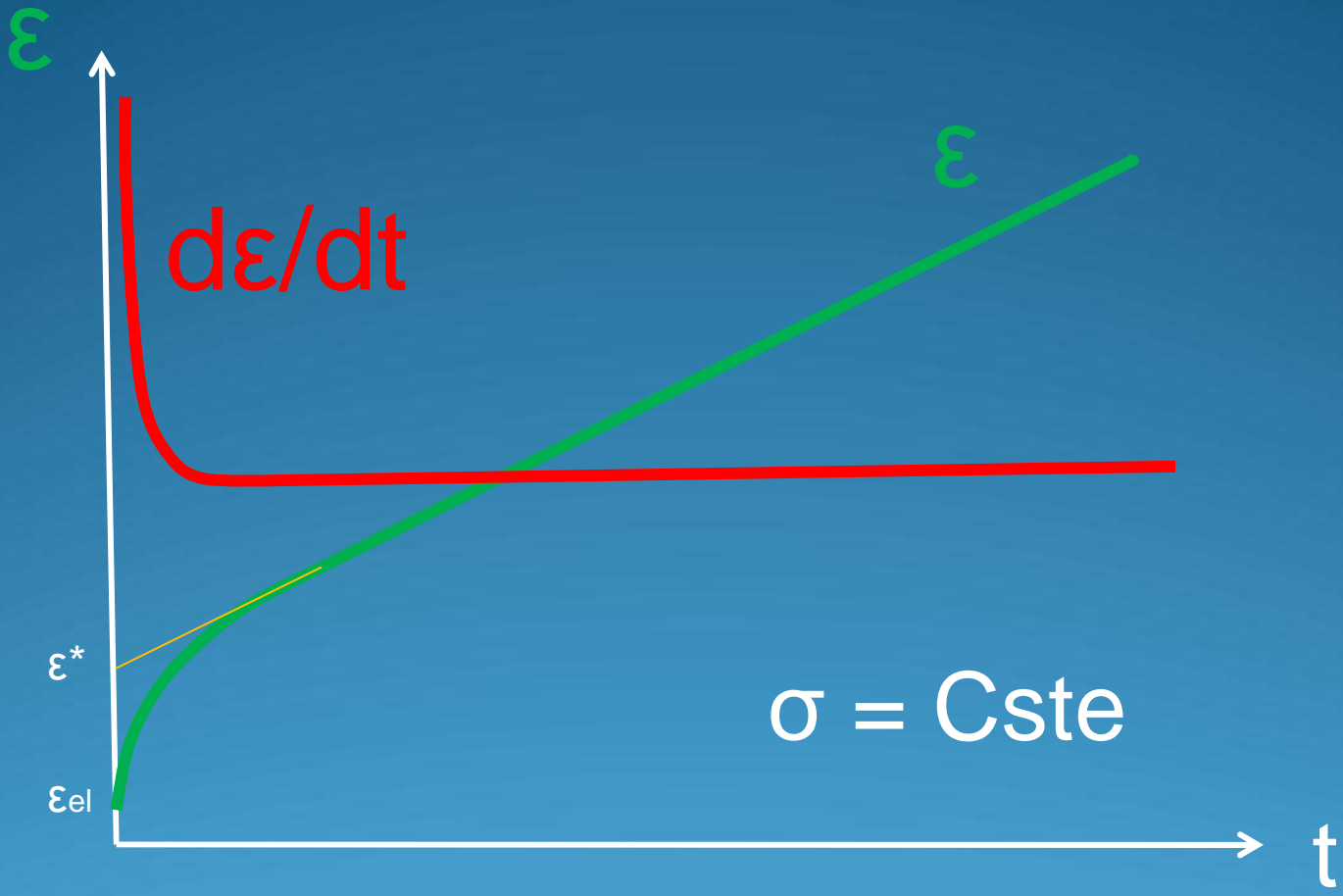
$$\dot{\epsilon}^{vp} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n$$

$$n = 3 \text{ to } 6$$

# Log $\dot{\epsilon}$







## Pour résoudre ces problèmes :

- (1) On applique des charges mortes
- (2) Les capteurs de déplacement ont une résolution du nanomètre
- (3) Les bâtis sont placés dans une galerie de mine, à 160 m de profondeur, où les fluctuations naturelles de température sont de l'ordre de  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$

PEUT ON LEGITIMEMENT EXTRAPOLER  
LES OBSERVATIONS FAITES  
*AU LABORATOIRE* DANS LA GAMME

$$\sigma = 5-15 \text{ MPa ou } : 10^{-10} - 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

AU DOMAINE *UTILE* POUR LES CAVERNES

$$\sigma = 0-5 \text{ MPa ?}$$