



« SACRE »



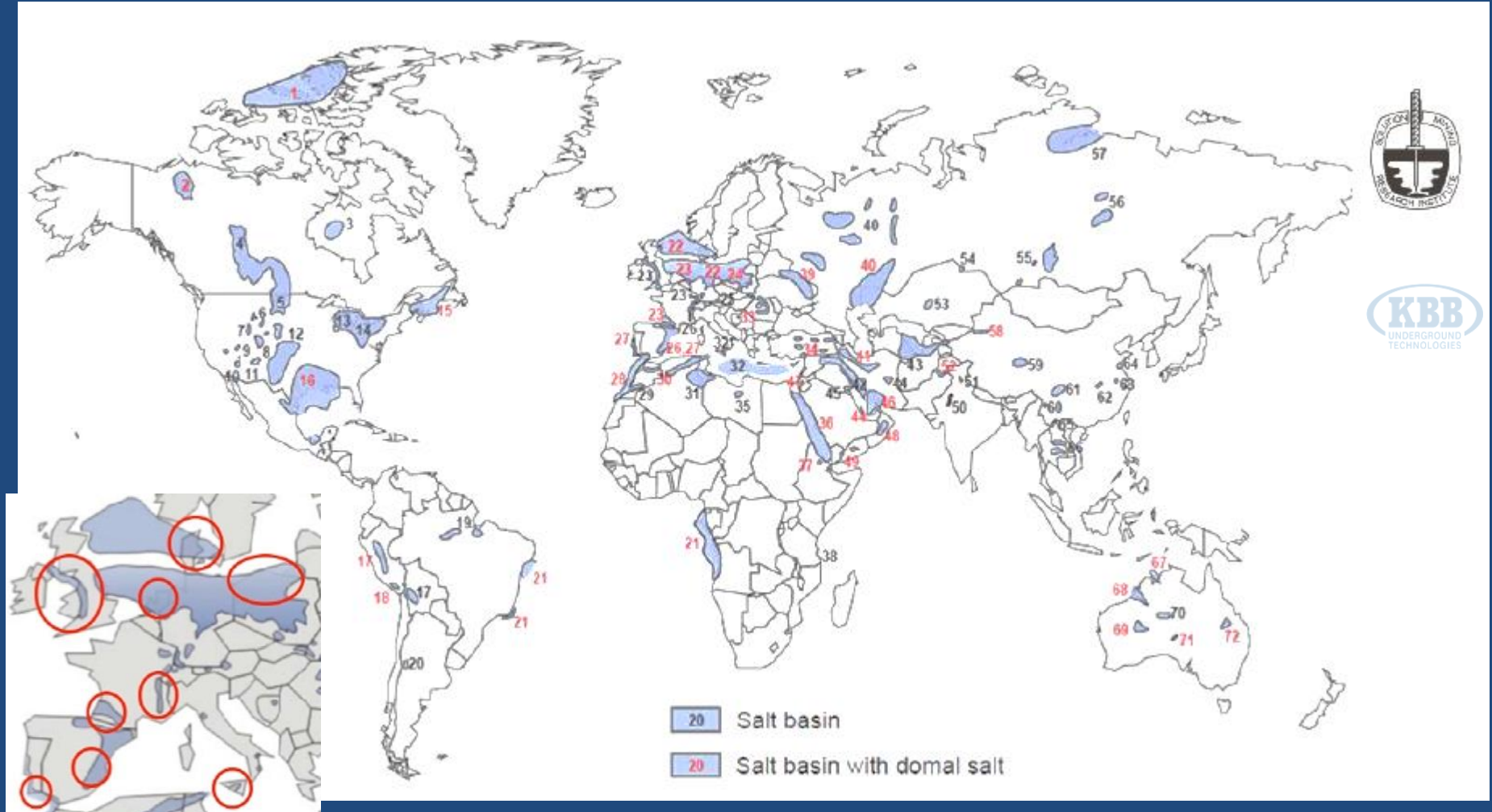
# Effets de chargements thermomécaniques rapides et répétés dans les cavités salines de stockage de gaz naturel ou air comprimé (CAES)

**Pierre Bérest et Hippolyte Djizanne,  
LMS, Ecole Polytechnique**

**Benoît Brouard, Brouard Consulting,**

**Grégoire Hévin, Storengy,**

**Mehdi Karimi-Jafari, Geostock**



SOURCE : KBB et SMRI

# INTRODUCTION

Les cavités salines sont créées par dissolution

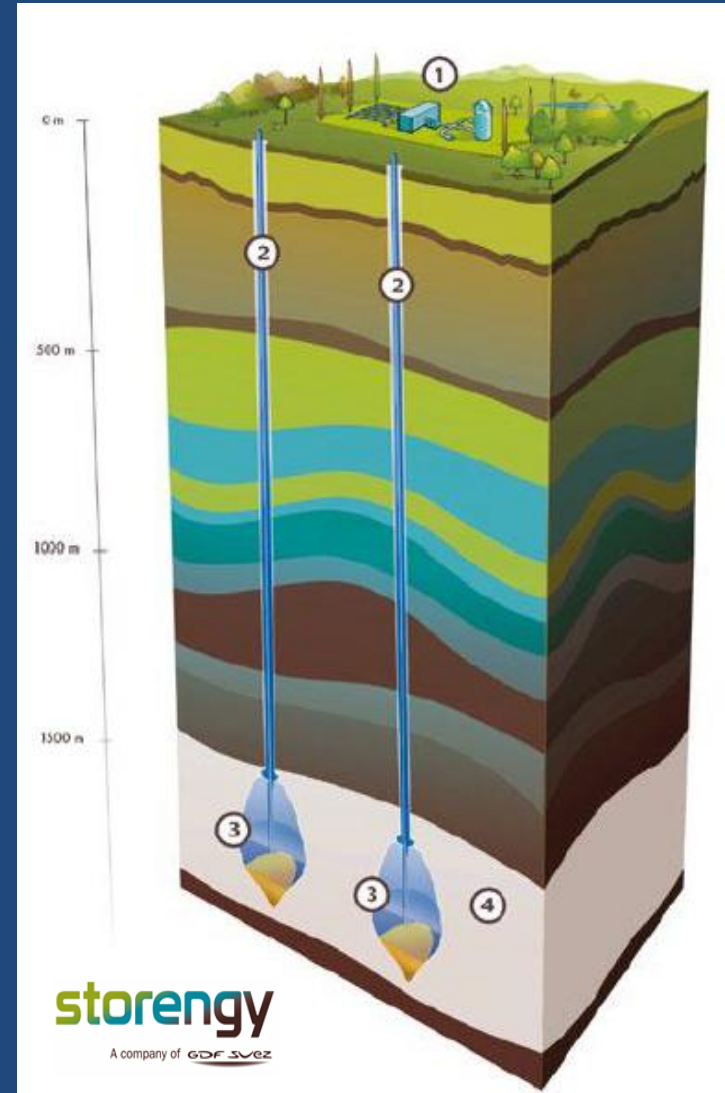
Et sont utilisées pour le stockage :

du **gaz naturel**, du pétrole, de l'essence, du naphta, du kérosène, du propane, de **l'éthane**, de **l'air**, de **l'hydrogène**, de l'éthylène, du propylène ...

Un millier de cavernes de stockage aux USA  
Une centaine en France (Storengy, Géostock, Total).

H = 200 to 3 000 mètres

V= 5,000 to 1,000,000 m<sup>3</sup> CFMR 6 décembre 2012

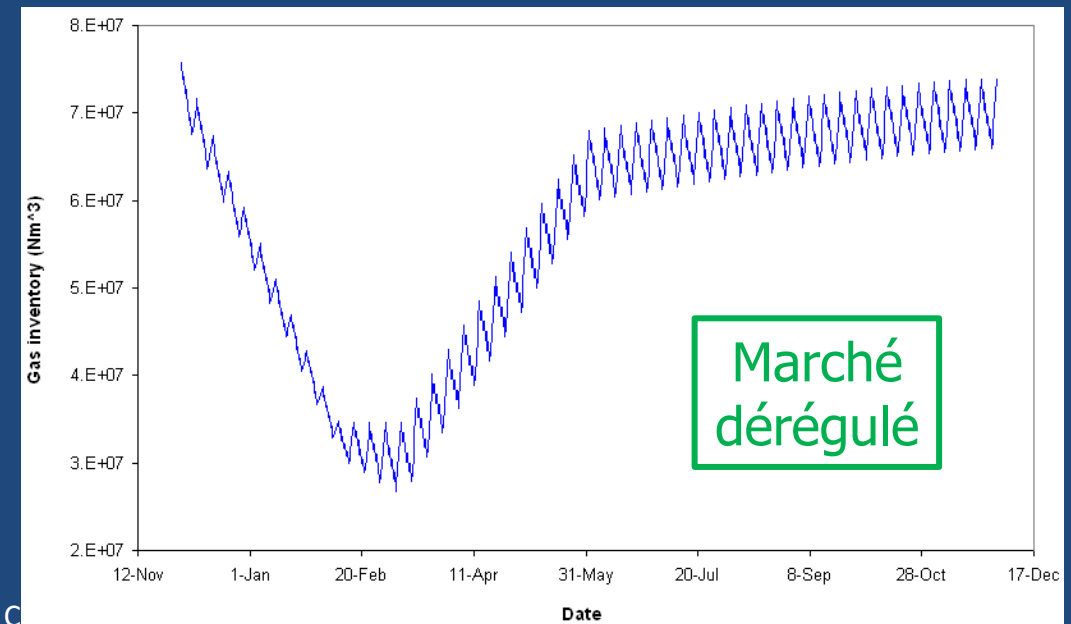
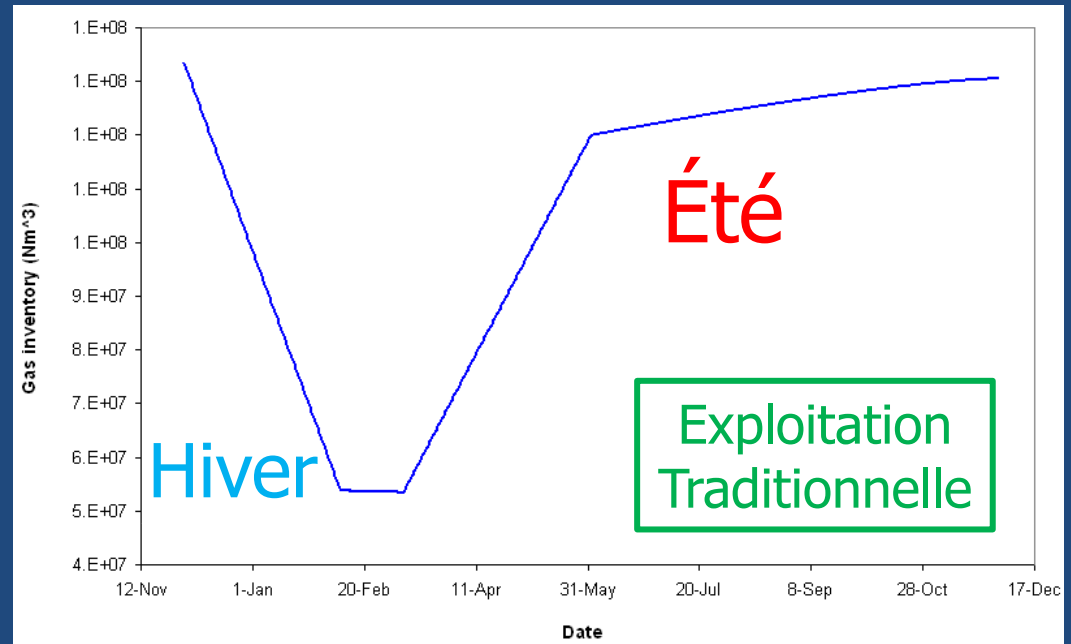


# DEUX ÉVOLUTIONS RÉCENTES

- HFCGSC : La dérégulation du marché du gaz naturel conduit à des modes d'exploitation plus dynamiques des cavités de stockage
- CAES : L'utilisation de sources d'électricité intermittentes (éolien, photovoltaïque) nécessite des capacités de stockage alors que les sites de barrages hydroélectriques sont saturés

# HFCGSC

- High
- Frequency
- Cycled
- Gas
- Storage
- Caverns



C

Les besoins évoluent vers des modes d'exploitation plus agressifs, avec des fluctuations de stock rapides pour bénéficier du prix du gaz au jour le jour.

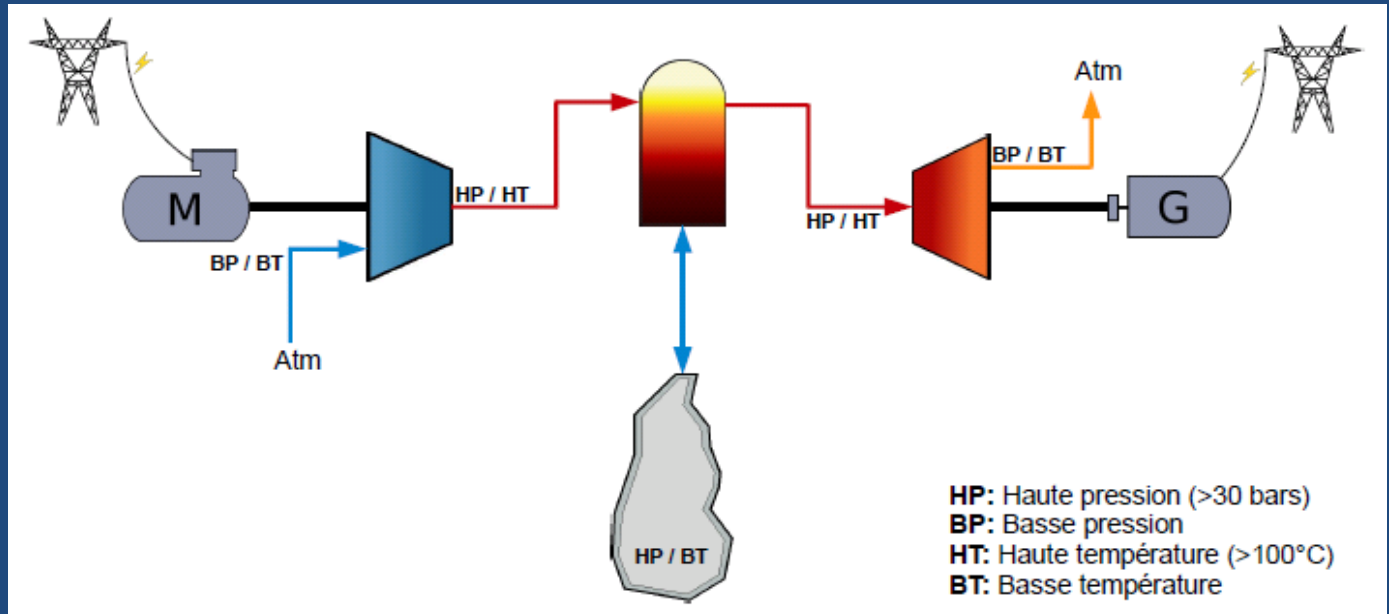
Les cavernes doivent pouvoir être vidées en une dizaine de jours, avec des vitesses de chute de pression qui peuvent dépasser nettement 1-2 MPa/jour.

# CAES

➤ Les cavernes peuvent être utilisées comme un stockage tampon en aval de sources intermittentes (solaire, éolien) d'énergie. L'air peut être comprimé dans la caverne la nuit et turbiné le jour.

Chutes de Pression réduites

Mais chaque jour !



**1. Huntorf** (Allemagne, 1978):  
 320 MW x 3 heures, Rendement: 42 %  
 2 cavernes (310,000m<sup>3</sup>)  
 Profondeur : 650 - 800m  
 Pression (4,3 - 7 MPa)

**2. McIntosh** (USA, Alabama, 1991):  
 110 MW - 26 hours, Efficiency: 49 %  
 1 caverne (560,000 m<sup>3</sup>)  
 Profondeur 450 - 750 m  
 Pression 5,5 – 6,5 MPa

# GISEMENTS DE SEL

Centaines de cavités  
100,000 m<sup>3</sup> à 1,000,000 m<sup>3</sup>  
200 à 300 m

Pas de cavités  
Potentiel intéressant

cavités

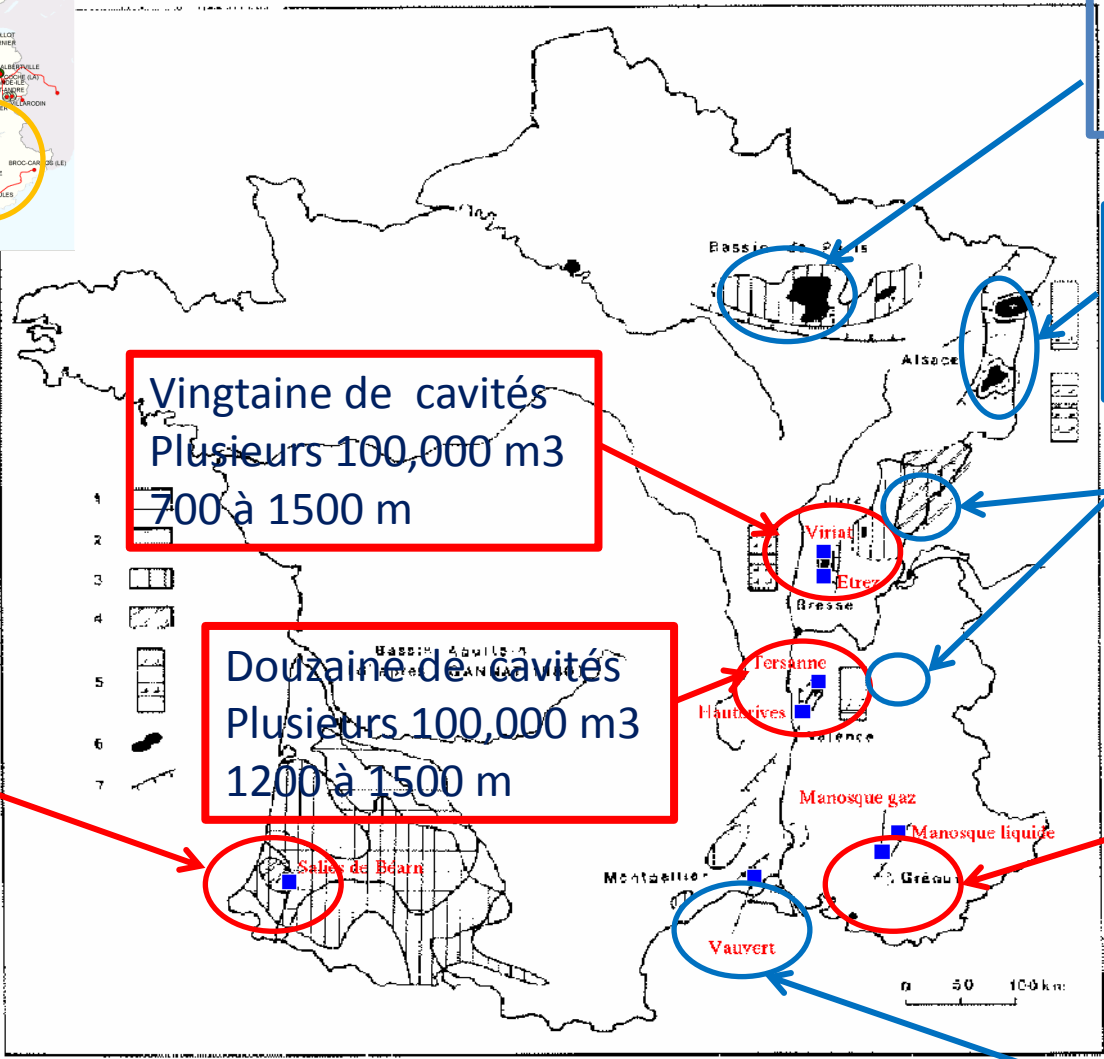
40 cavités  
Plusieurs 100,000 m<sup>3</sup>  
600 à 1300 m

Plusieurs cavités  
Plusieurs 100,000 m<sup>3</sup>  
Trop profond

Vingtaine de cavités  
Plusieurs 100,000 m<sup>3</sup>  
700 à 1500 m

Douzaine de cavités  
Plusieurs 100,000 m<sup>3</sup>  
1200 à 1500 m

4 cavités  
Petit volume  
350 à 700 m



— Les gisements de sel en France et les possibilités de stockages d'hydrocarbures.  
1, bassins oligocènes; 2, bassins liasiques; 3, bassins d'âge keupérien; 4, bassins d'âge muschelkalk; 5, niveaux salifères superposés; 6, zone favorable au stockage (épaisseur de sel supérieure à 100 m, profondeur supérieure à 1 600 m, pureté supérieure à 20 %); 7, taille majeure.

Fond de carte  
D'après Friès, 1981  
SACRE



# DEUX PROBLÈMES MÉCANIQUES

- Un chute rapide de pression engendre un **refroidissement marqué**, des contraintes de traction à la paroi, une fracturation possible.
- La pression dans la cavité subit des variations rapides et répétées, avec une possible **fatigue multicyclique**.
- **Une différence** : en air comprimé, cycles peu amples mais quotidiens ; en gaz naturel, de plus, cycles amples possibles mais moins fréquents.



# DÉPRESSURISATION RAPIDE ET RÉPÉTÉE ENDOMMAGE-T-ELLE LA CAVERNE?

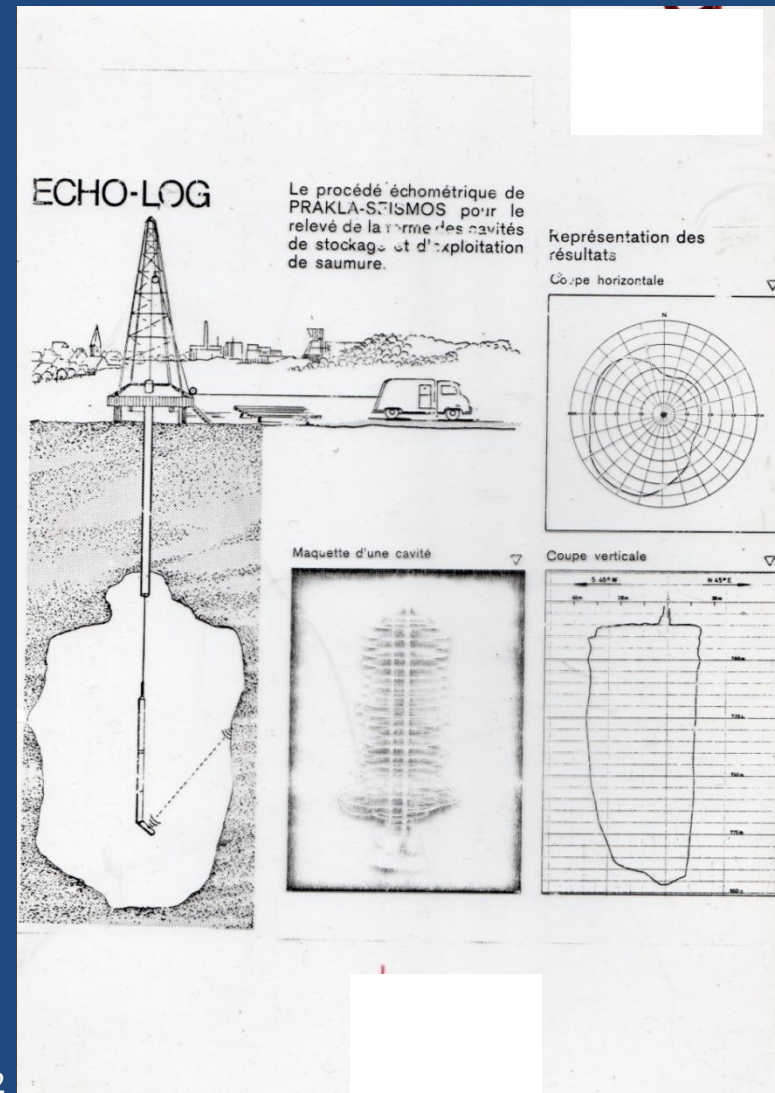
1. Enseignements tirés des cavernes réelles
2. Température du gaz dans une caverne
3. Le soutirage du gaz engendre son refroidissement
4. Avec des effets thermomécaniques
5. Fracturation à la paroi
6. Fatigue multicyclique
7. Conclusions

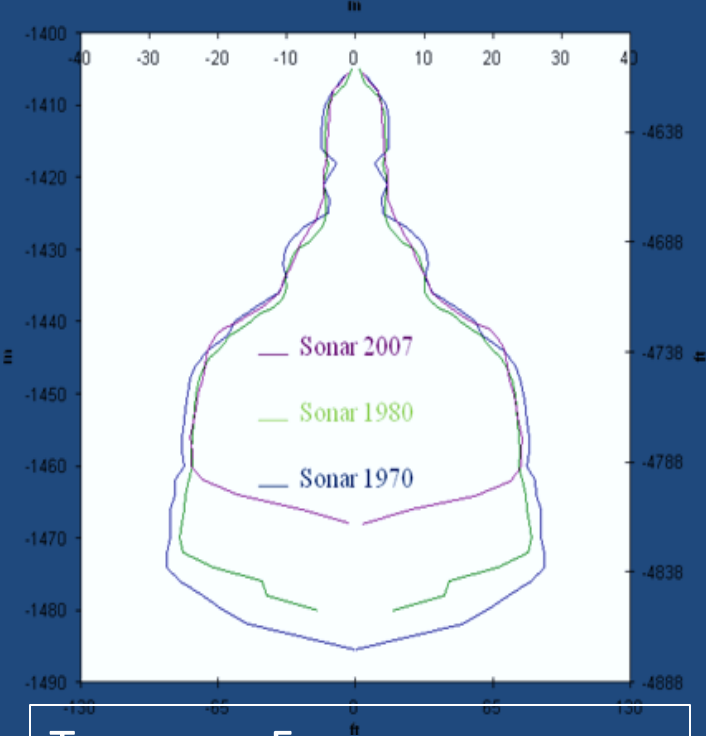
Les cavernes réelles connaissent-elles des désordres dues au refroidissement, ou au multicyclage ?

La réponse est parfois délicate car la précision des mesures (1 à 2 % sur les distances) faites à différents instants ne permet pas toujours de distinguer entre :

- Une convergence qui laisse le sel continu
- La chute de blocs ou l'écaillage

(Etude pour Storengy, SACRE (ANR) et Ineris)





Tersanne, France

**Profondeur 1450 m**

Cycles annuels

Entre 8 et 22 MPa

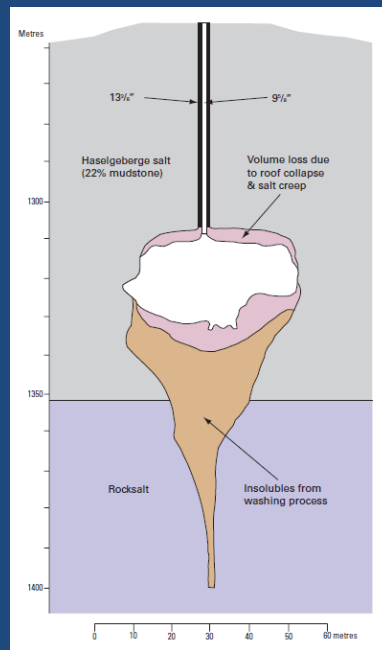
Après 9 ans, 30% de perte

de volume; 60% en 30 ans

Ecaillage vraisemblablement limité

(Boucly et Legreneur, 1981

Hévin et al., 2007)



Kiel 101, Allemagne, 1967.

**Profondeur 1350 m**

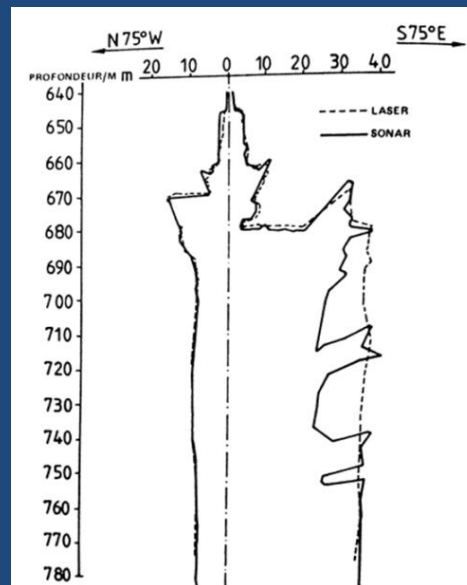
Pression chute de 13,1 MPa

À presque zéro.

Entraînant la chute du toit

Pas de changement de température car caverne remplie de saumure

(Dreyer, 1972 ; Baar 1976)



CFMR 6 décembre 2012

Huntorf CAES, Allemagne

**Profondeur 650-800 m**

Cycles entre 4,5 et 7 MPa

Les « rideaux de sel » en

surplomb sont tombés

pendant le premier

remplissage en air (Quast,

1983). **Archimède ?**

Pas d'écaillage ultérieur

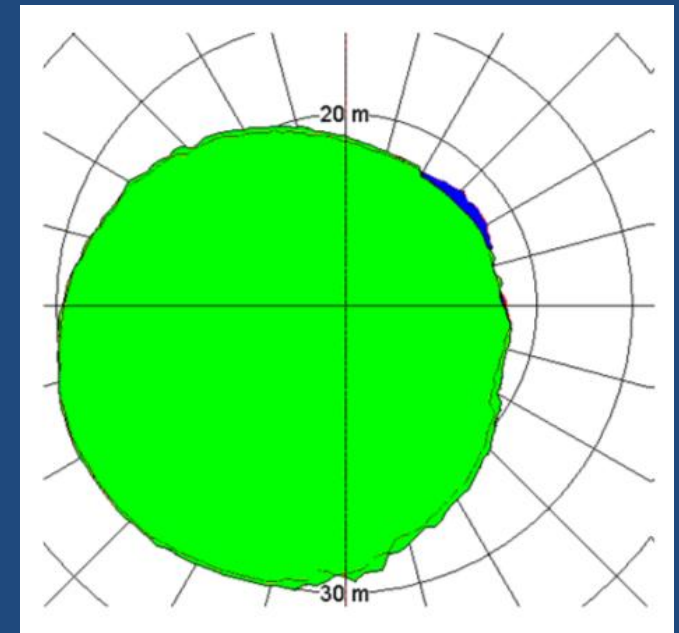
(Crotagino et al., 2001)

Caverne #5 de Markham.  
**Profondeur 1075 à 1775 m**  
Superposition de deux coupes verticales datant de mai 1995 et janvier 2002. Noter le soulèvement du fond et les chutes de blocs des parois.

Cette caverne était cyclée en pression de 8 à 10 fois par an. La perte de volume en 7 ans est de 5% ; de plus, un volume équivalent de sel est tombé des parois au fond de la caverne.

(Cole, 2002, p. 82).

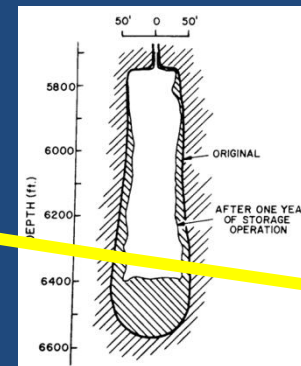
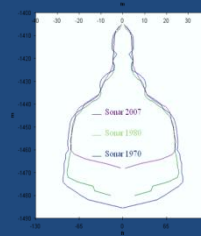
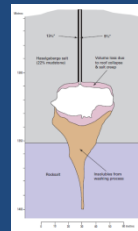
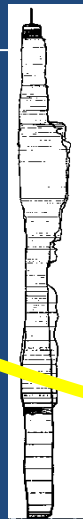
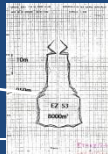
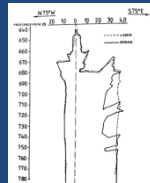
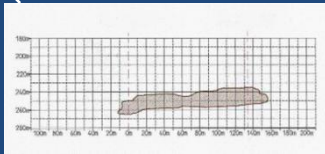
CFMR 6 décembre 2012



Lille-Torup, Danemark  
Section horizontale à **1460 m**.  
La pression chute de 14 MPa (15 Jan. 2005) à 6 MPa (31 Mars 2005). Mesure très fine de la forme.  
(Rokahr et al., 2007).

10<sup>-5</sup>/an

VITESSE DE FERMETURE 30%/an



1 000 m

3 10<sup>-4</sup>/an

2 000 m

# RETOUR d'EXPÉRIENCE (bilan)

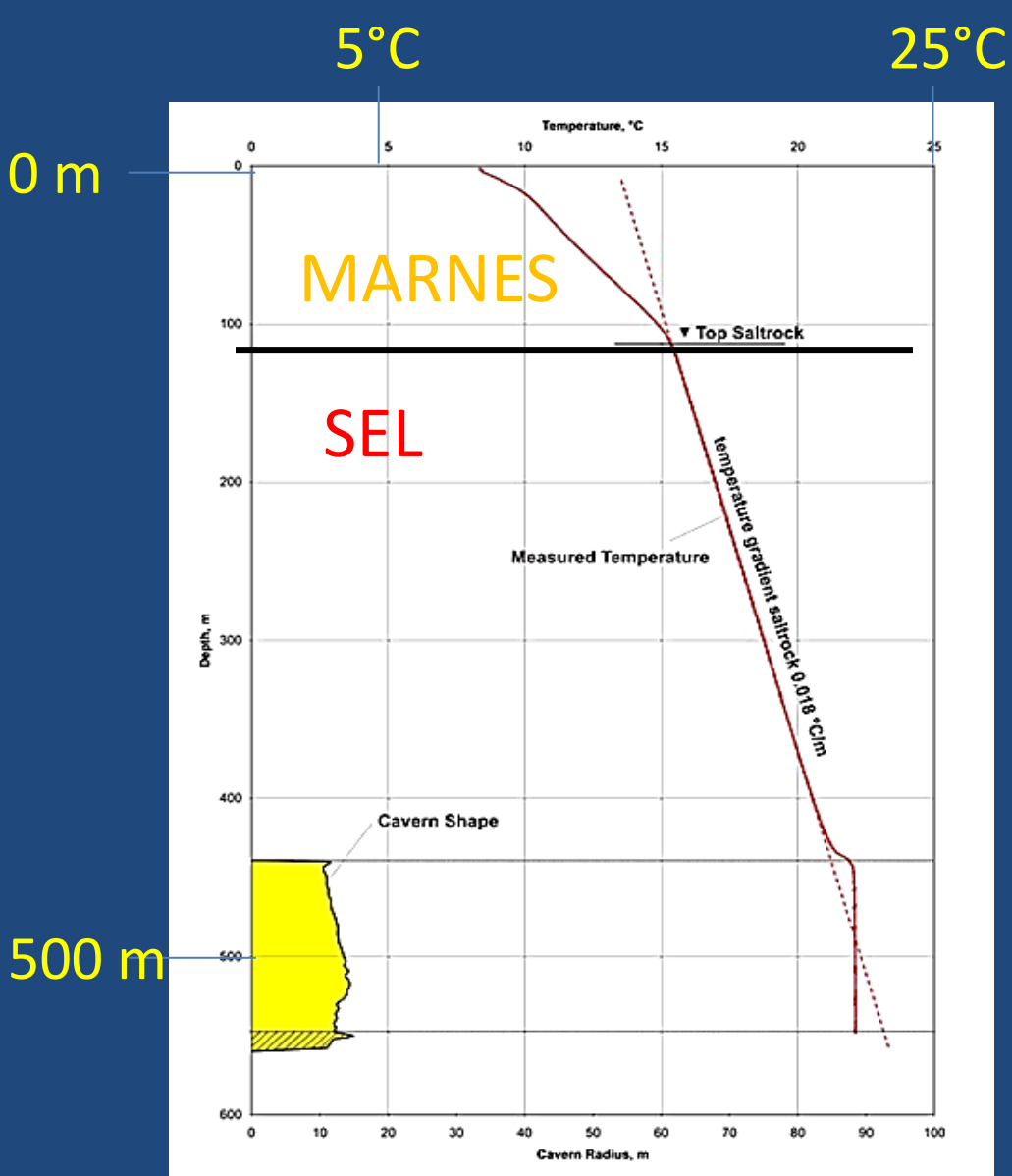
- Les désordres en opération (perte de volume, écaillage) surviennent dans des cavernes profondes de stockage de gaz naturel ( > 1300 m)
- Les CAES sont *a priori* moins profonds et soumis à de faibles amplitudes de pression mais :
  - Variations journalières, détente rapide, refroidissement
  - Fatigue multi-cyclique

# DÉPRESSURISATION RAPIDE ET RÉPÉTÉE ENDOMMAGE-T-ELLE LA CAVERNE?

1. Enseignements tirés des cavernes réelles
2. Température du gaz dans une caverne
3. Le soutirage du gaz engendre son refroidissement
4. Avec des effets thermomécaniques
5. Fracturation à la paroi
6. Fatigue multicyclique
7. Conclusions



# TEMPÉRATURE DU GAZ DANS UNE CAVERNE AU REPOS



PROFIL DE TEMPÉRATURE  
DANS UNE CAVERNE À  
500-M DE PROFONDEUR

REMERCIEMENTS: **Andreas Banach**

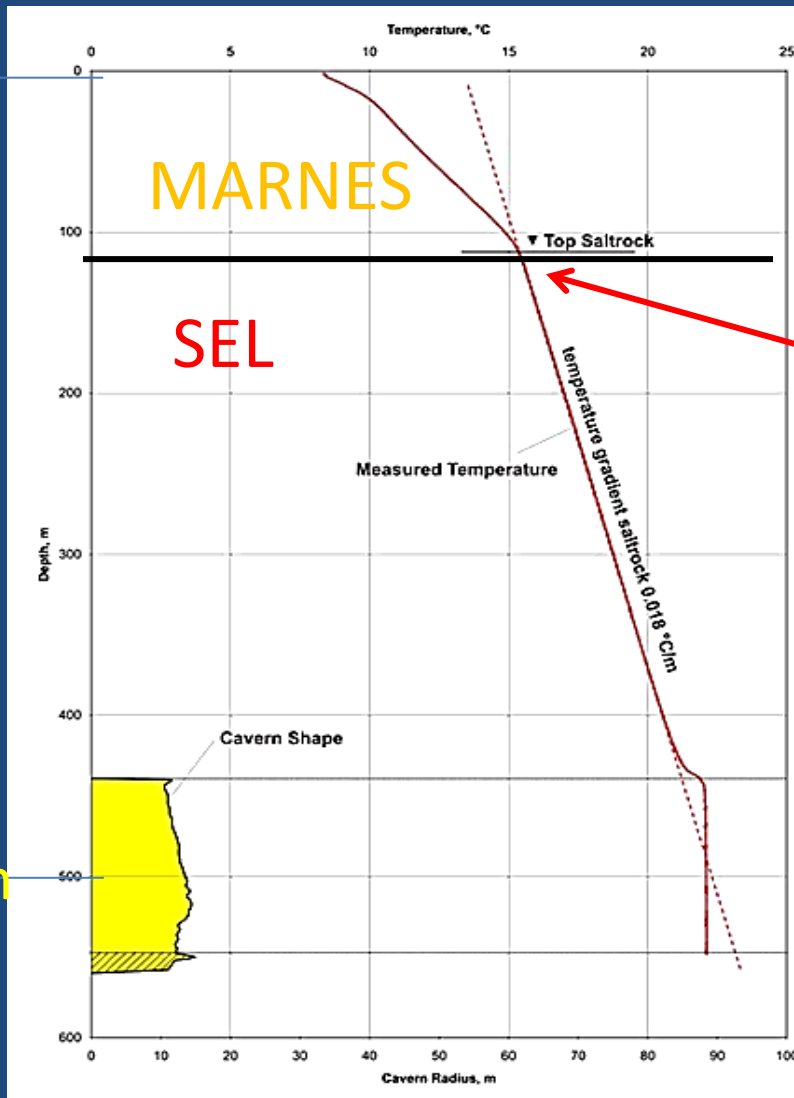
CFMR 6 décembre 2012

5°C

25°C

## INTERFACE MARNES - SEL

0 m



$$T_{sel} = T_{marnes}$$

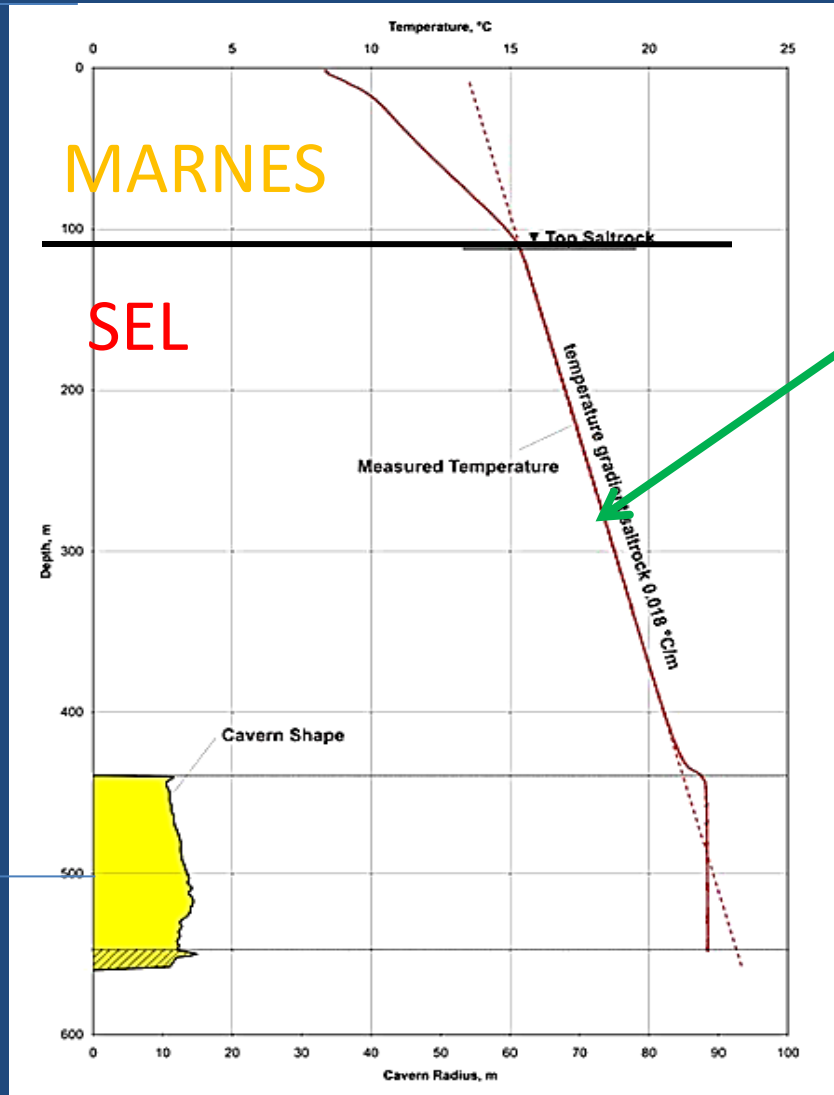
$$K_{sel} \frac{dT_{sel}}{dz} = K_{marnes} \frac{dT_{marnes}}{dz}$$

500 m

REMERCIEMENTS: Andreas Banach

CFMR 6 décembre 2012

0 m



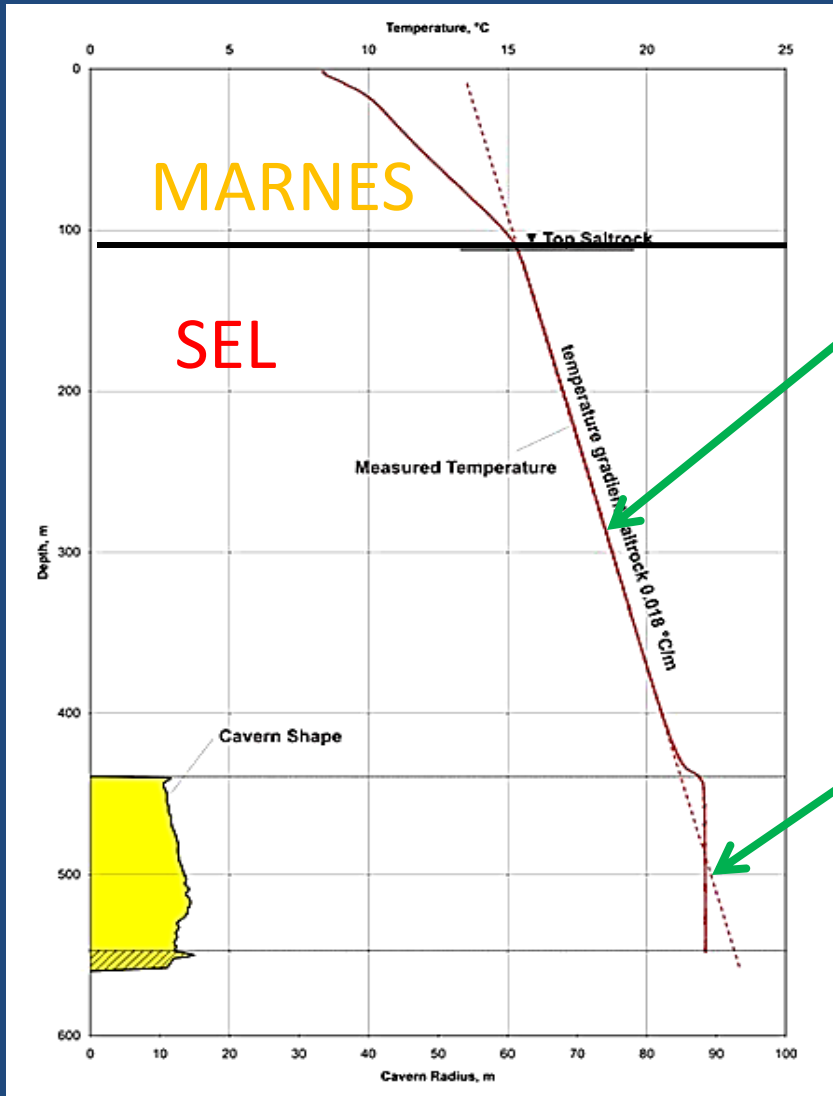
GRADIENT  
GÉOTHERMIQUE  
DANS LA  
FORMATION SALIFÈRE

1,8°C/100m

500 m

REMERCIEMENTS: Andreas Banach

CFMR 6 décembre 2012



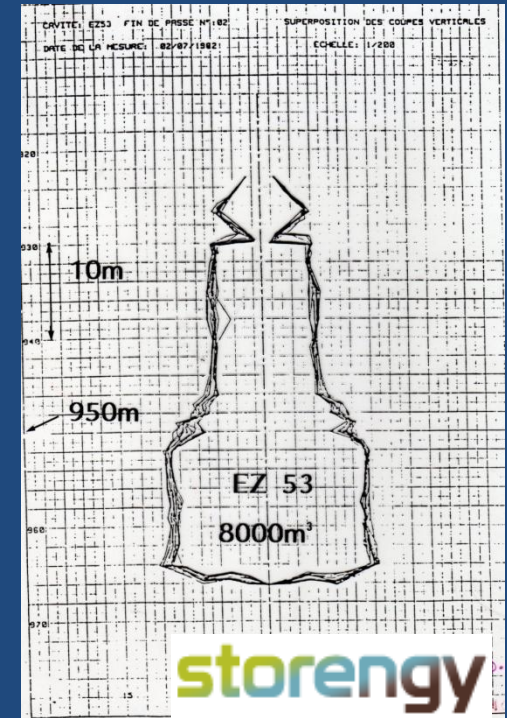
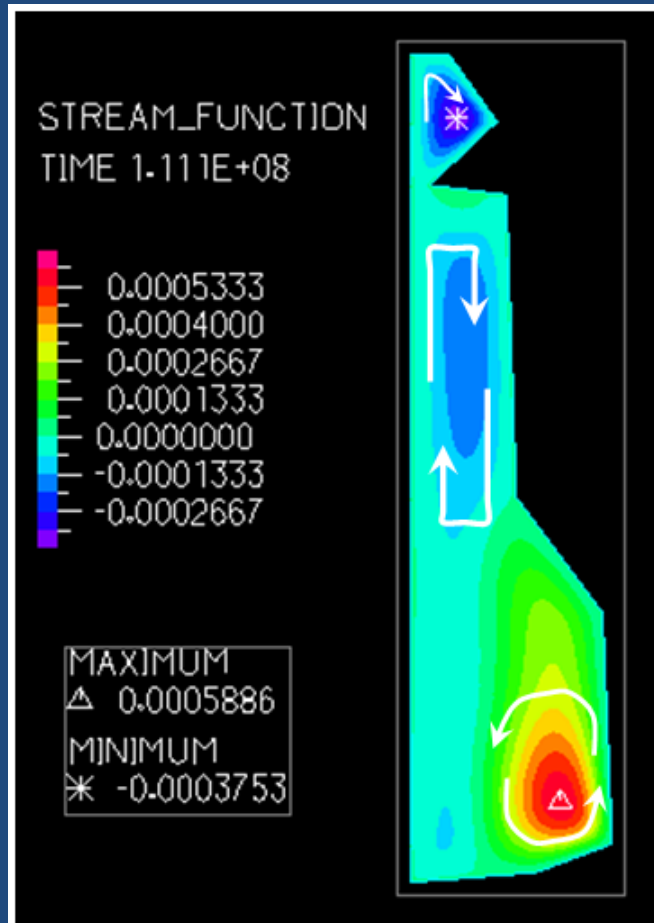
GRADIENT  
GÉOTHERMIQUE  
DANS LA  
FORMATION SALIFÈRE

1,8°C/100m

DANS LA CAVERNE LA  
TEMPÉRATURE EST  
PRATIQUEMENT  
UNIFORME

REMERCIEMENTS: Andreas Banach

**LA TEMPÉRATURE DANS LA CAVERNE  
EST PRESQUE UNIFORME  
À CAUSE DU BRASSAGE DÛ À LA  
CONVECTION NATURELLE**



Karimi-Jafari et al.

DANS UNE CAVERNE, LE FLUIDE EST BRASSÉ  
PAR LA CONVECTION NATURELLE



# DÉPRESSURISATION RAPIDE ET RÉPÉTÉE ENDOMMAGE-T-ELLE LA CAVERNE?

1. Enseignements tirés des cavernes réelles
2. Température du gaz dans une caverne
3. Le soutirage du gaz engendre son refroidissement
4. Avec des effets thermomécaniques
5. Fracturation à la paroi
6. Fatigue multicyclique
7. Conclusions

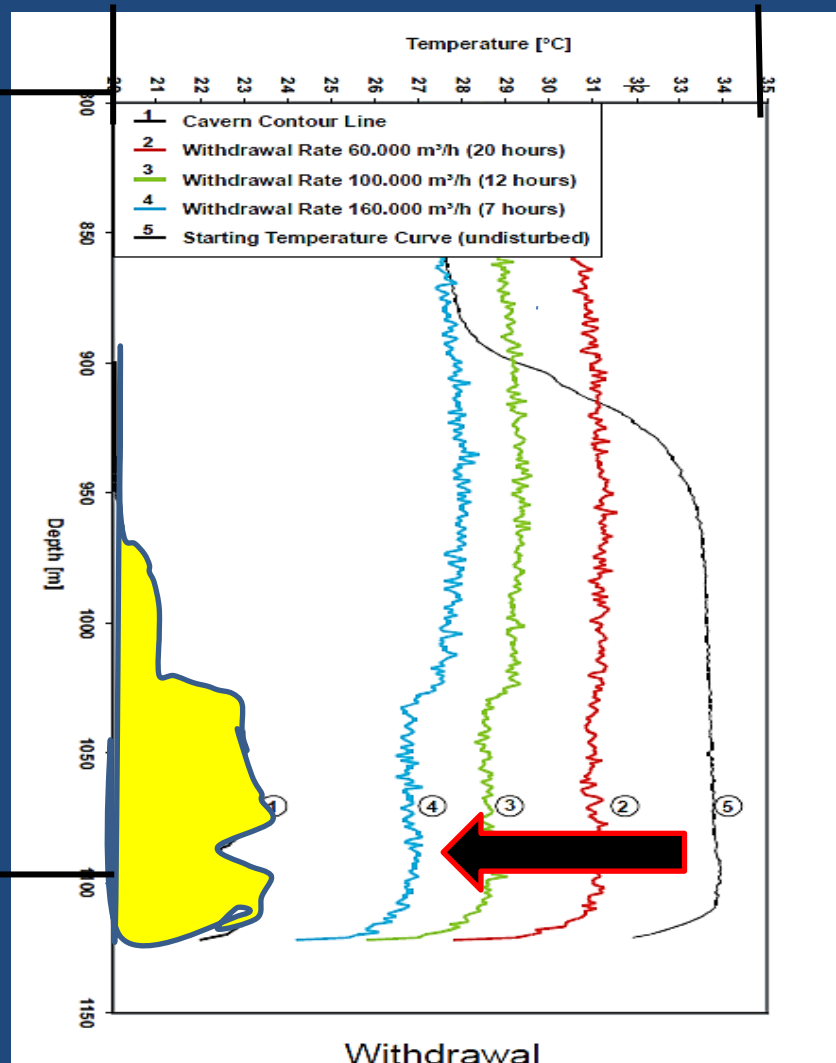
« SACRE »

# La détente s'accompagne d'un refroidissement

20°C

35°C

800 m



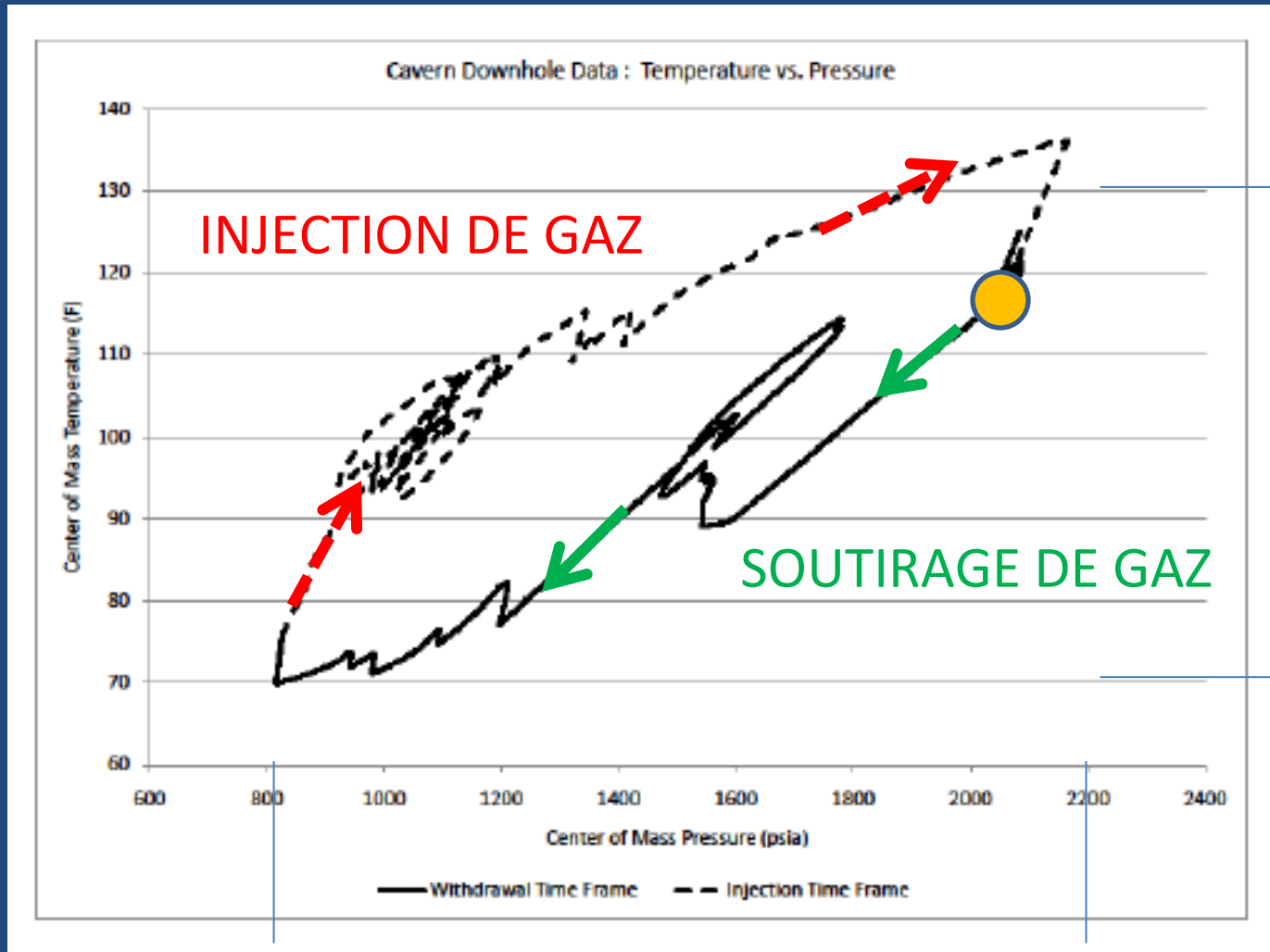
1 100 m

EFFETS DE TROIS  
SOUTIRAGES DE  
GAZ NATUREL DE  
MÊME AMPLEUR

À DÉBITS DISTINCTS

(Klafki & al, 2003)

# Évolutions de la pression et la température du gaz pendant un cycle (Benefield, 2010)



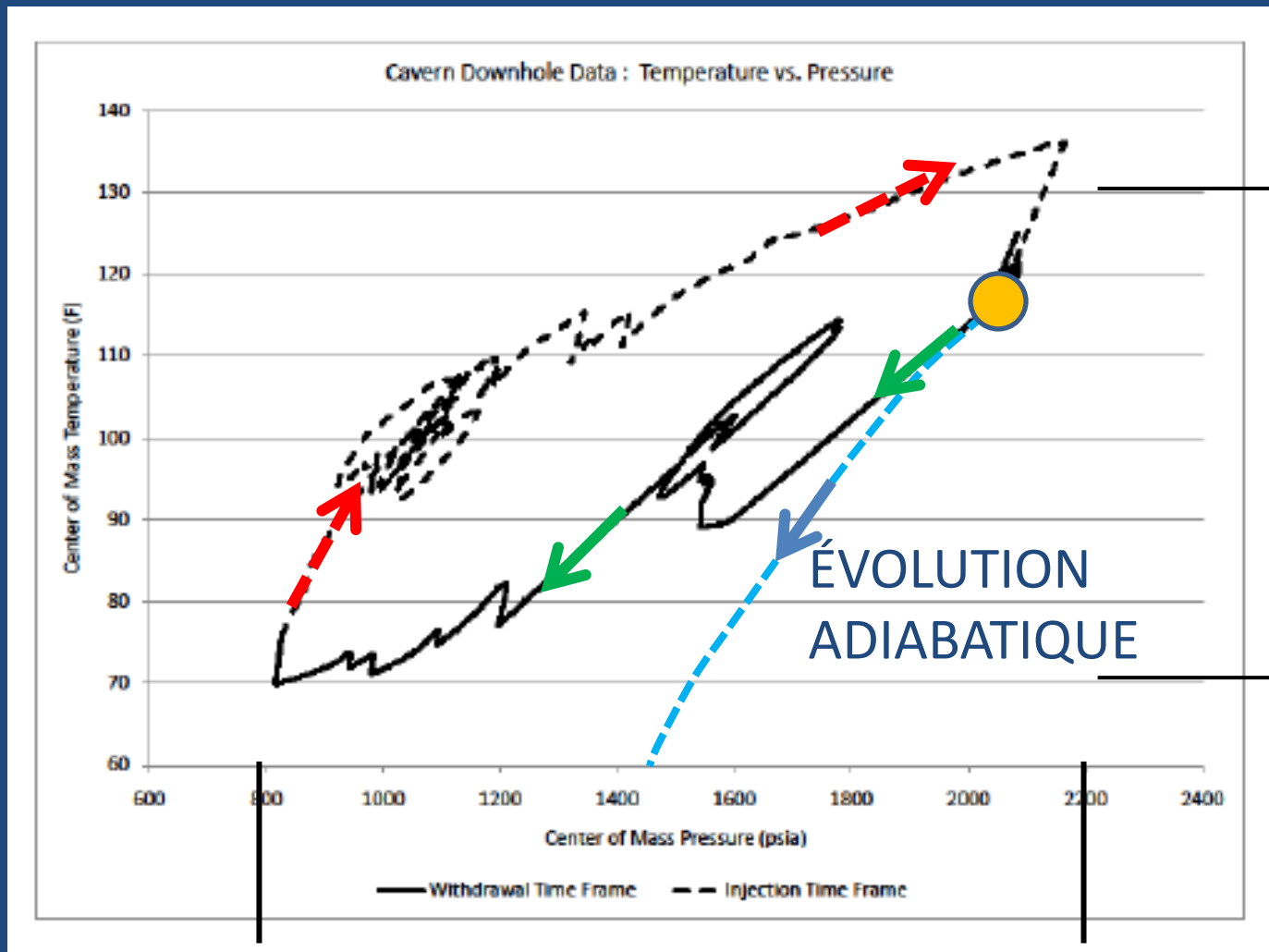
130°F  
(54,4°C)

70°F  
(21,1°C)

800 psi (5,6 MPa)

2200 psi (16,2 MPa)

# Évolutions de la pression et la température du gaz pendant un cycle (Benefield, 2010)



130°F  
(54,4°C)

70°F  
(21,1°C)

800 psi (5,6 MPa)

CFMR 6 décembre 2012

2200 psi (16,2 MPa)

# Evolution de la température du gaz (Température $T$ et masse $m$ )

$$mC_v\dot{T} - \dot{m}rT = K_R \int \frac{\partial T}{\partial n} dA + \langle \dot{m} \rangle C^P (T^{inj} - T) + L\dot{m}_v$$



Energie interne  
–  
Puissance  
Efforts extérieurs



Apport de chaleur  
du massif  
par conduction



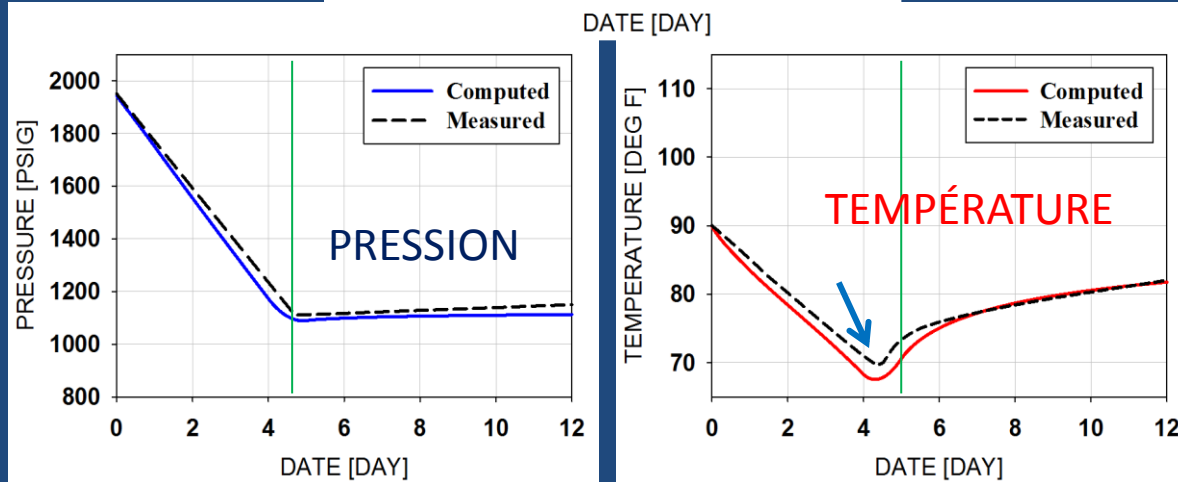
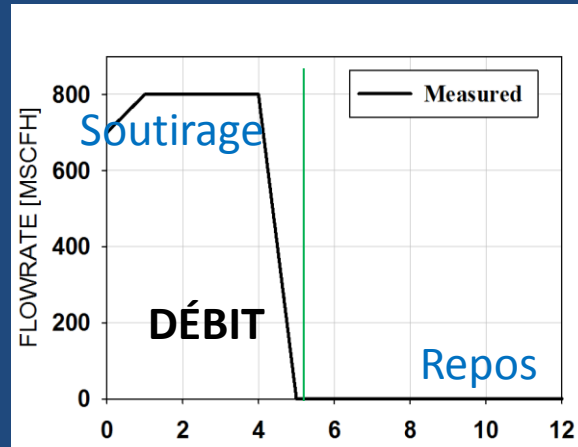
Apport d'enthalpie  
par injection d'air



Condensation

# EXEMPLE DE CALCUL DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES DANS UNE CAVERNE EN GAZ





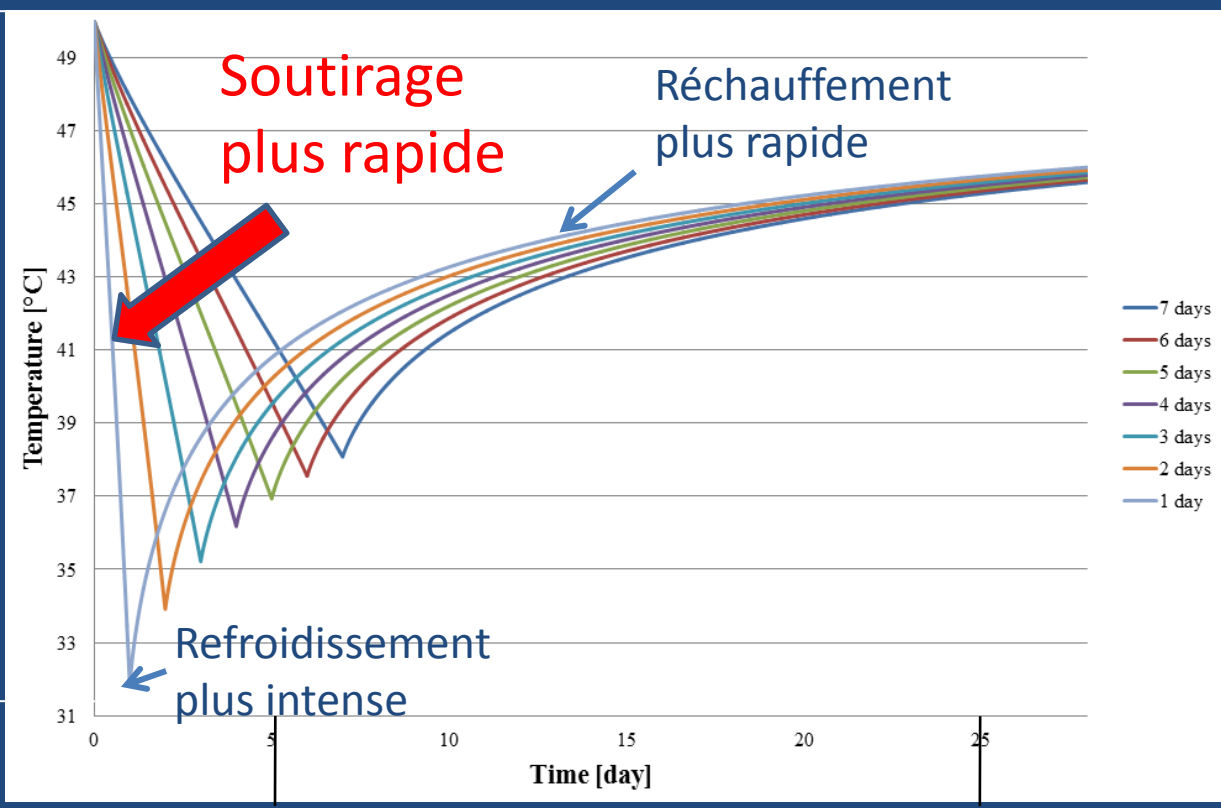
## Caverne à Melville, Canada (Crossley, 1996).

Débit mesuré ; pression et température mesurées et observées

# ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES CALCULS

1. Le refroidissement est plus grand si la vitesse de soutirage est plus grande
2. Le refroidissement est plus grand quand la caverne est plus grande

50°C



31°C

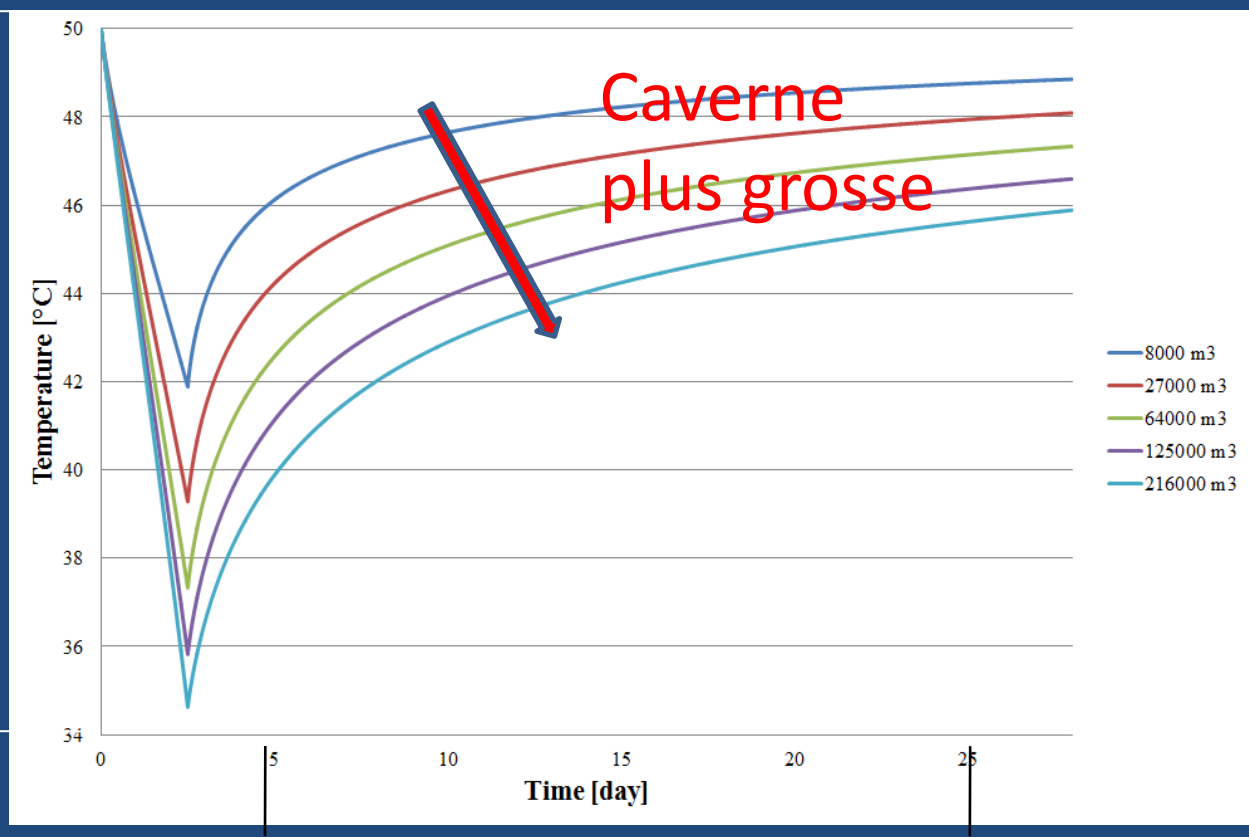
5 jours

25 jours

**Caverne sphérique, volume de 216 000 m<sup>3</sup> :  
50% du stock est soutiré en 1, 2, 3, 4, 5, 6 ou 7 jours.  
Le refroidissement est plus intense si le soutirage est plus rapide (LMS, Ecole Polytechnique)**

50°C

34°C



5 jours

25 jours

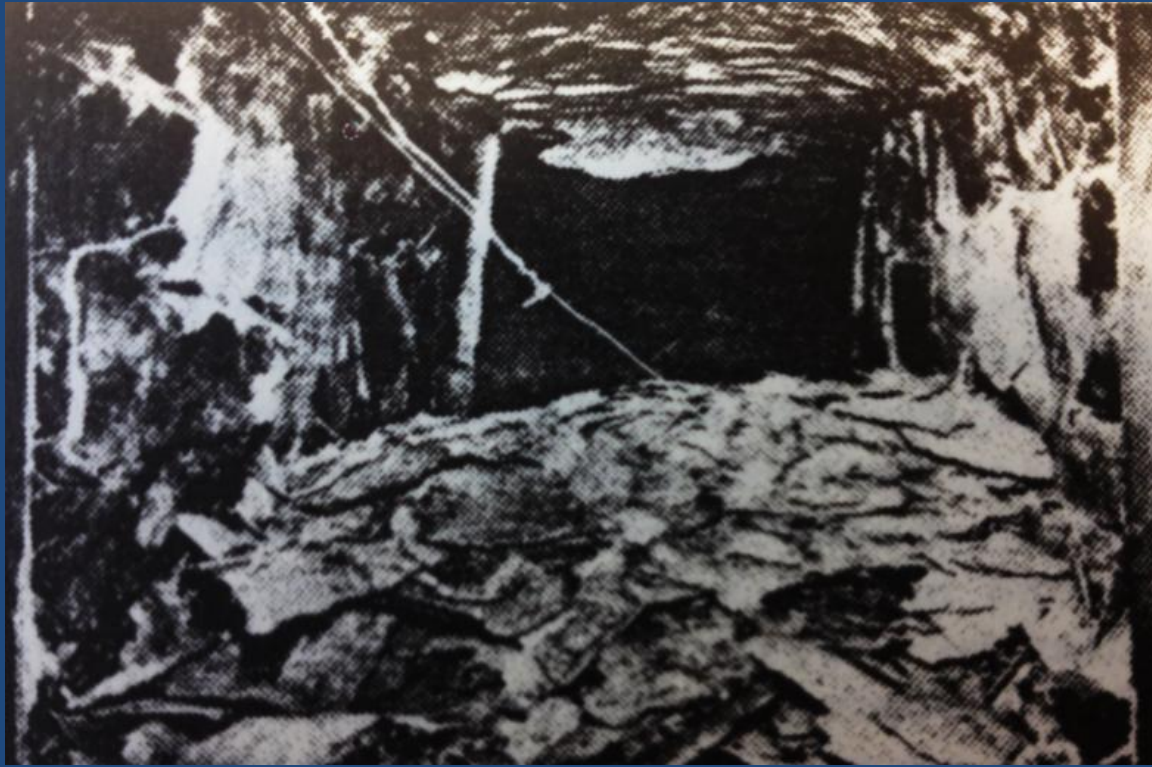
25% du stock de gaz est soutiré en 2 jours

Le volume de la caverne est de 8000 m<sup>3</sup>, 27,000 m<sup>3</sup>, 64,000 m<sup>3</sup>, 125,000 m<sup>3</sup> or 216,000 m<sup>3</sup>

Le refroidissement est plus intense quand la caverne est plus grande.  
(LMS, Ecole Polytechnique)

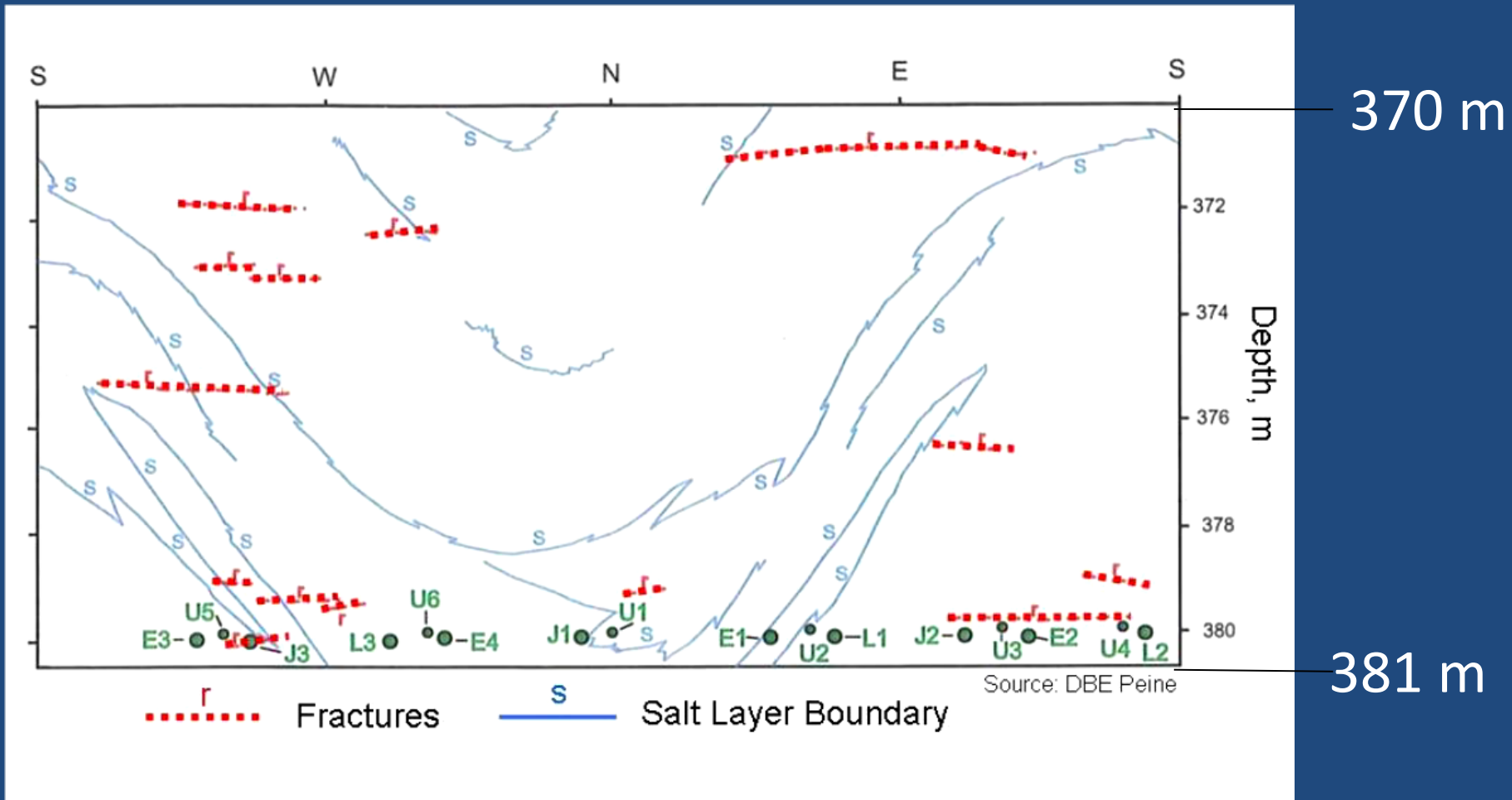
# DÉPRESSURISATION RAPIDE ET RÉPÉTÉE ENDOMMAGE-T-ELLE LA CAVERNE?

1. Enseignements tirés des cavernes réelles
2. Température du gaz dans une caverne
3. Le soutirage du gaz engendre son refroidissement
4. Avec des effets thermomécaniques
5. Fracturation à la paroi
6. Fatigue multicyclique
7. Conclusions



Des gaz d'échappement de diesel chauds (315 °C) d'une centrale électrique souterraine circulent dans une galerie horizontale dans du granite 150-m de profondeur à North Bay, Ontario, Canada.

*" [Test runs in a small test passage] showed that spalling occurred at a surface temperature rise as low as 61 °C. One run was continued for 8-1/2 hours and a mass of spall was produced."* (Lee et al., 1982)



Puits d'aération de la mine de sel de Gorleben : "During the cold season, temperatures in the shaft decreased by 20°C ... within a time period of 80 days ... horizontal and vertical fractures were detected by routine inspections in the shaft. These fractures had an average spacing of about 2.8 m. The fracture aperture amounted up to several mm." (Wallner and Eickemeier, 2001 ; Zapf et al., 2012)

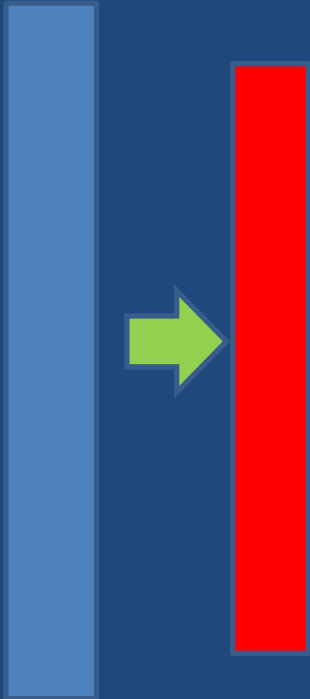
# EFFETS DES VARIATIONS DE TEMPÉRATURE DANS LES OUVRAGES SOUTERRAINS

Les changements de température dans une caverne (ou une galerie, ou un puits) engendrent à la paroi des contraintes « thermiques » :

- Des tractions si on refroidit (beaucoup) : fractures perpendiculaires à la paroi
- Des compressions si on réchauffe (beaucoup) : écaillage généralisé de la paroi



# TRACTIONS DUES AU FROID

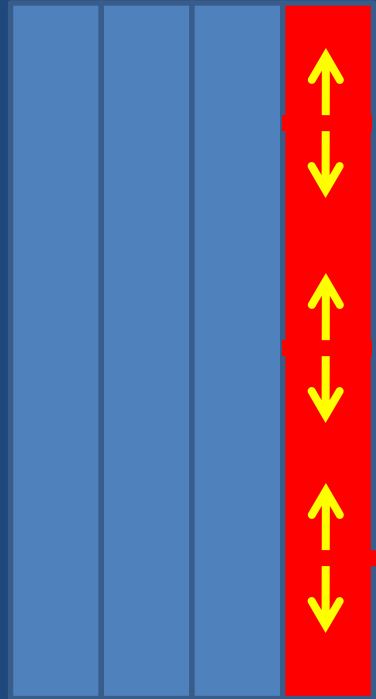
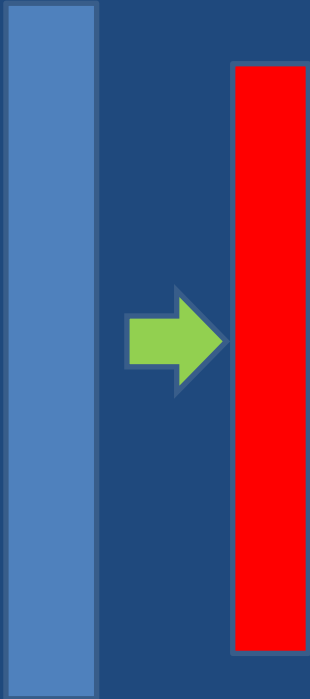


$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} + \alpha \tau \delta_{ij}$$

$$\varepsilon_{ij,kl} + \varepsilon_{kl,ij} - \varepsilon_{ik,jl} - \varepsilon_{jl,ik} = 0$$

REFROIDISSEMENT  
(CONTRACTION)

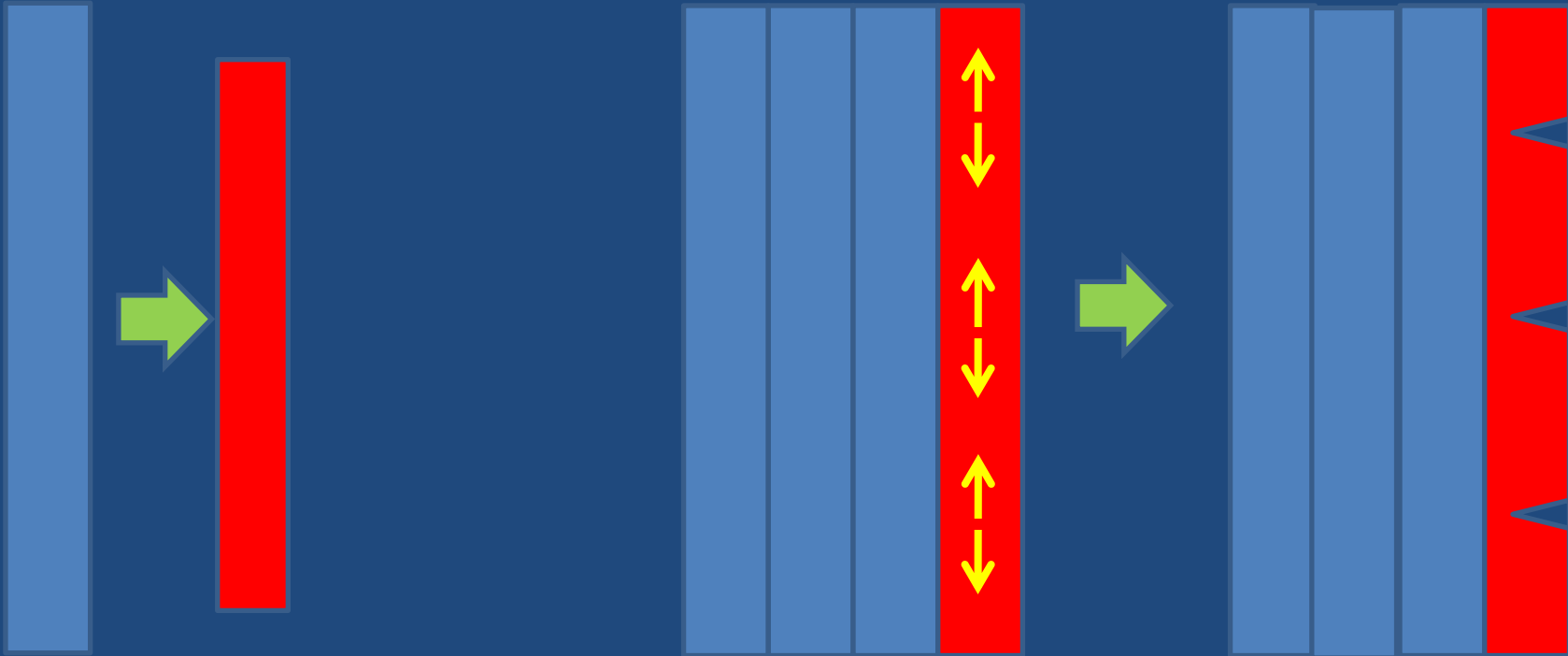
# TRACTIONS DUES AU FROID



REFROIDISSEMENT  
(CONTRACTION)

REFROIDISSEMENT À LA  
PAROI

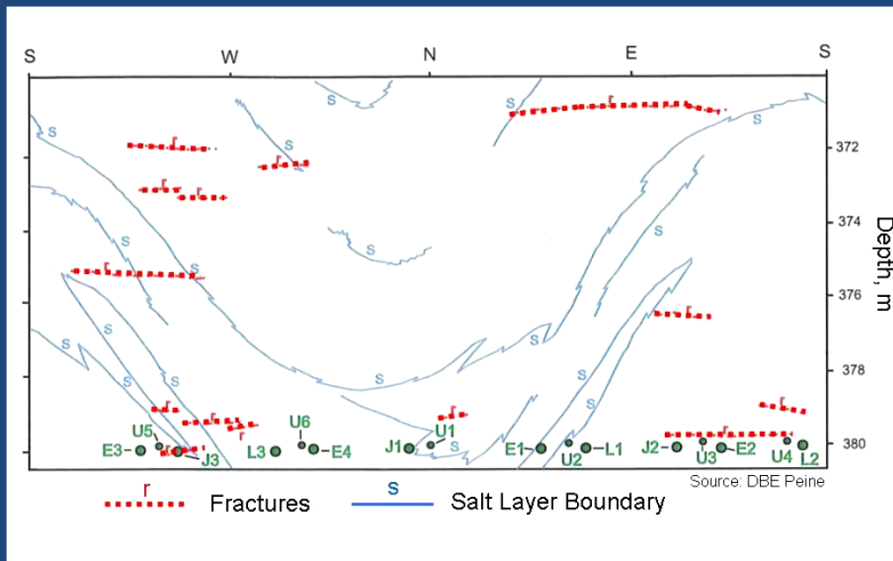
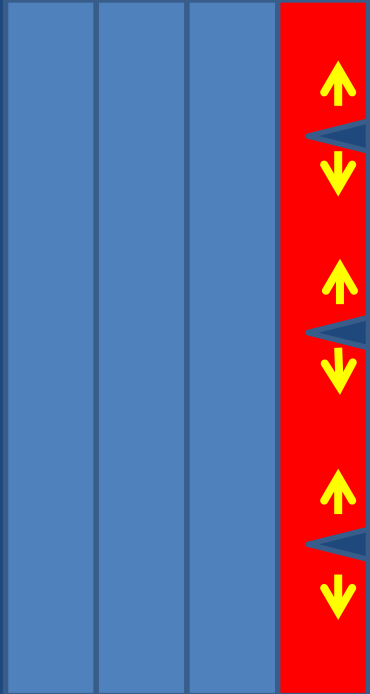
# TRACTIONS DUES AU FROID



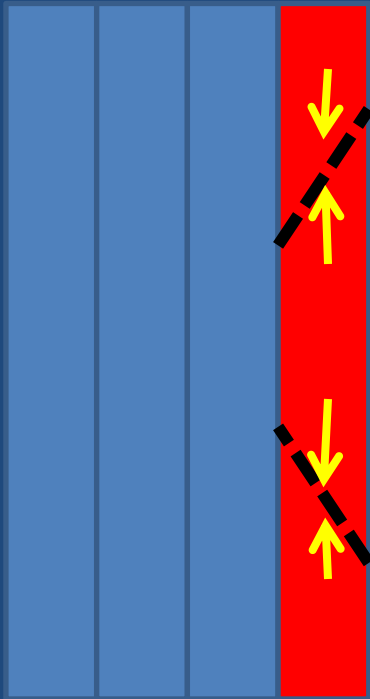
REFROIDISSEMENT  
(CONTRACTION)

REFROIDISSEMENT À LA  
PAROI

CFMR 6 décembre 2012



PUITS D'AÉRATION,  $\Delta T = -20^{\circ}\text{C}$  (Zapf et al., 2012)



GAZ CHAUDS  $+315^{\circ}\text{C}$  (Lee et al., 1980)

© IIR 6 décembre 2012

# DÉPRESSURISATION RAPIDE ET RÉPÉTÉE ENDOMMAGE-T-ELLE LA CAVERNE?

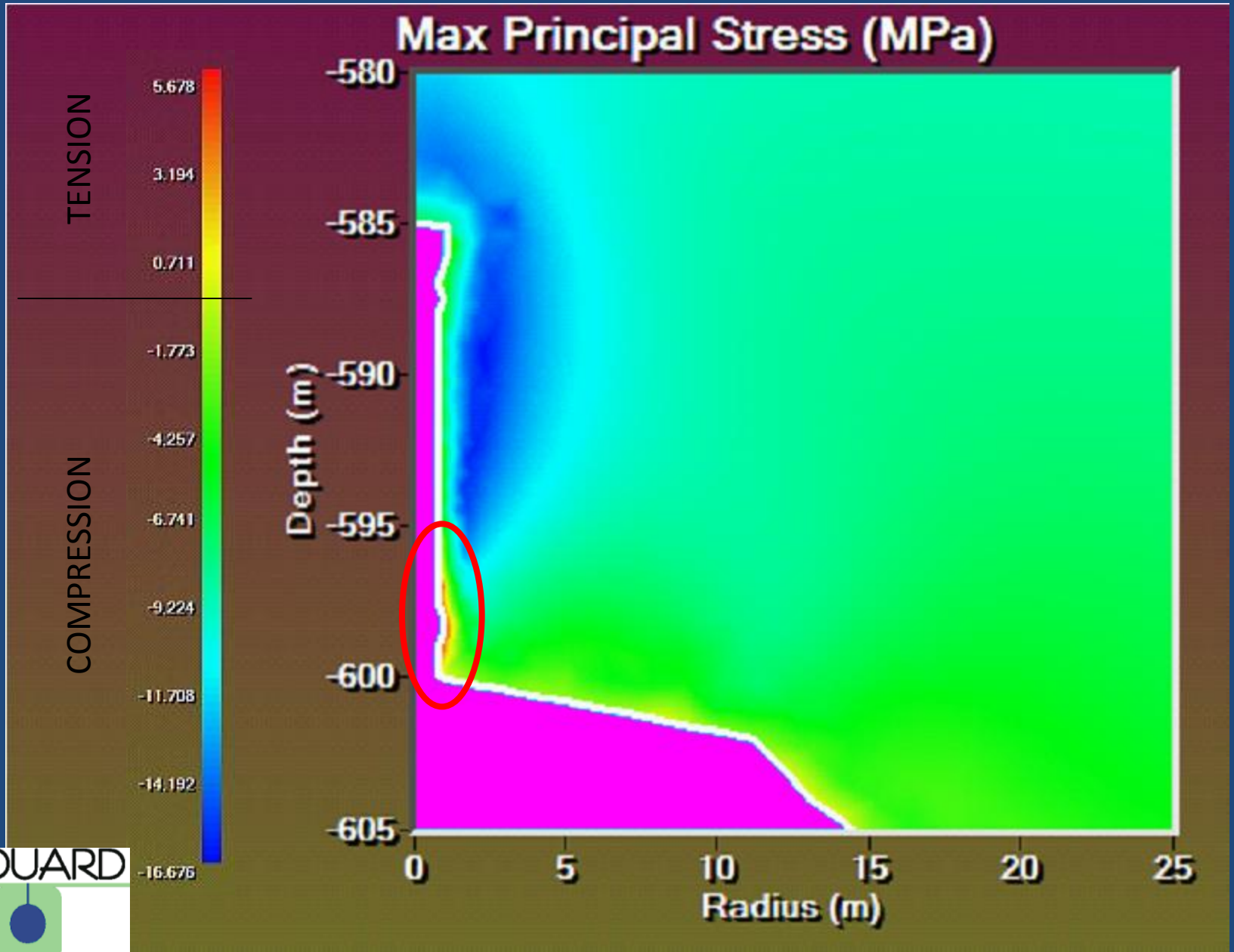
1. Enseignements tirés des cavernes réelles
2. Température du gaz dans une caverne
3. Le soutirage du gaz engendre son refroidissement
4. Avec des effets thermomécaniques
5. **Fracturation à la paroi**
6. Fatigue multicyclique
7. Conclusions

# Contraintes de traction au refroidissement

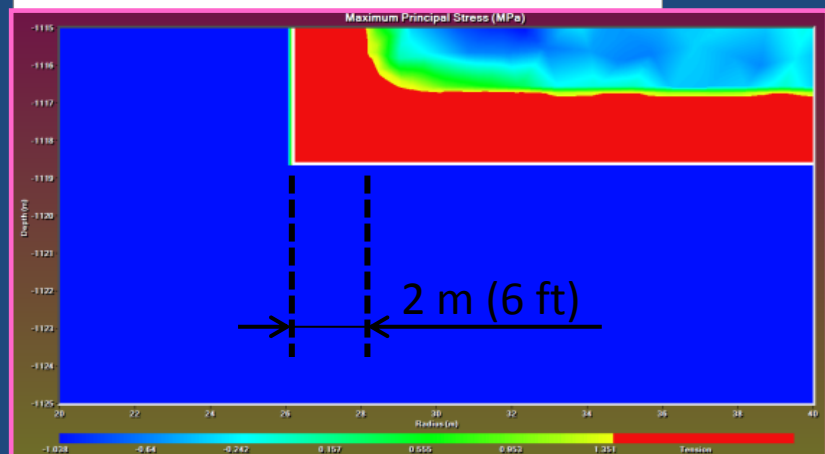
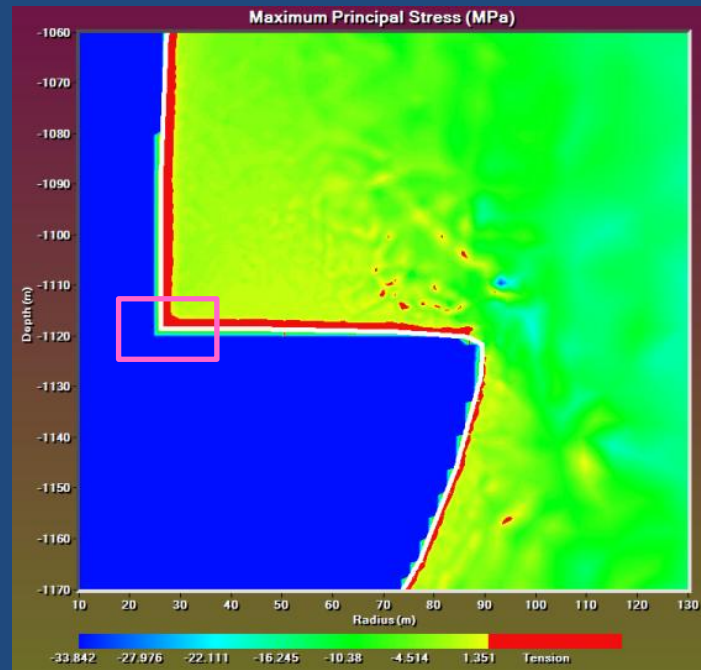
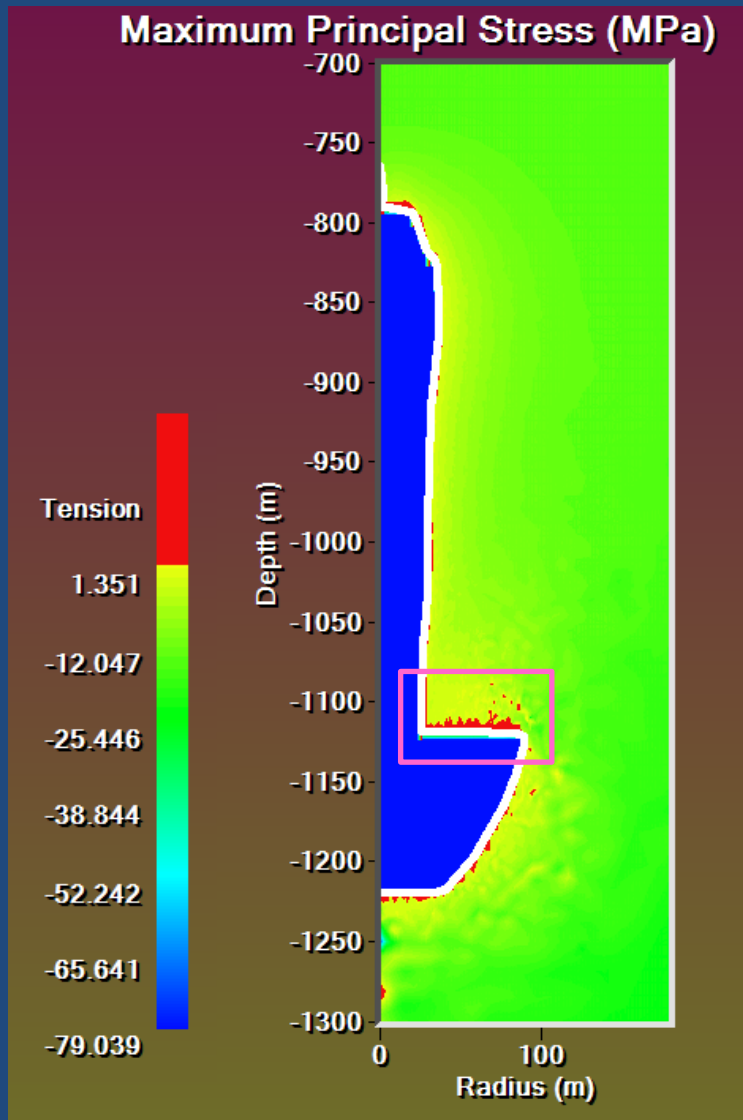
Un refroidissement du gaz de  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) engendre des tractions à la paroi de l'ordre de  $-\alpha E \Delta T$  (MPa)

Pour le sel  $\alpha E$  vaut de l'ordre de 1 MPa/ $^{\circ}\text{C}$  !

Cependant la pénétration des températures (et donc des contraintes de traction) est petite : les fractures ne sont pas très profondes ; elles sont perpendiculaires aux parois.

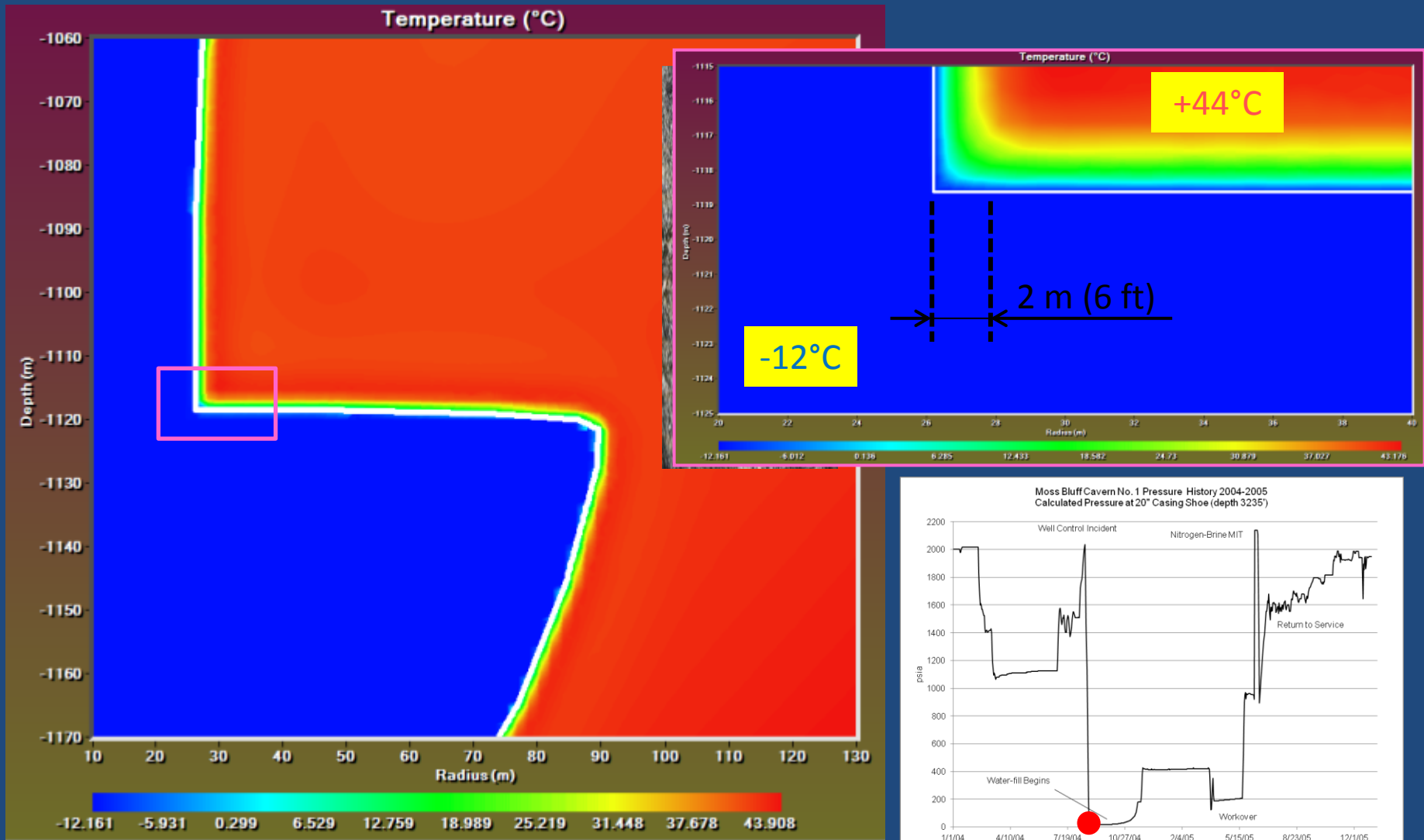


# Least Compressive Stress at the End of the Blowout (August 26, 2004)





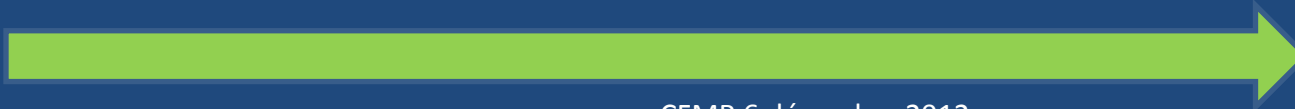
# Salt Temperature at the End of the Blowout (August 26, 2004)

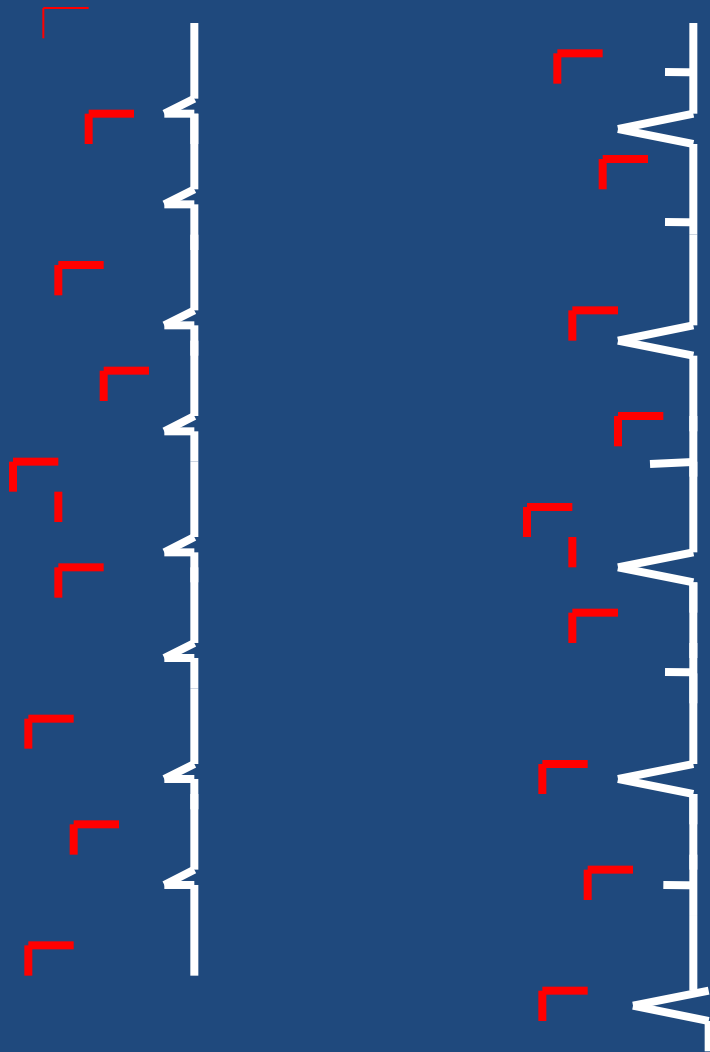




Au début du refroidissement  
un grand nombre de petites fractures  
apparaissent ; leur profondeur est  
à peu près celle de la zone en traction  
tangentielle

REFROIDISSEMENT



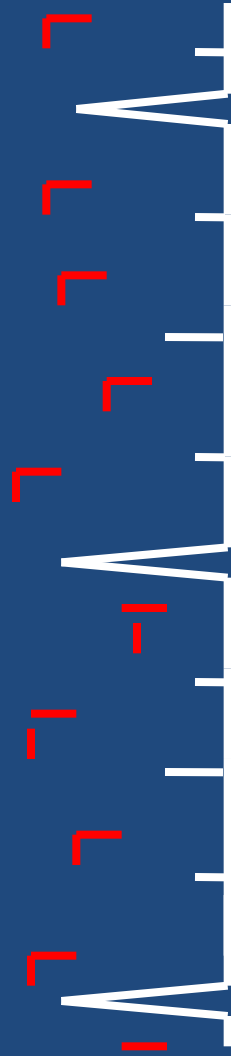


Le refroidissement pénètre plus profondément. La zone en traction s'approfondit, et avec elle la profondeur des fractures.

Mais une sélection s'opère, de sorte que le ratio profondeur sur espacement se conserve à peu près.

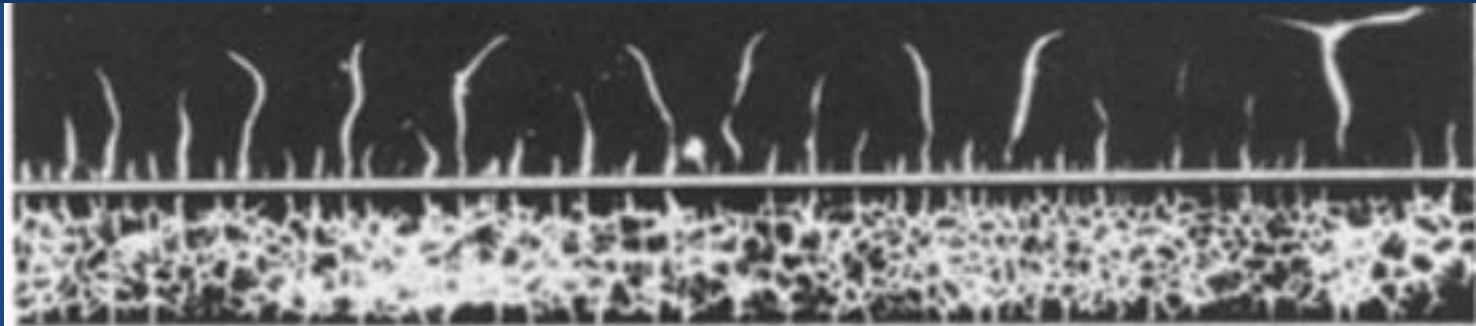
Certaines fractures s'arrêtent de progresser

REFROIDISSEMENT



Le processus se poursuit, avec arrêt de nouvelles fractures





Bahr, H. A., Fischer, G., Weiss, H. J., 1986.  
Thermal-shock crack patterns explained by  
single and multiple crack propagation.  
Journal of Materials Science  
21, 2716/2720, 10.1007/BF00551478.

Principe du calcul : pour une vitesse d'avancée donnée du front froid,

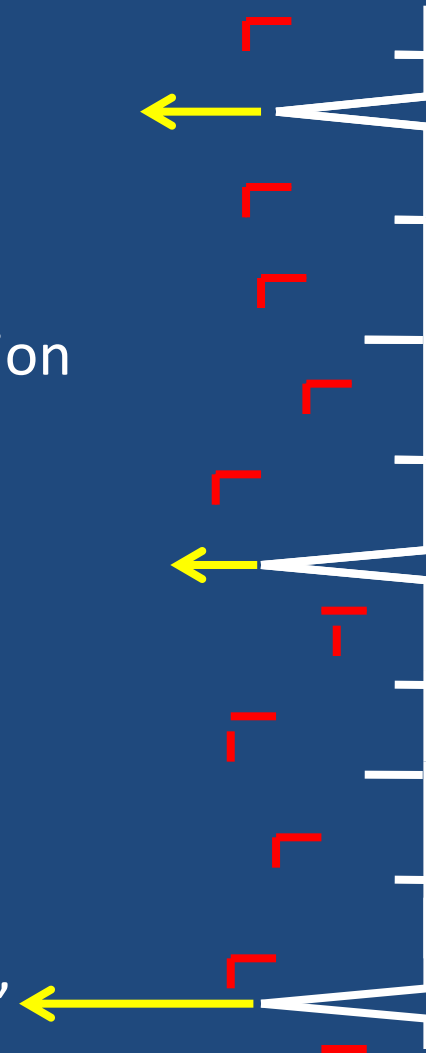
on teste des vitesses différentes de propagation de chaque fracture

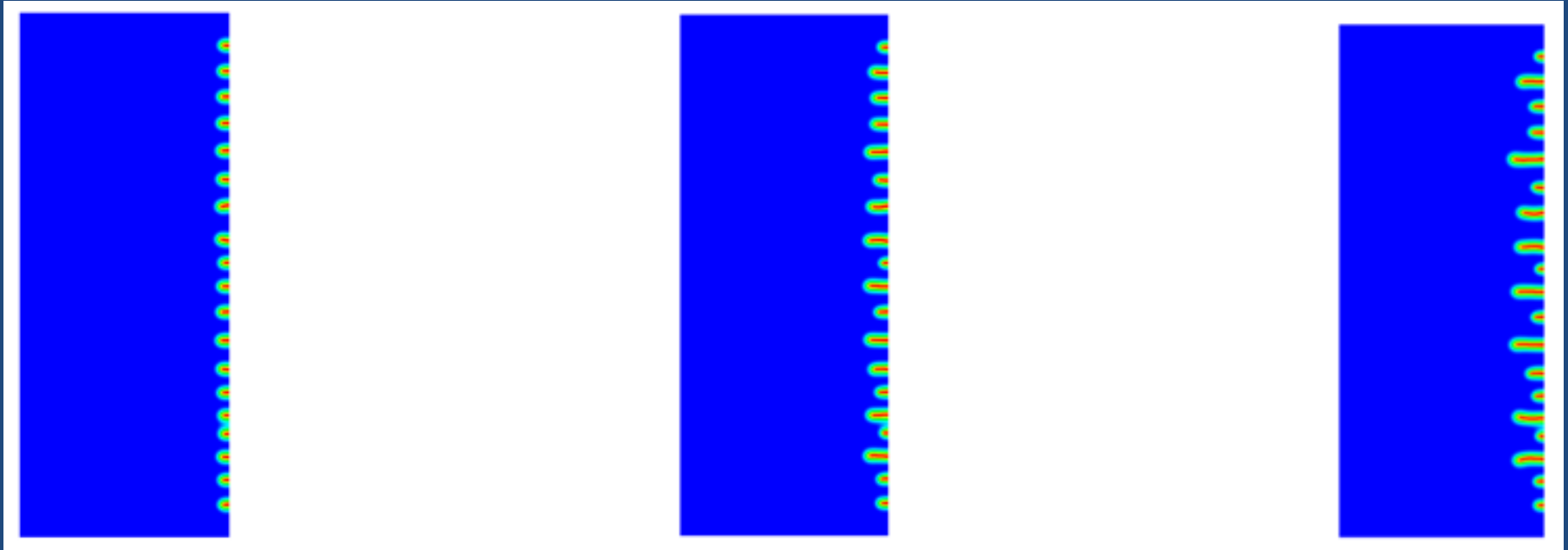
En calculant l'énergie dissipée dans la création d'une nouvelle surface de fracture,

Et l'énergie élastique relâchée du fait du changement de forme du domaine

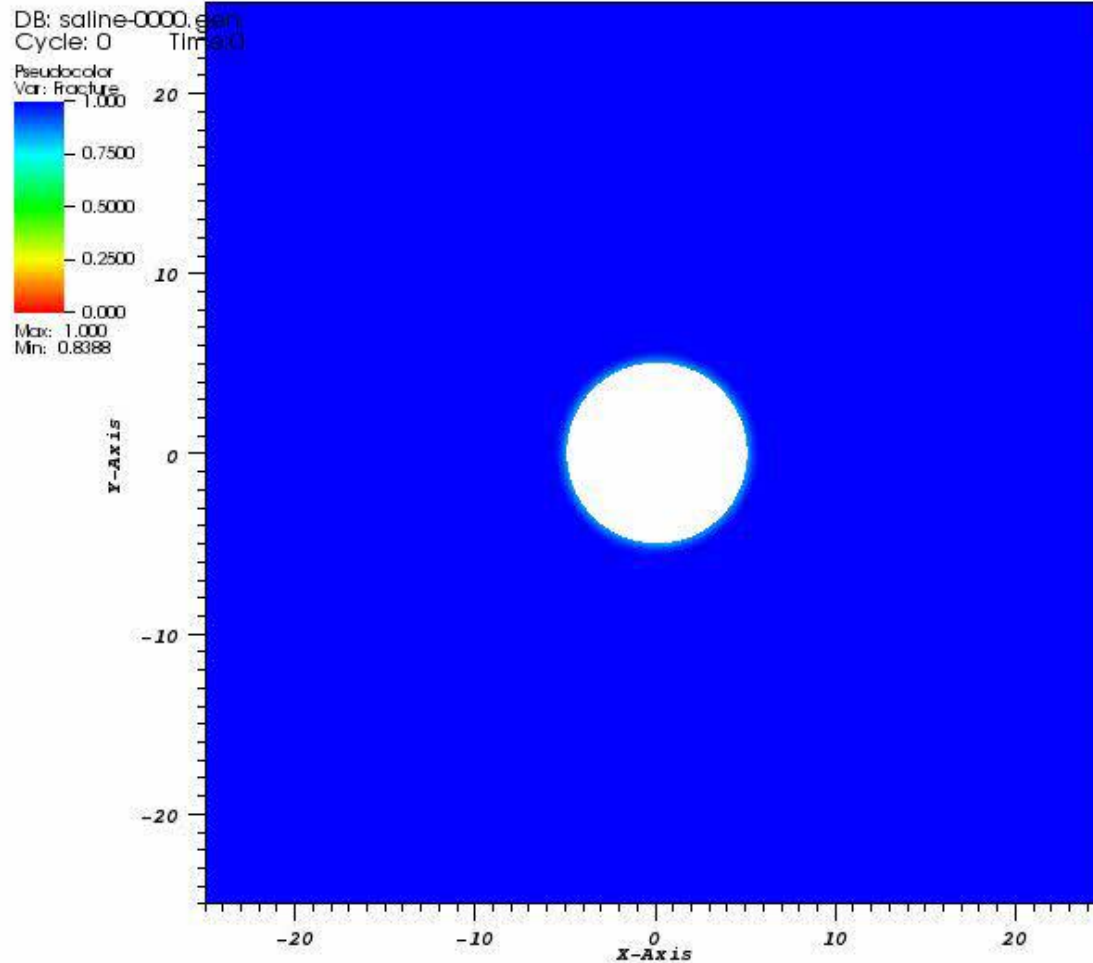
on cherche le minimum

(la solution est souvent symétrique d'abord, puis cesse de l'être)





**Développement de fractures à la paroi d'une caverne cylindrique**  
 On applique un écart de  $\Delta T = -5 \text{ °C}$  à la paroi, qui se propage progressivement dans la massif. Le nombre de fractures qui continuent à progresser diminue progressivement quand le front froid se propage.  
 (Calculs par P. SicSic and J.J. Marigo, Ecole Polytechnique).

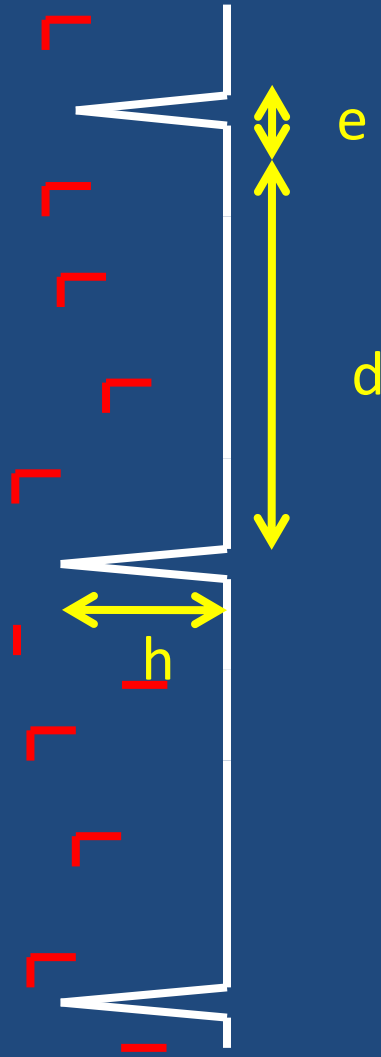


user: sicsic  
Thu Dec 15 14:56:11 2011

Calculs par  
P. SicSic et  
J.J. Marigo,  
LMS

Ecole  
Polytechnique



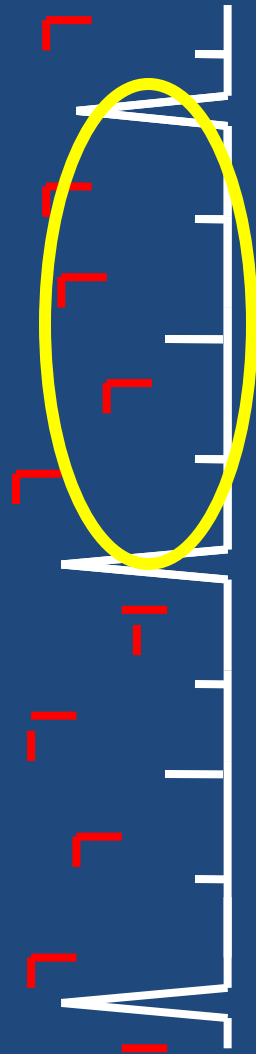


$$e/d \approx \alpha \Delta T$$

$$\sigma_{\text{pre}}(h) - E \alpha \Delta T(h) > 0$$

$$h/d \approx 1 \text{ à } 2$$

$$\alpha = 4.10^{-5}/^{\circ}\text{C}$$



IL EST  
VRAISEMBLABLE  
QUE  
L'ÉCAILLE  
RESTE  
SOLIDEMENT  
RELIÉE  
AU MASSIF

(Programme de  
Recherche  
Du SMRI)

# DÉPRESSURISATION RAPIDE ET RÉPÉTÉE ENDOMMAGE-T-ELLE LA CAVERNE?

1. Enseignements tirés des cavernes réelles
2. Température du gaz dans une caverne
3. Le soutirage du gaz engendre son refroidissement
4. Avec des effets thermomécaniques
5. Fracturation à la paroi
6. **Fatigue multicyclique**
7. Conclusions

$$\sqrt{3J_2}$$

## ZONE DILATANTE

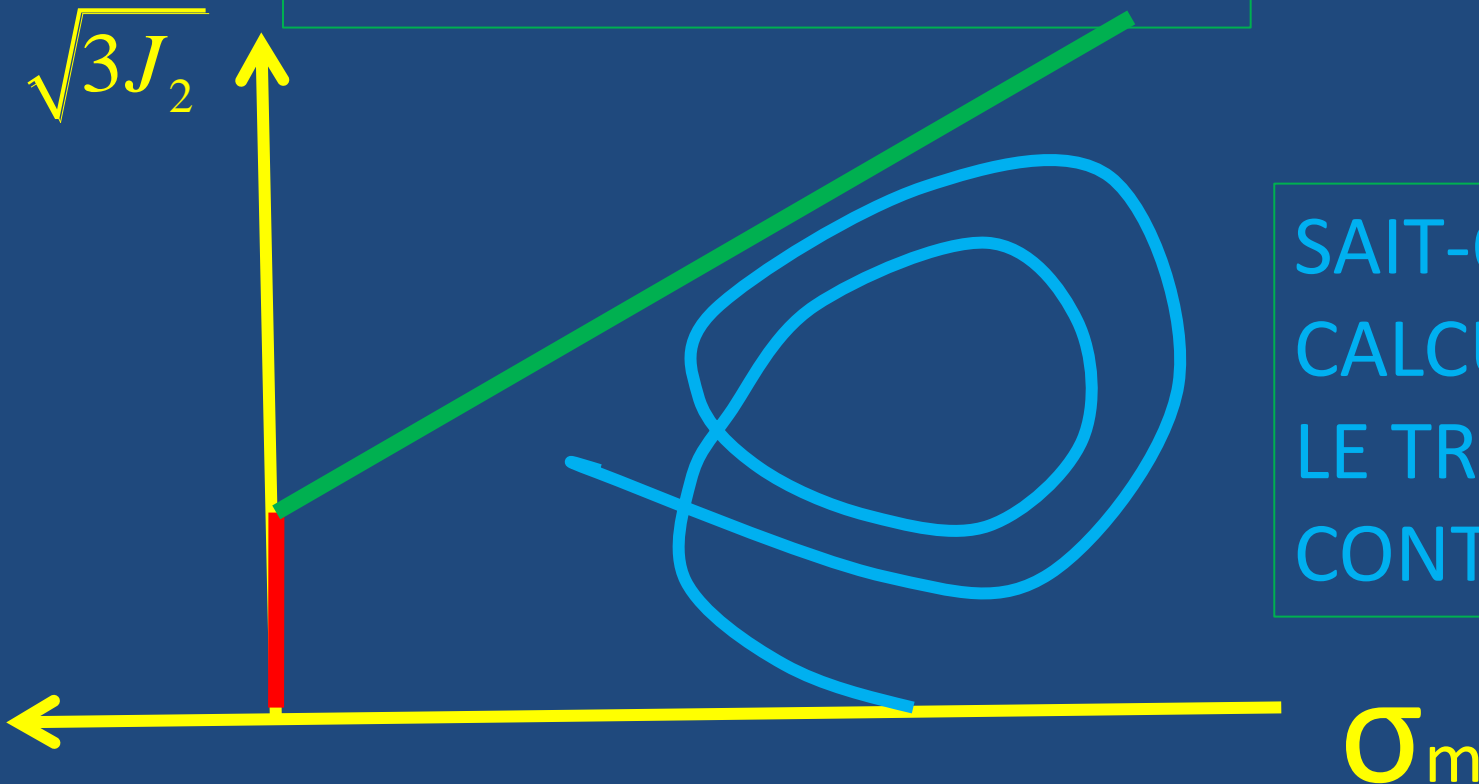
La perméabilité croît  
La résistance diminue  
La vitesse du son chute  
Emission acoustique

## ZONE CONTRACTANTE

Perméabilité intacte  
Cicatrisation  
Résistance intacte

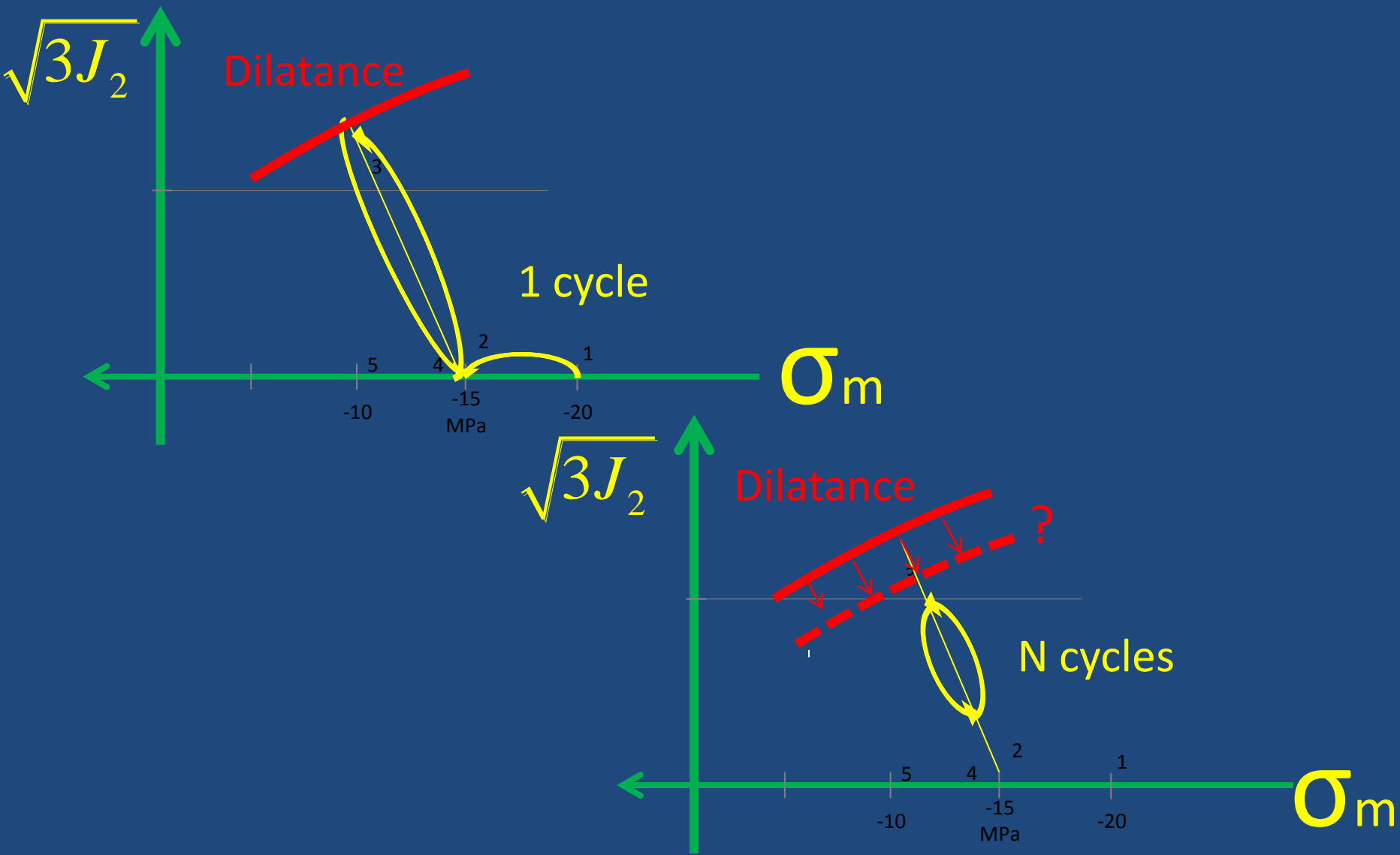
$$\sigma_m$$

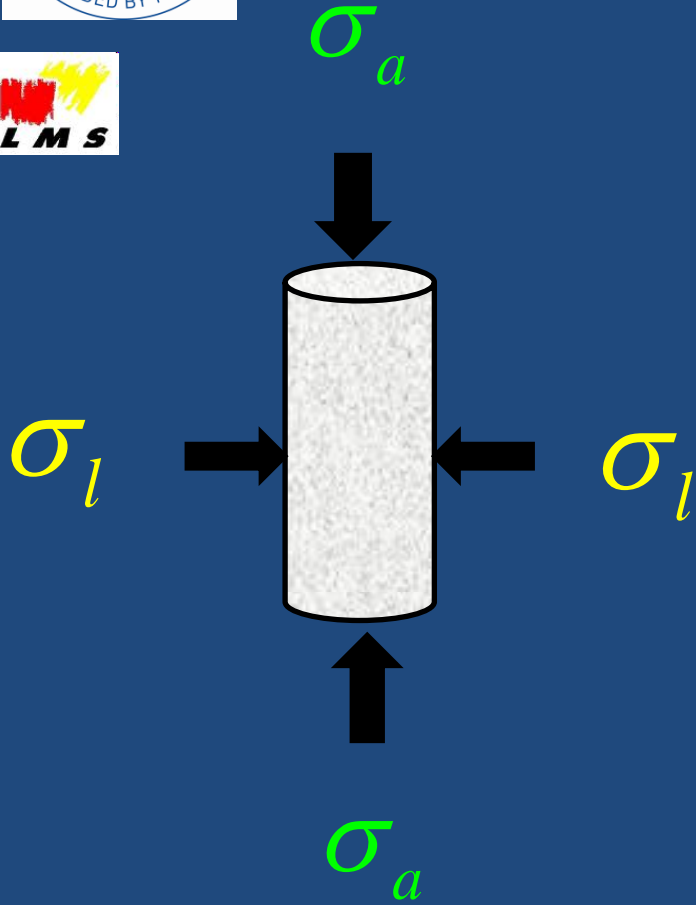

LES CYCLES NOMBREUX  
MODIFIENT-ILS  
LE CRITÈRE ?



SAIT-ON  
CALCULER  
LE TRAJET DES  
CONTRAINTES ?

# AJUSTEMENT DU CRITÈRE DILATANT AU CAS D'UN GRAND NOMBRES DE CYCLES



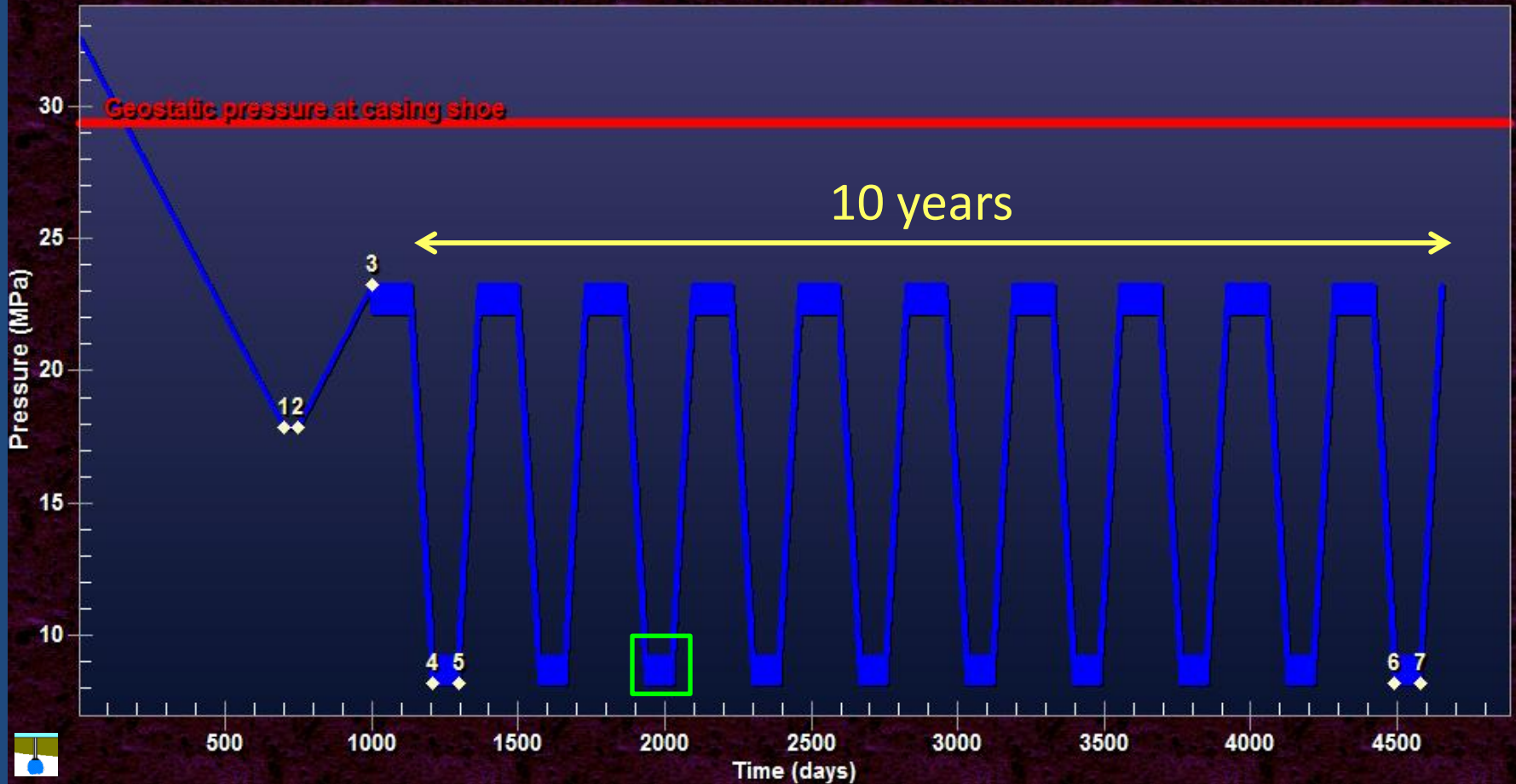




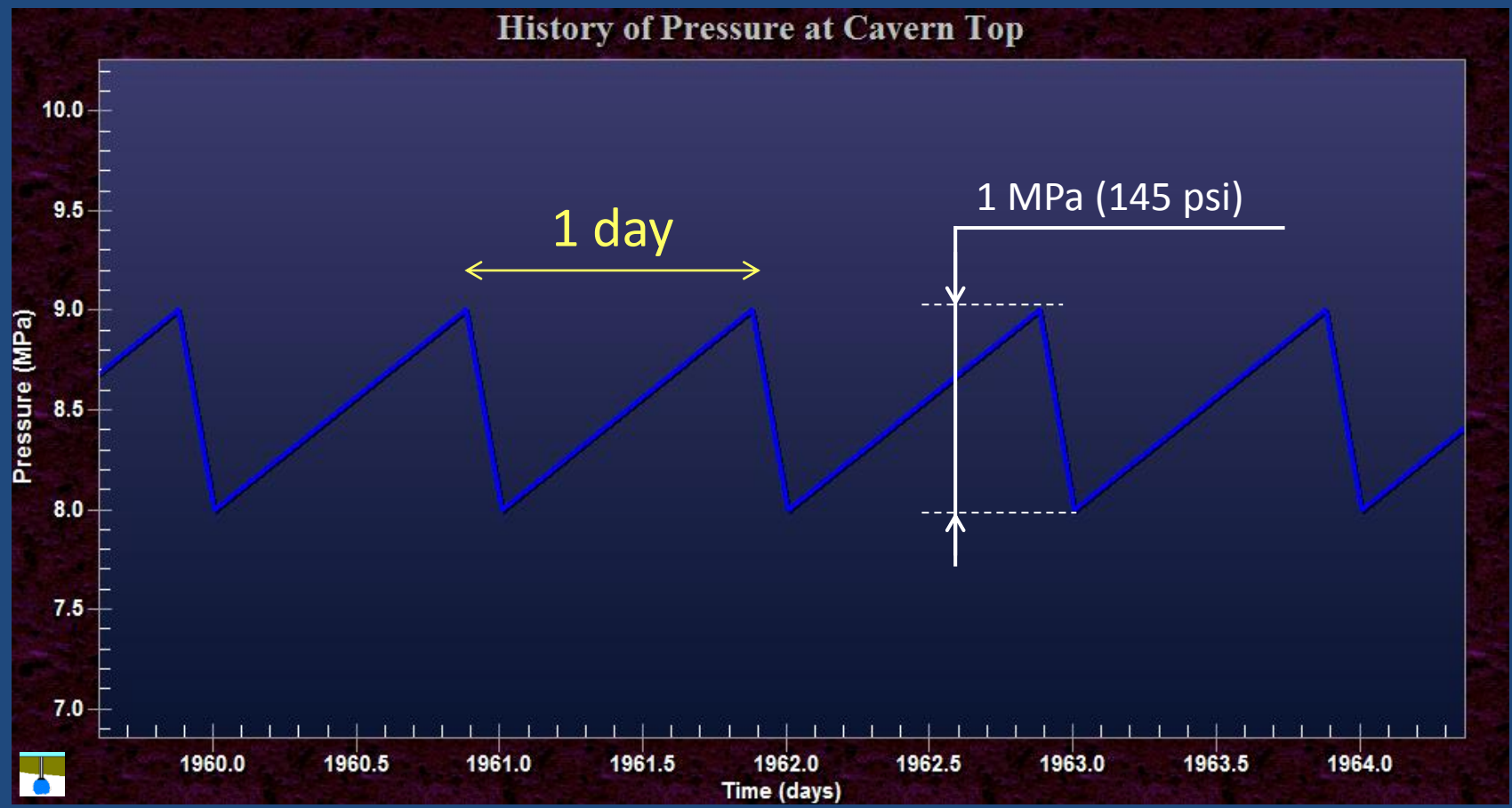
# **AJUSTEMENT DU CRITÈRE DILATANT AU CAS D'UN GRAND NOMBRES DE CYCLES**

## **CALCUL DES CONTRAINTES POUR UN GRAND NOMBRE DE CYCLES**

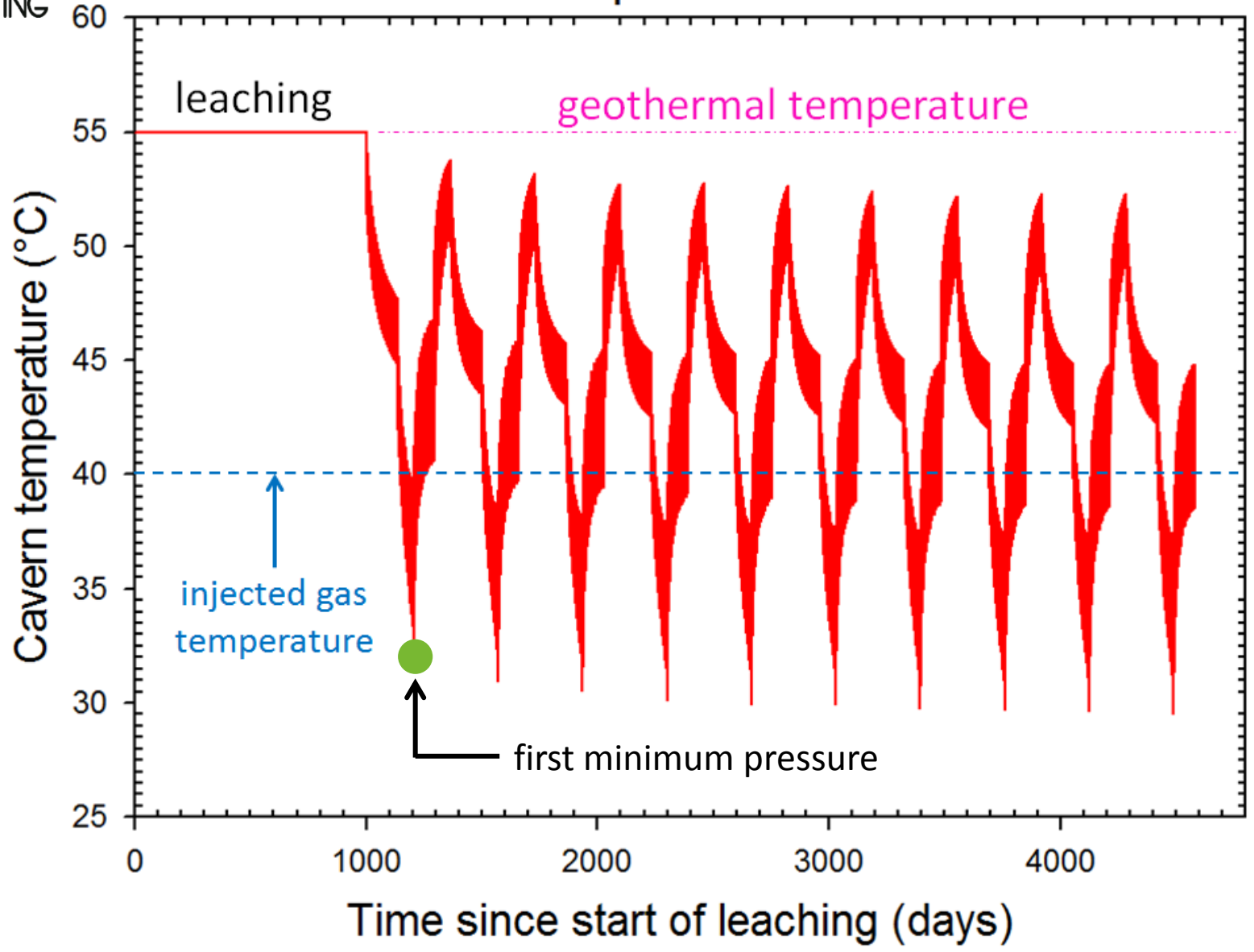
### History of Pressure at Cavern Top



# Cavern loading: seasonal cycling + micro-cycling

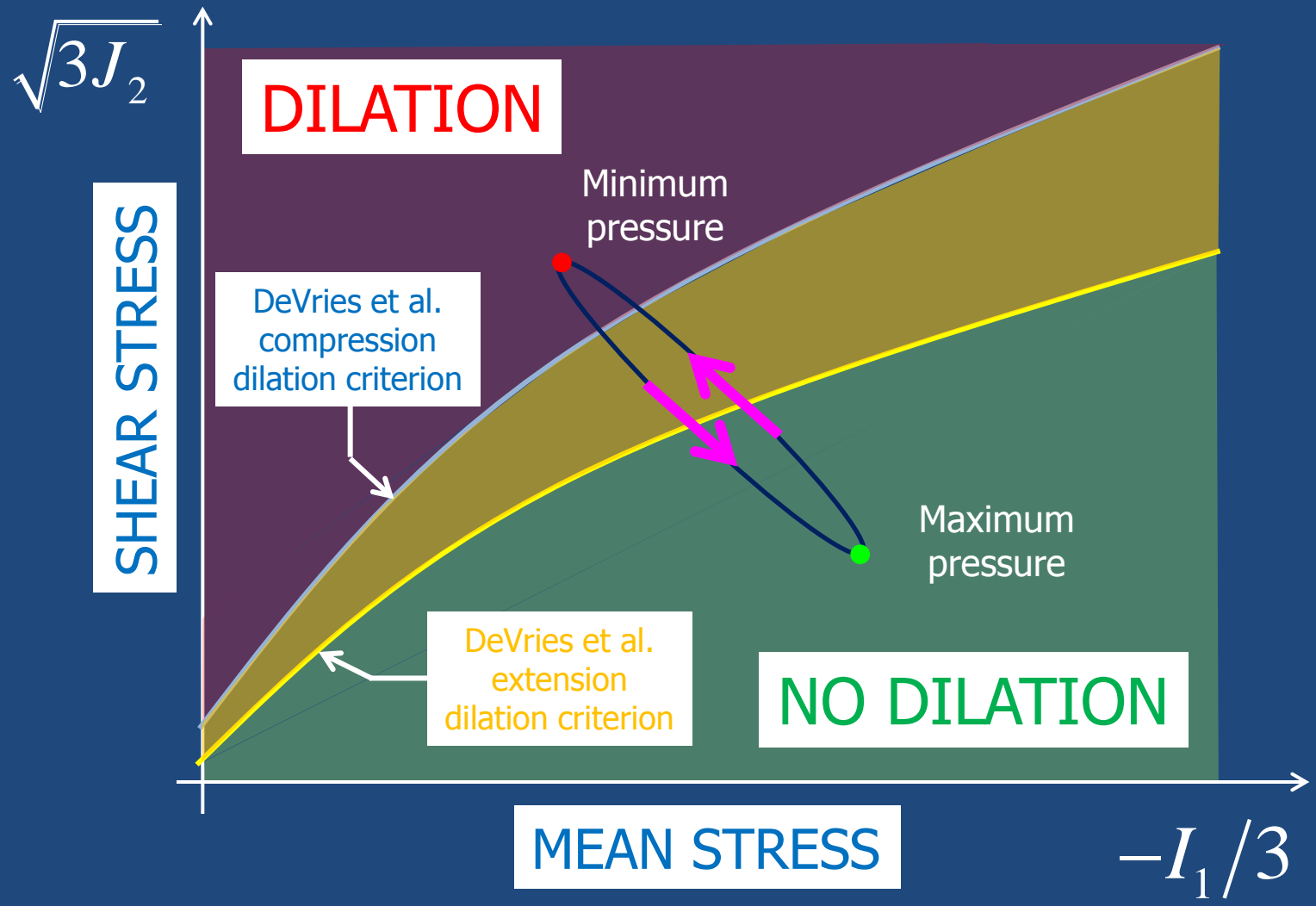


# Cavern Temperature Evolution

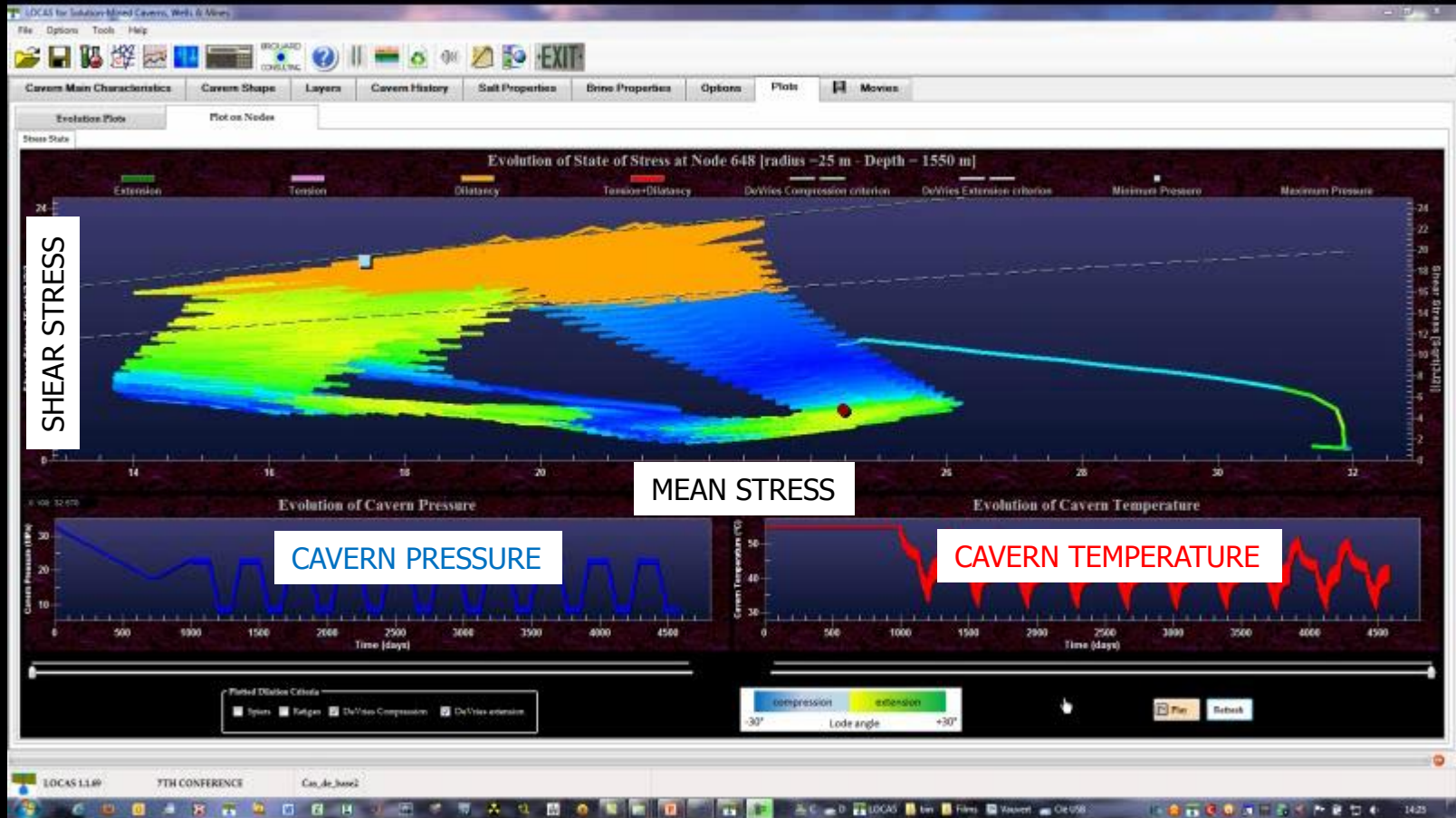
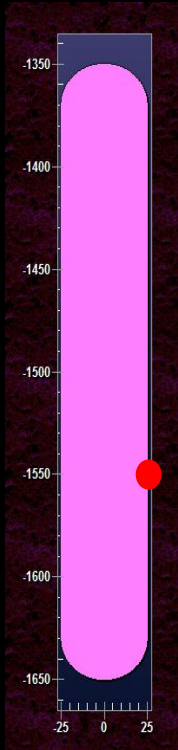


# DILATION CRITERION

DeVries (2005)



# FLIGHT OF THE BUMBLEBEE

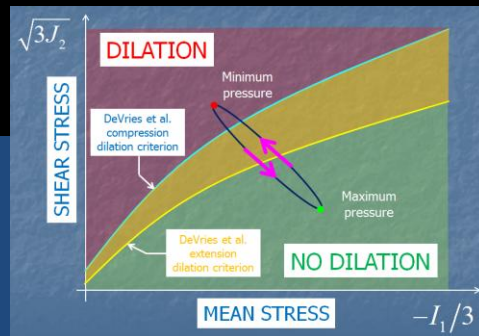


SHEAR STRESS

MEAN STRESS

CAVERN PRESSURE

CAVERN TEMPERATURE



Nikolai Rimsky-Korsakov, The Tale of Tsar Saltan, 1899-1900





« SACRE »



# CONCLUSIONS

Dans les cavités de stockage de gaz naturel (profondes) ou d'air comprimé (cycles fréquents) :

- L'évolution thermique peut être bien calculée
- La formation de fractures thermiques est bien comprise ; son calcul est l'enjeu de recherches des essais en mine sont prévus
- L'évolution du critère de dilatance avec le nombre de cycles fait l'objet d'études au laboratoire
- Le calcul numérique de l'effet d'un grand nombre de cycles est bien maîtrisé
- Les problèmes thermomécaniques ne sont pas « dimensionnants » à profondeur modérée