



*Gorges du Loup, avril 2005*

*Avancées en mécanique des roches  
expérimentales :*

**Étude expérimentale  
de la propagation  
des fissures  
sous l'action du gel  
dans les massifs calcaires**

# Enjeux du gel dans les roches

- ◆ Sensibilité au gel des pierres de construction

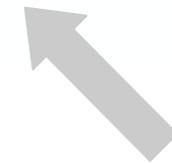


*Calcaire en carrière*



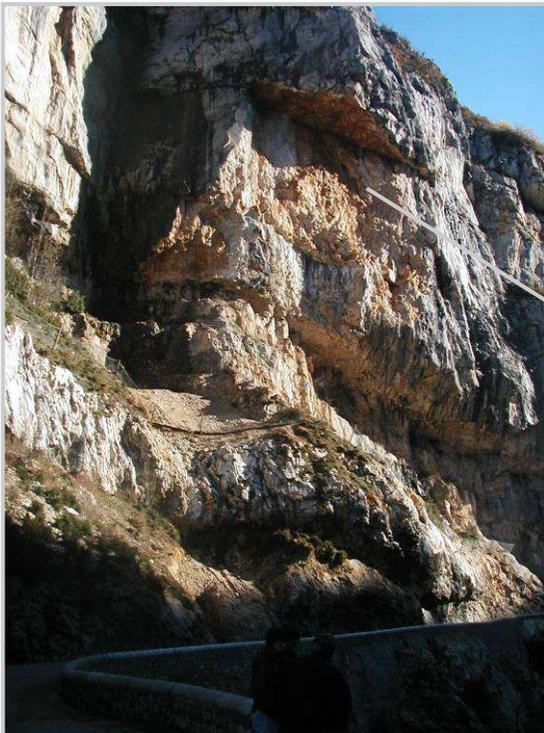
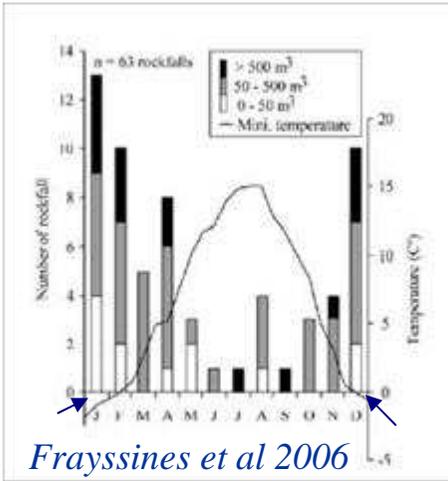
- ◆ Aléa « chutes de pierres et de blocs rocheux » en région montagneuse

*Route d'accès au Mont Blanc,  
mars 2007*



Choix de l'étude : *effet du gel dans un massif fissuré*

# Problématique

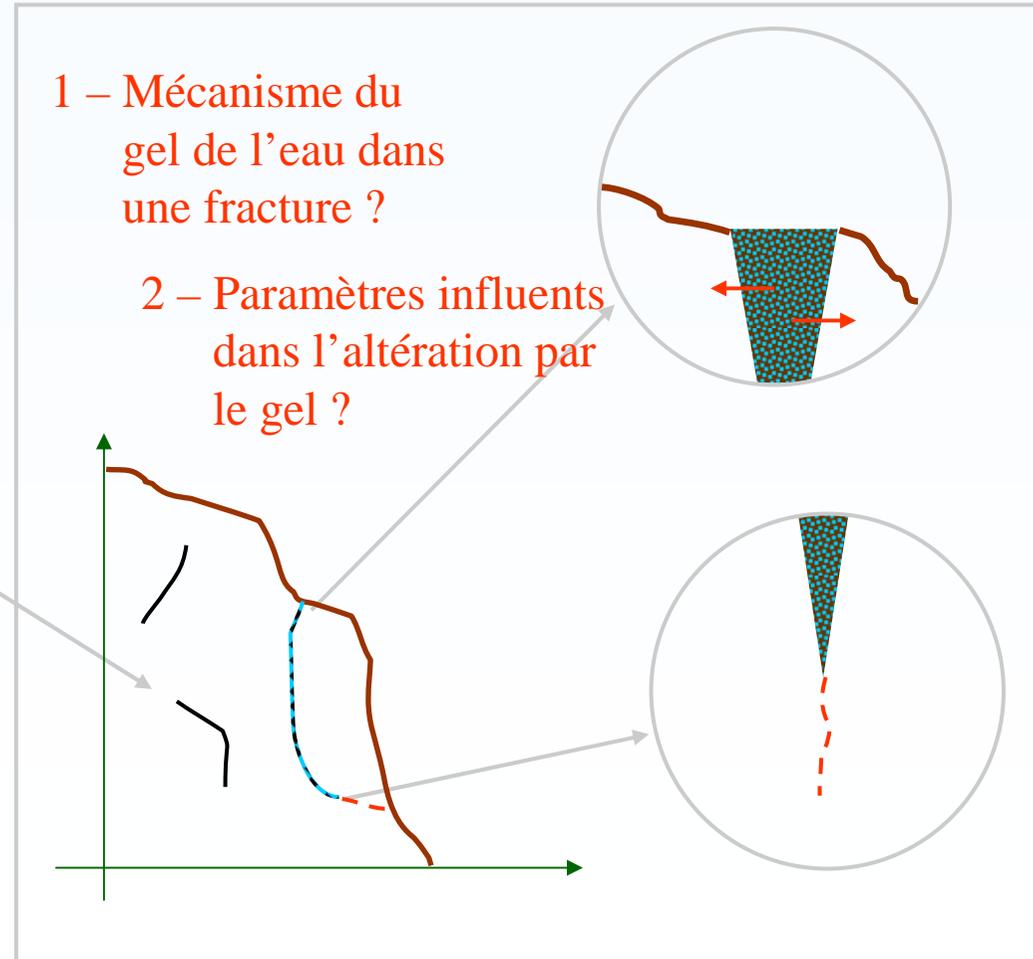


*Les Grands Goulets,*

*février 2003*

1 – Mécanisme du gel de l'eau dans une fracture ?

2 – Paramètres influents dans l'altération par le gel ?



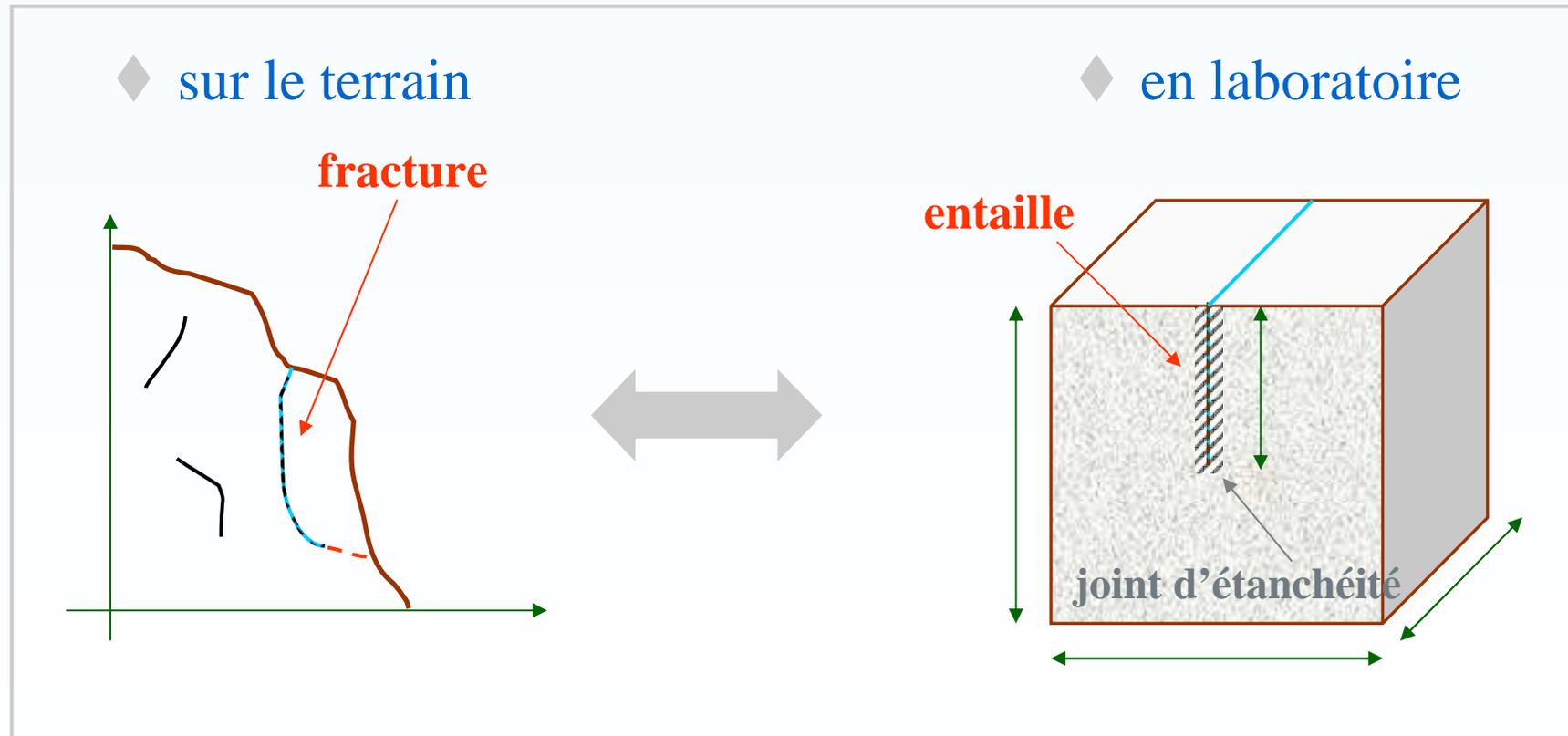
# Modèle théorique ?

- ◆ Modèle du système fermé = action seule de la dilatation volumique lors du changement de phase de l'eau

caractéristiques	GLACE (Lliboutry 1964)	CALCAIRE (Larrys)	Méthode	Pression générée MPa
			Lliboutry 1964 <i>Dégagement de l'air dissous dans l'eau</i>	979
Module d'Young (MPa)	9000	64900	Bertouille 1975: <i>Loi de Hooke</i>	838
Coefficient de Poisson	0.36	0.34	Pouya 1991 <i>Convergence d'une sphère creuse</i>	729

- ⇒ Valeurs trop élevées (changement d'état de la glace...)
- ⇒ Difficulté pour établir un modèle théorique en système ouvert car transferts thermique et de liquide dépendants
  - ⇒ Développement d'un modèle empirique

# Reproduction du phénomène en laboratoire

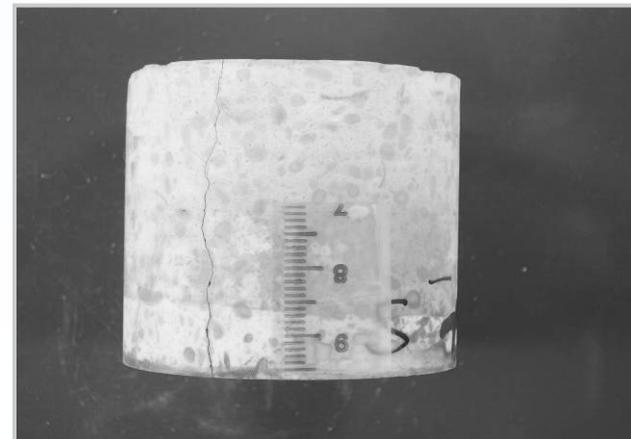
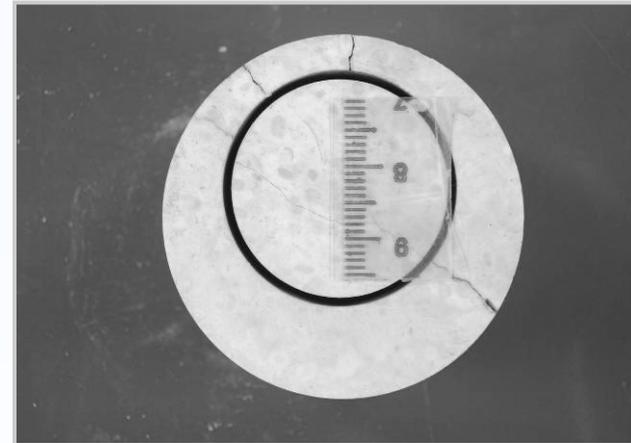


# « Études de faisabilité »

# Un nouvel essai de résistance au gel



Échantillons de calcaire surcarottés testés



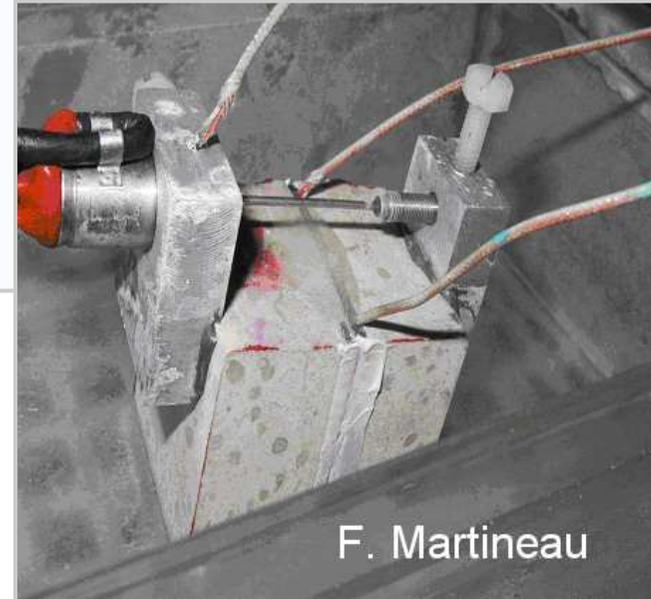
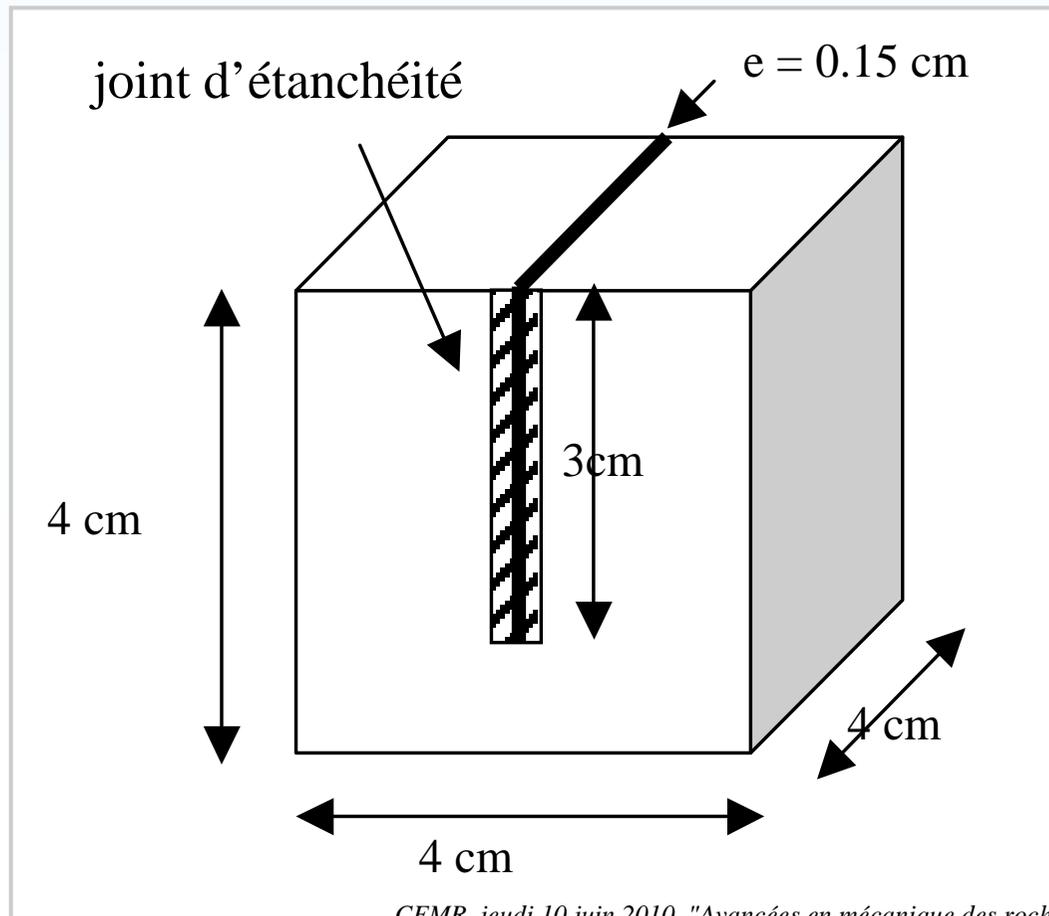
Un échantillon fissuré

# Comparaisons entre la norme EN 12371 et l'essai de résistance au gel proposé

Calcaire	Initiation de la fissuration	Rupture complète	EN12371
	<i>Nombre de cycles</i>	<i>Nombre de cycles</i>	
Courville	70	>80	Gélif
Farges	75	>80	Peu gélif
Pierre de Lens	23	>64	Non gélif
Roquemaillère	/	50	Non gélif
Urgonien	1	8	Non gélif
Vilhonneur-bed 2	4	/	Non gélif
Vilhonneur-bed 7	4	/	Gélif
Vilhonneur-bed12	1	/	Non gélif
Larrys-Bief	8	>64	Gélif
Larrys-Moulin d'Arlot	1	12	Gélif
Tournaisis-Vaulx&Chercq	/	2	Peu gélif
Tournaisis-Pont-à-Rieu	1	>26	Non gélif
Tournaisis-Allain	1	>26	Gélif
Mareuil	8	20	Peu gélif
Chamesson	18	>19	Peu gélif

# Première procédure d'essai...

Échantillon de calcaire

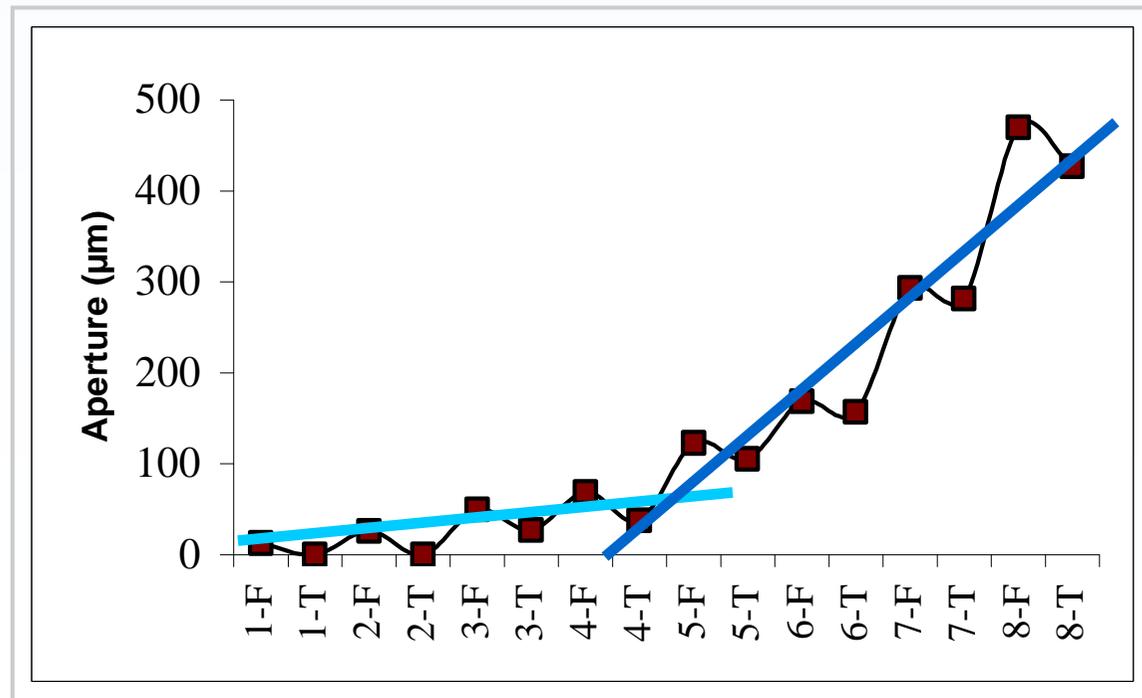


# Une propagation de la fissure en deux temps...



Propagation d'une fissuration dans le prolongement de l'entaille

Ouverture de l'entaille en fonction du cycle (F=gel; T=dégel)

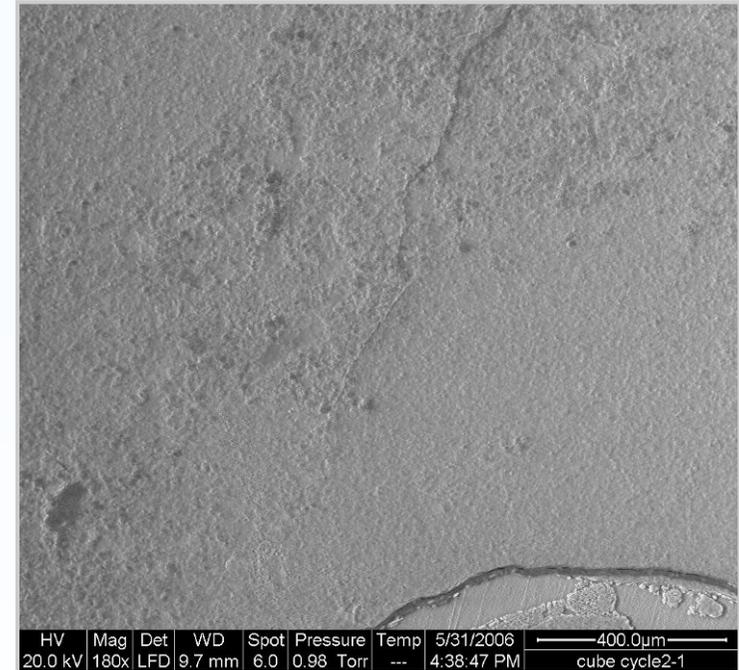
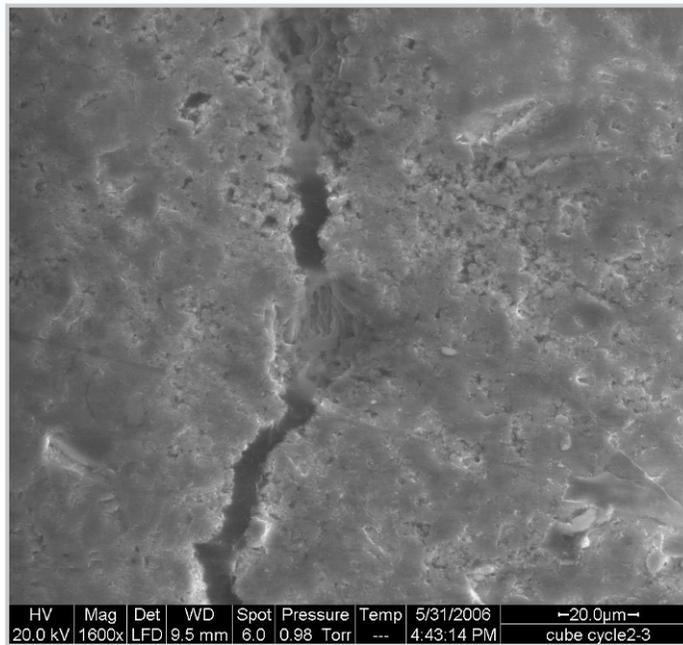


# Observations microscopiques

Un chemin de rupture préférentiel se dessine dès le premier cycle dans le prolongement de l'entaille existante

1cm

Point de contact



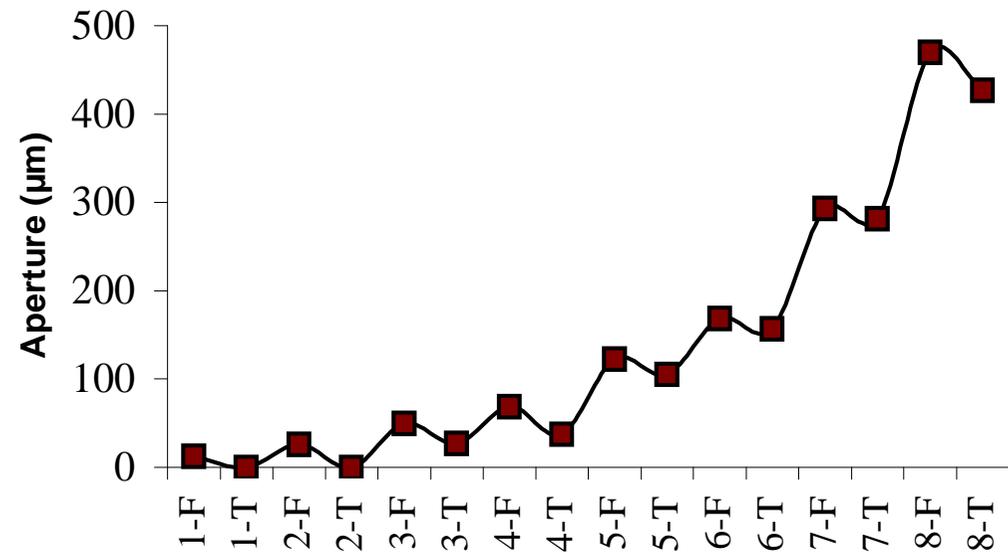
Contournement d'une oolithe...

# « Points de contact » et rupture

Nombre de cycle de gel-dégel	Quantité de points de contact %
1	65
2	63
3	32
4	/*
5	/*
6	20
7	31

Les échantillons 4 et 5 se sont rompus avant observation.

L'ouverture est une fonction décroissante de la quantité de points de contact.



# Un modèle mécanique à caractériser à l'échelle microscopique

- ◆ Propriétés mécaniques du calcaire évaluées à l'échelle macroscopique inappropriées pour étudier ce processus d'altération
- ◆ Un modèle de la propagation de la fissuration :

$$k_n = f(\text{quantité de points de contact})$$

avec  $k_n$ : raideur normale du joint

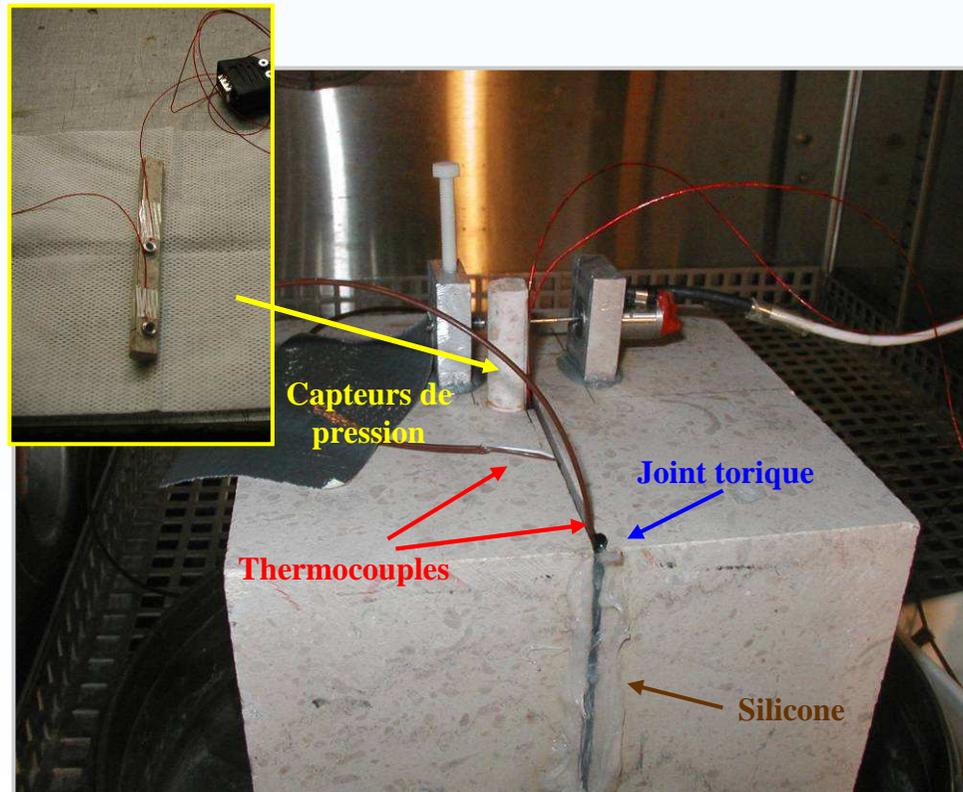


Goodman et al. (1968):

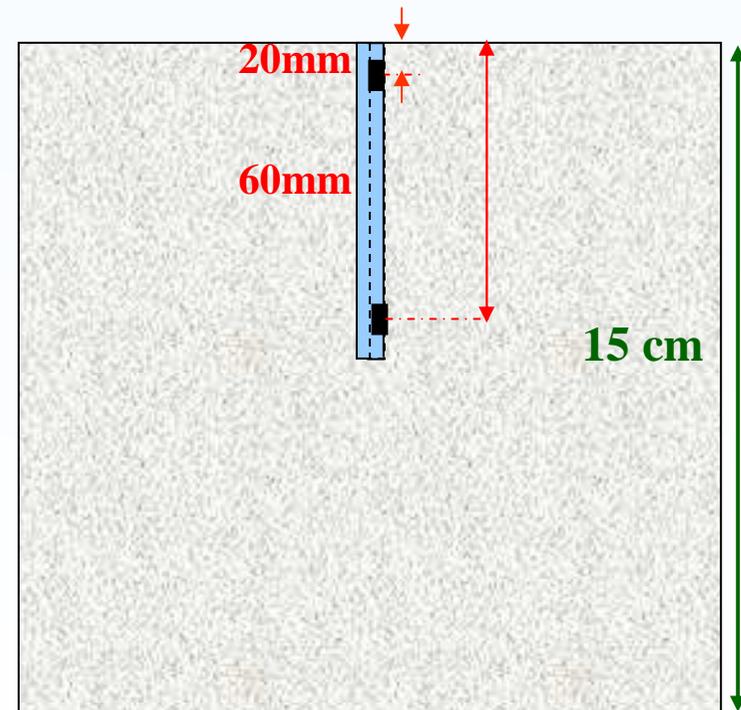
$$\sigma_n = k_n u_n$$

# **Dispositif et protocole expérimentaux**

# Instrumentation



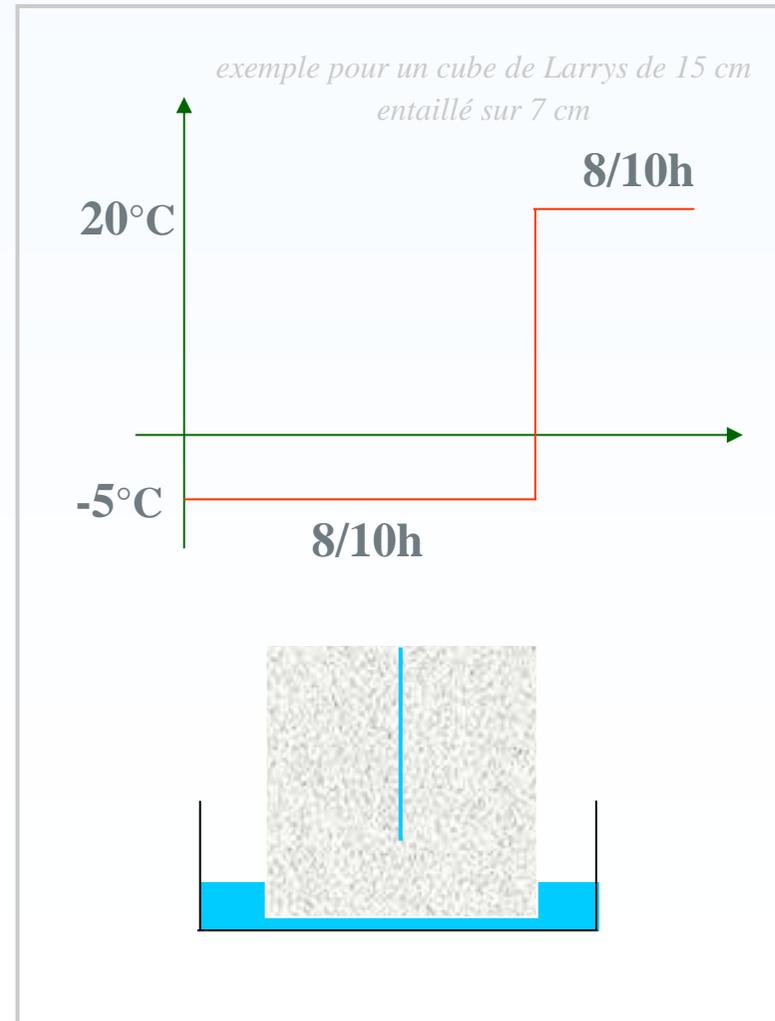
Installation  
expérimentale



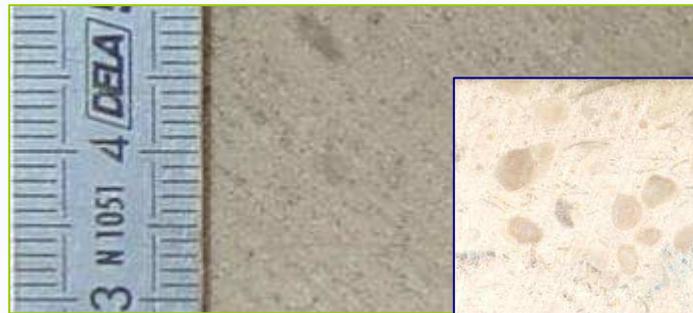
Position des capteurs de  
pression dans l'entaille

# Reproduction d'un cycle de gel-dégel

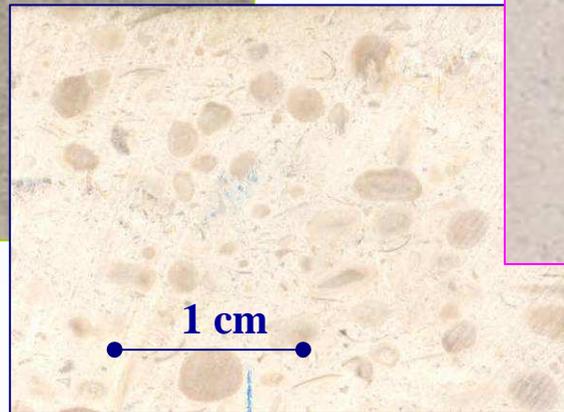
- ◆ Contraintes:
  - fidélité par rapport aux conditions naturelles
  - problème de la durée de l'expérimentation
- ◆ Variations de température choisies:
  - Gel à  $-5^{\circ}\text{C}$
  - Dégel à  $20^{\circ}\text{C}$
- ◆ Gestion de l'humidité :
  - Éprouvette saturée à l'eau sous vide
  - Éprouvette placée dans un fond d'eau
- ◆ Durée des phases choisie et adaptée afin d'atteindre l'équilibre thermique de l'éprouvette



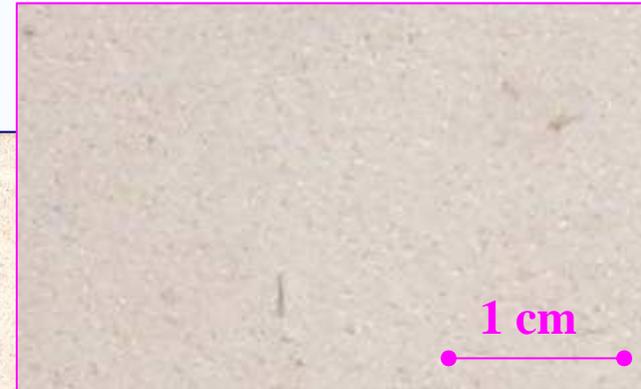
# Choix des calcaires d'étude :



*Chamesson*

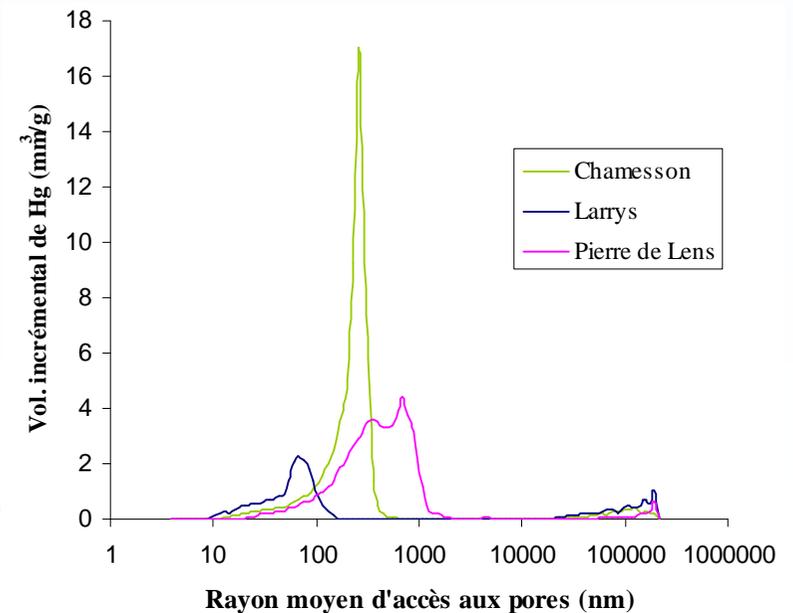


*Larrys*



*Pierre de Lens*

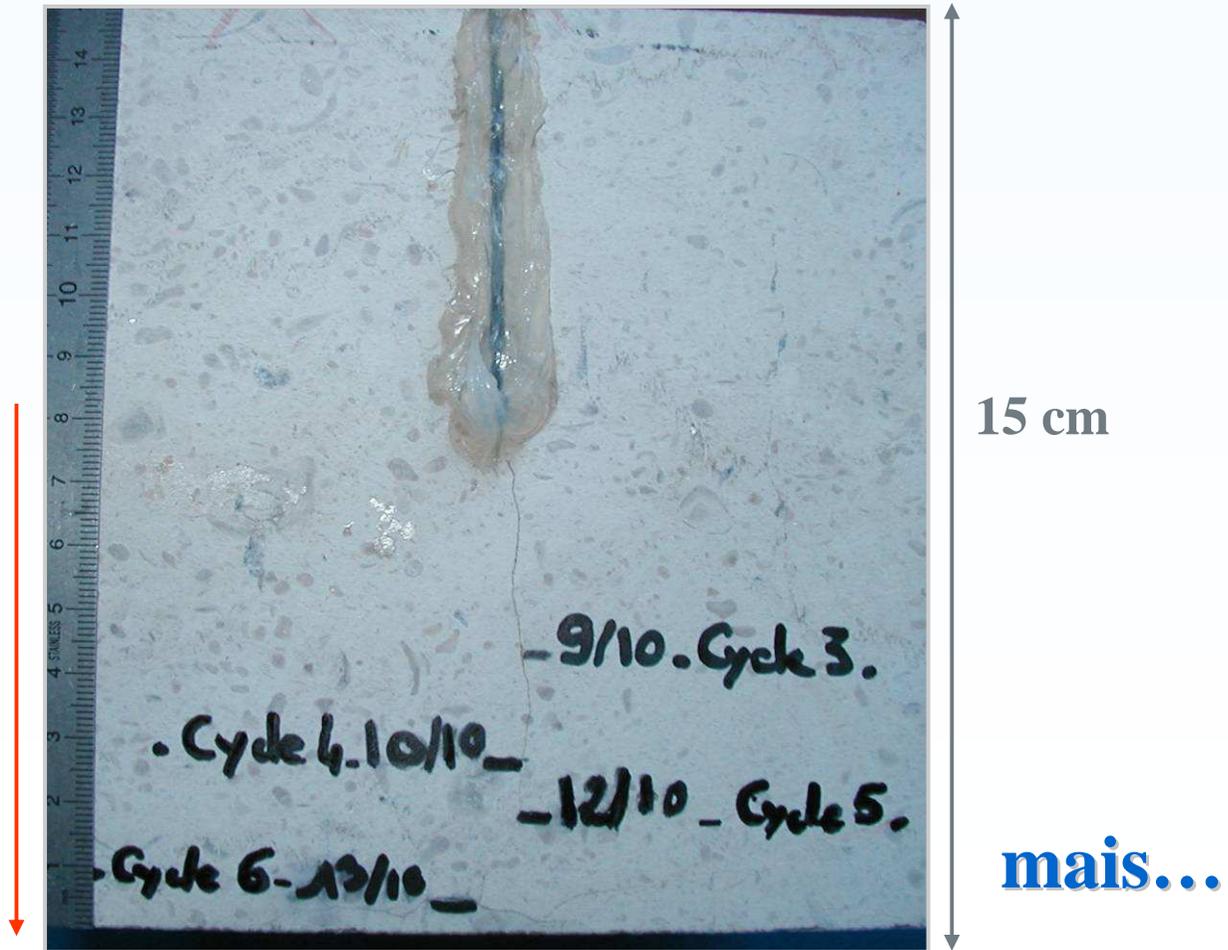
Calcaire	Porosité sous vide	Rayon moyen d'accès aux pores	Perméabilité
	%	nm	$10^{-15} m^2$
<b>Chamesson (Côtes-d'Or)</b>	<b>17,5</b>	284	0,88
<b>Larrys (Yonne)</b>	<b>4,3</b>	75	0,015
<b>Pierre de Lens (Gard)</b>	14	<b>600</b>	3,15



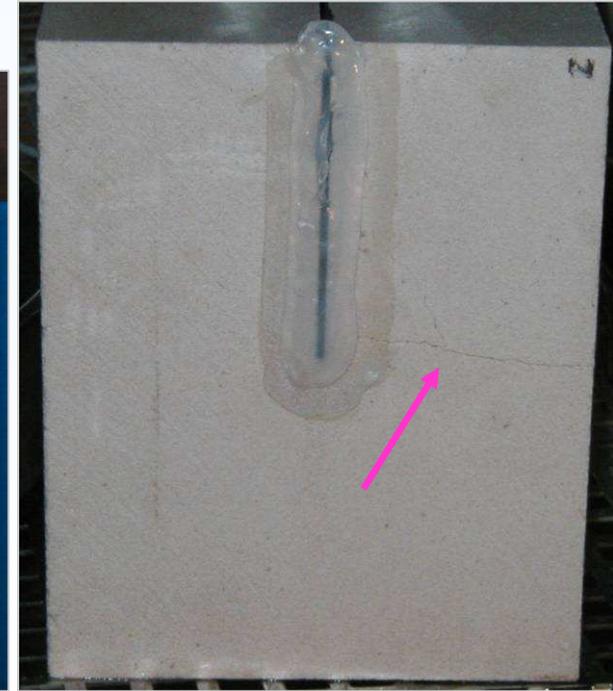
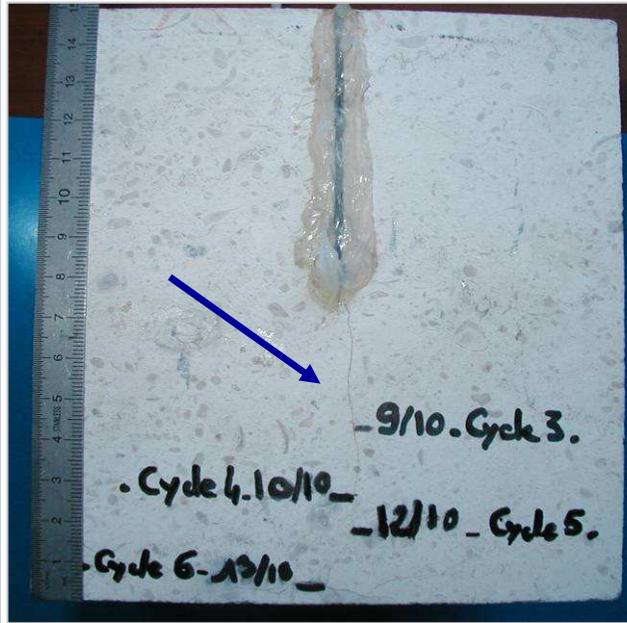
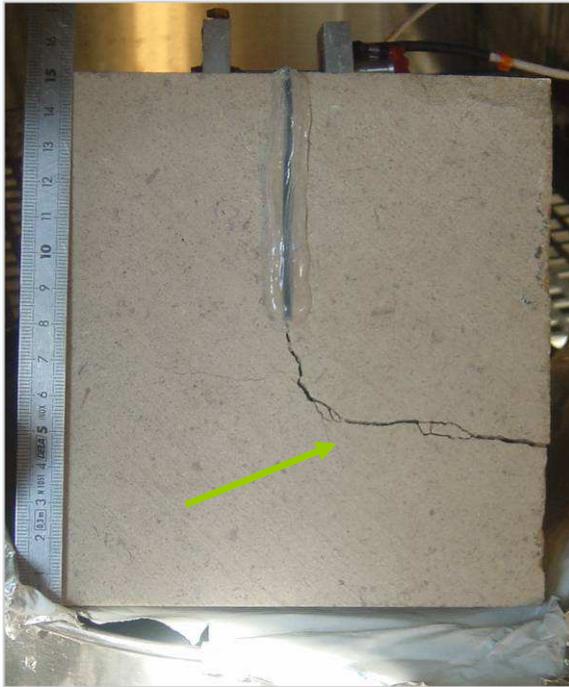
# Résultats

# Observation effective d'une fissuration progressive au cours des cycles successifs mais...

Propagation de la fissuration au cours des cycles successifs

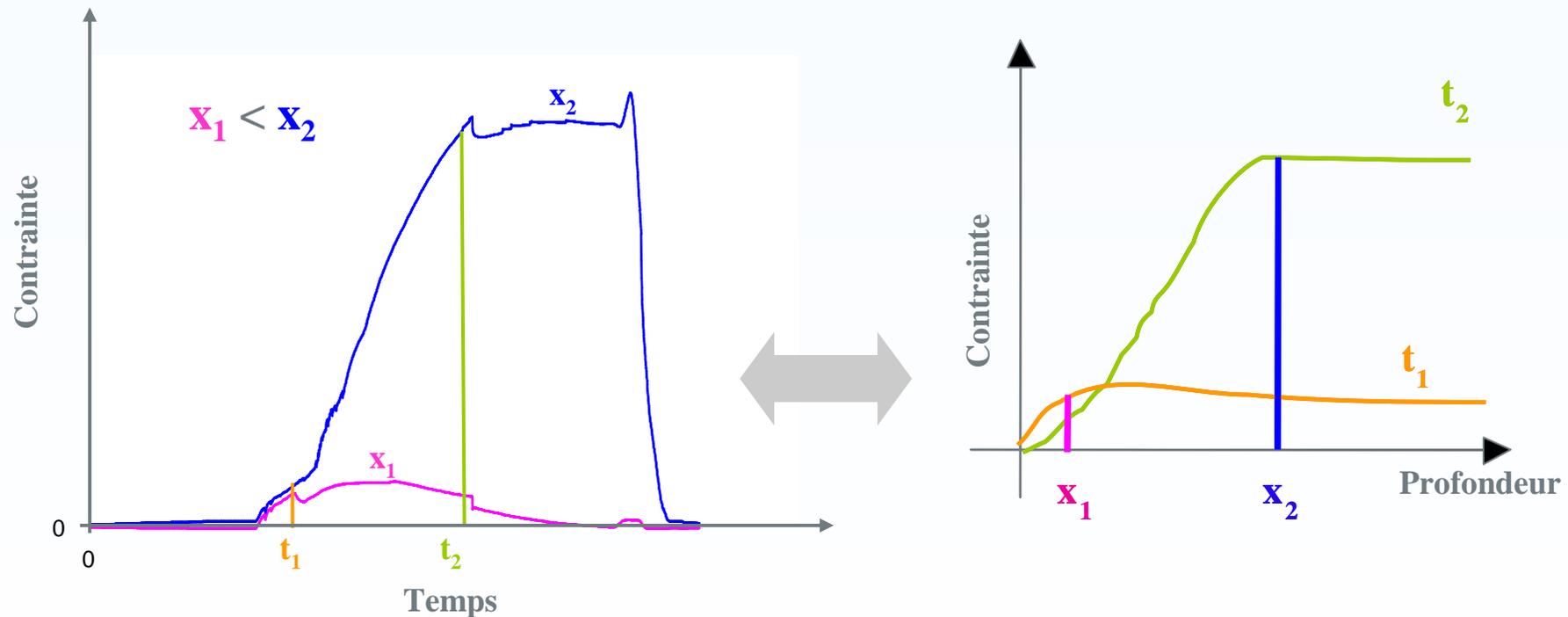


## ... sensibilité au gel différente selon le calcaire



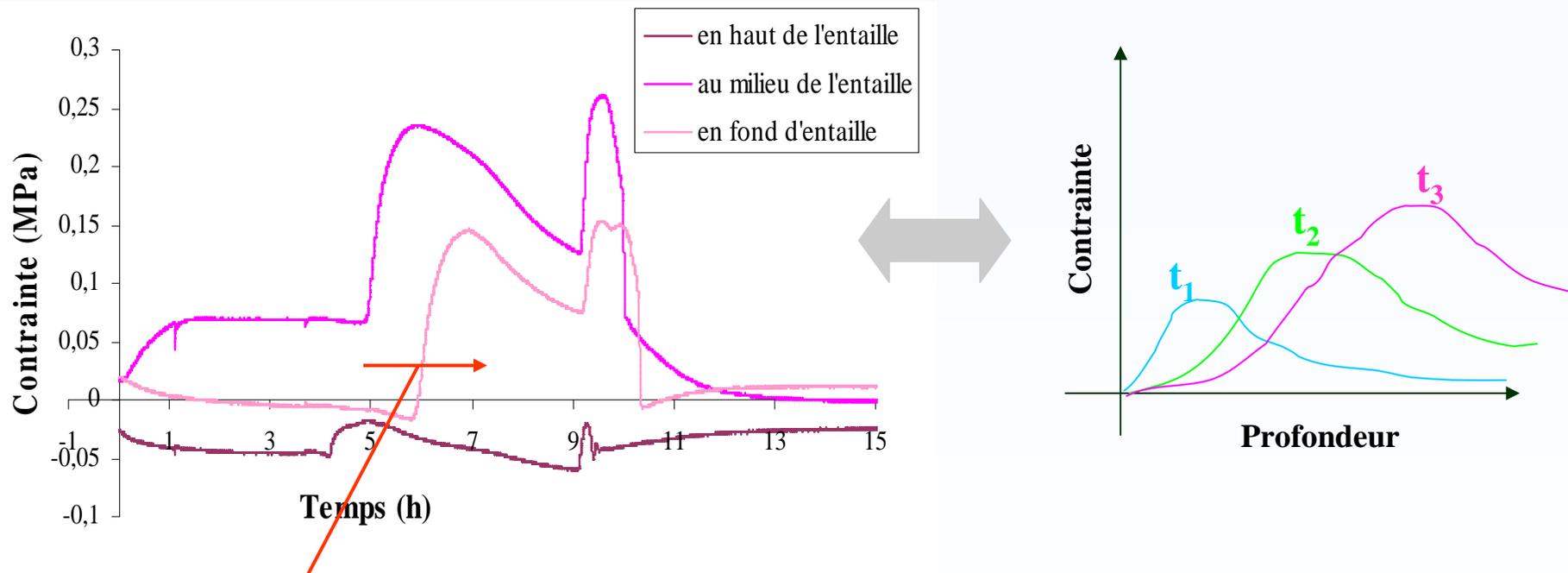
<b>Chamesson</b>	<b>Larrys</b>	<b>Pierre de Lens</b>
Initiation de la rupture visible après 1 cycle	Initiation de la rupture visible après 2 cycles	Initiation de la rupture visible après 5 cycles
$\sigma_{\max}$ en fond d'entaille = 1,8 MPa	$\sigma_{\max}$ en fond d'entaille = 6 MPa	$\sigma_{\max}$ en fond d'entaille = 0,3 MPa

# Évolution spatio-temporelle de la contrainte lors du gel : cas d'une roche peu poreuse, le Larrys



- ◆ Augmentation simultanée de la pression dans l'entaille
- ◆ Pression uniforme en dessous d'une profondeur à chaque instant

# Évolution spatio-temporelle de la contrainte lors du gel : cas d'une roche poreuse, la Pierre de Lens



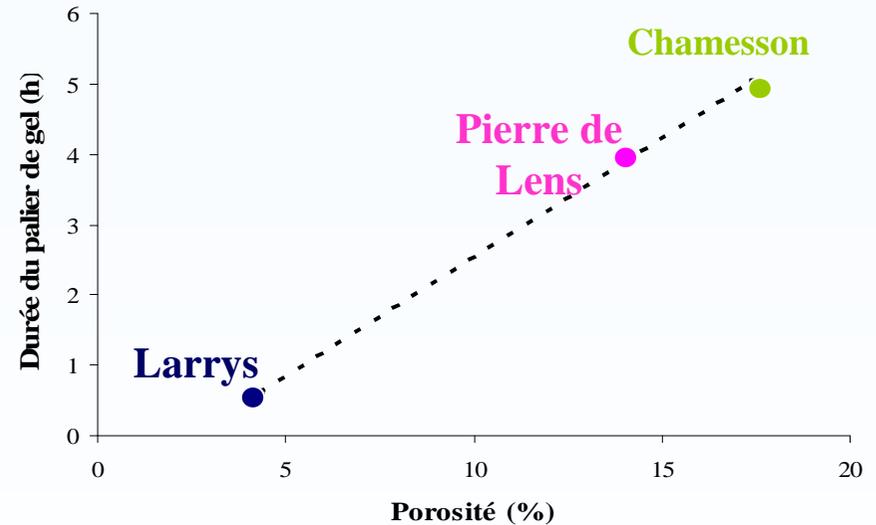
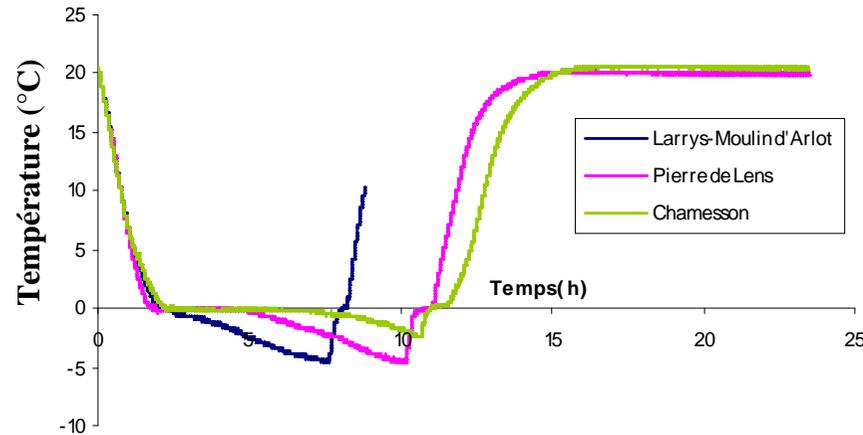
**Décalage dans le temps de l'augmentation de la contrainte**

- ◆ Augmentation non-simultanée de la pression dans l'entaille
- ◆ Pression non-uniforme en profondeur dans l'entaille

Milieu ouvert = mouvements d'eau

# **Analyse et modèle phénoménologique**

# Influence de la porosité

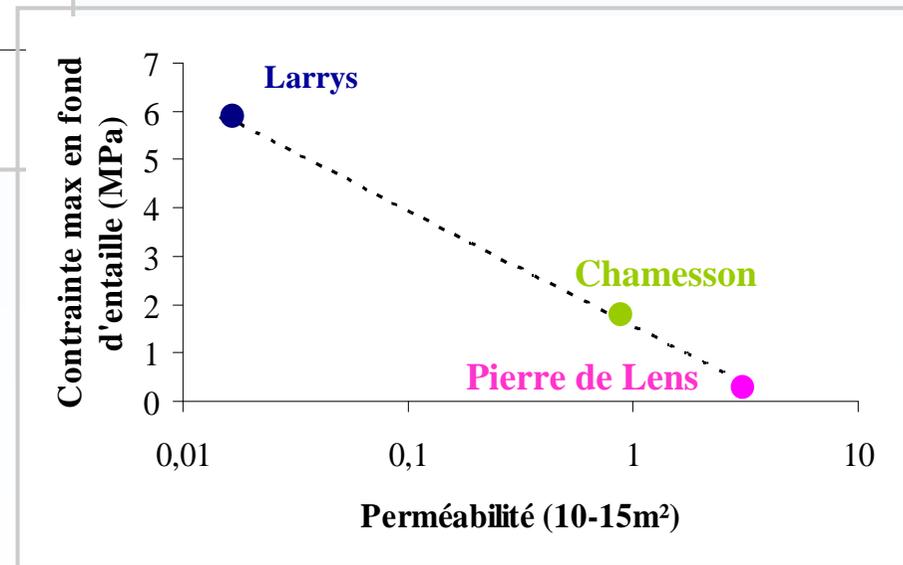
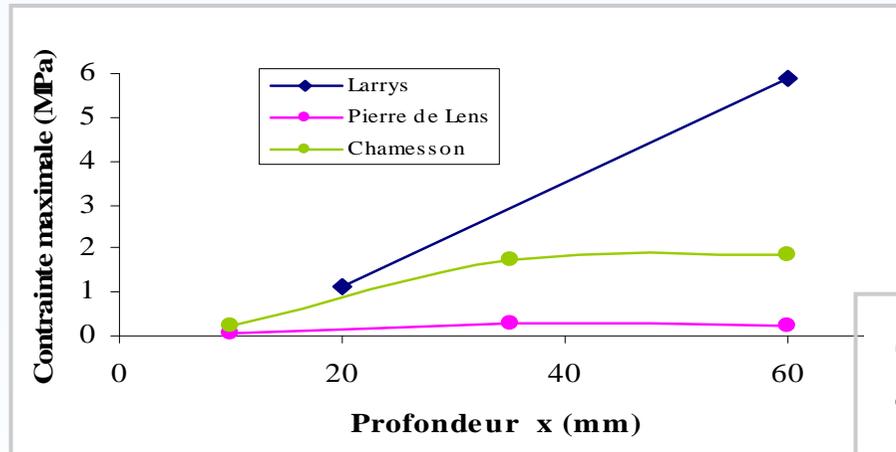


- ◆  $T^{\circ}\text{C}$  entaille =  $T^{\circ}\text{C}$  roche
- ◆ Plus une roche est poreuse, plus le gel de l'eau liquide qu'elle contient sera long.
- ◆ Conflit entre la cinétique de gel dans l'entaille et celle dans la roche => confinement latéral



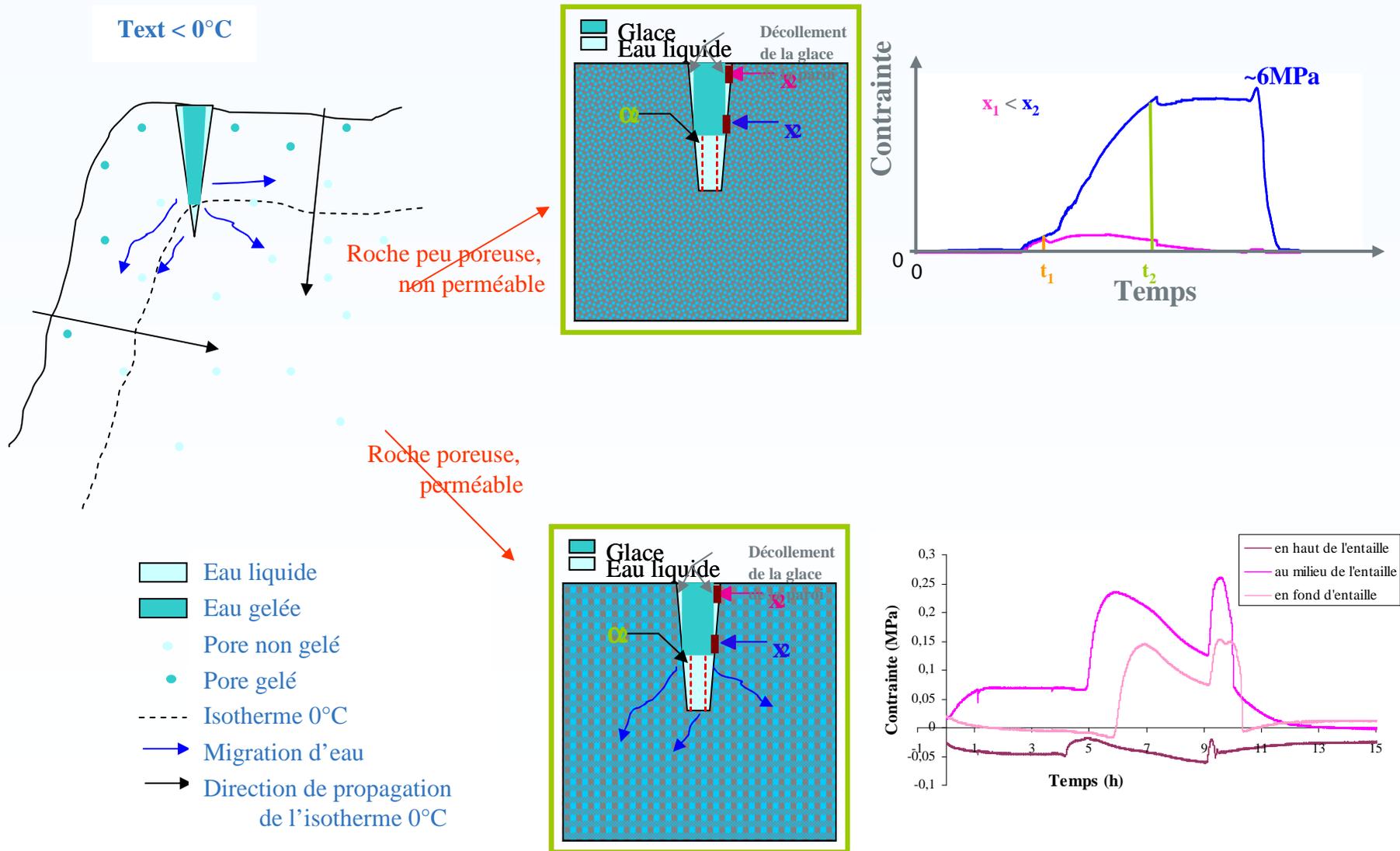
Confinement de l'eau liquide dans l'entaille, fonction de la porosité de la roche

# Influence de la perméabilité



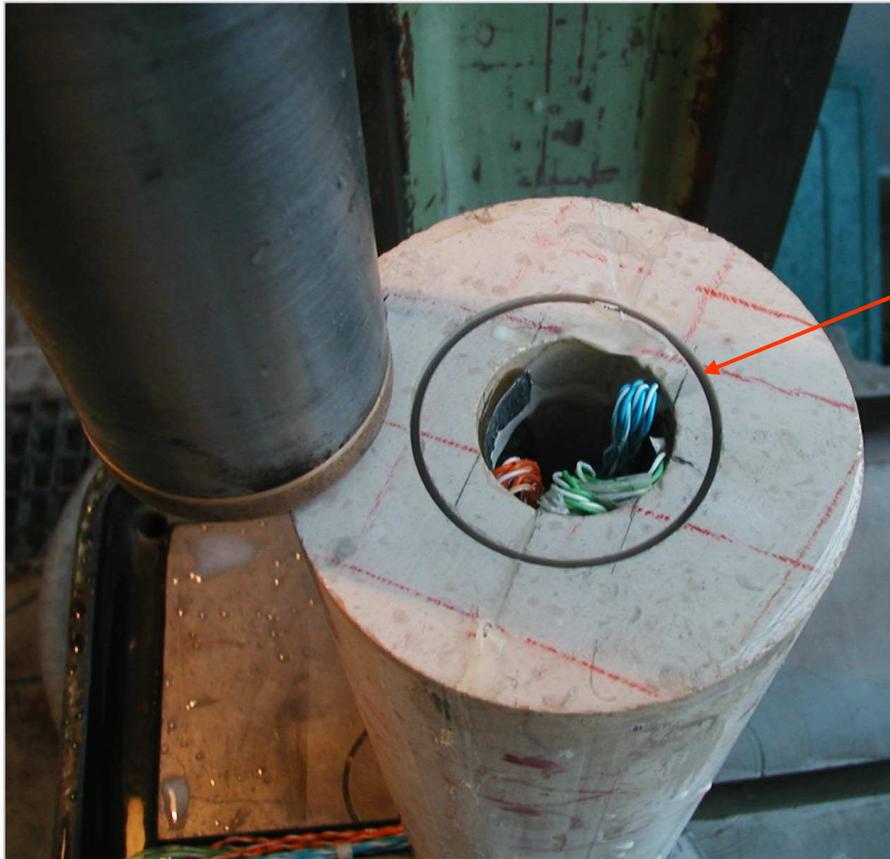
- ◆ Valeur-limite de la contrainte maximale linéairement corrélée à la perméabilité
- ◆ Confinement généré par la propagation du front de gel, limité par la perméabilité

# Modèle physique de la propagation du gel dans une fissure



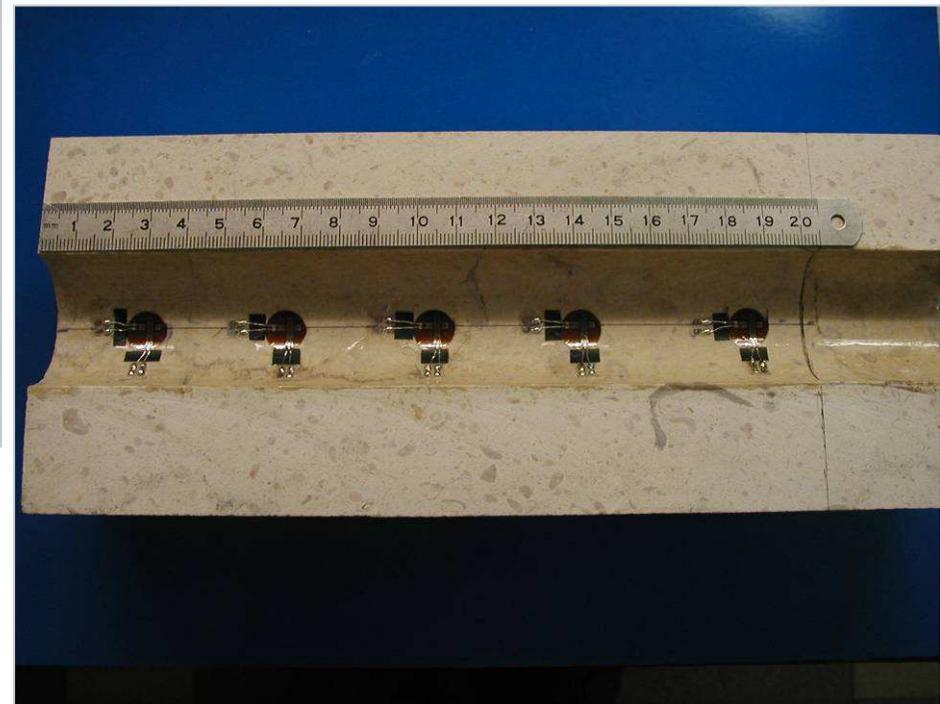
# **Modèle empirique de la contrainte générée**

# Dispositif expérimental



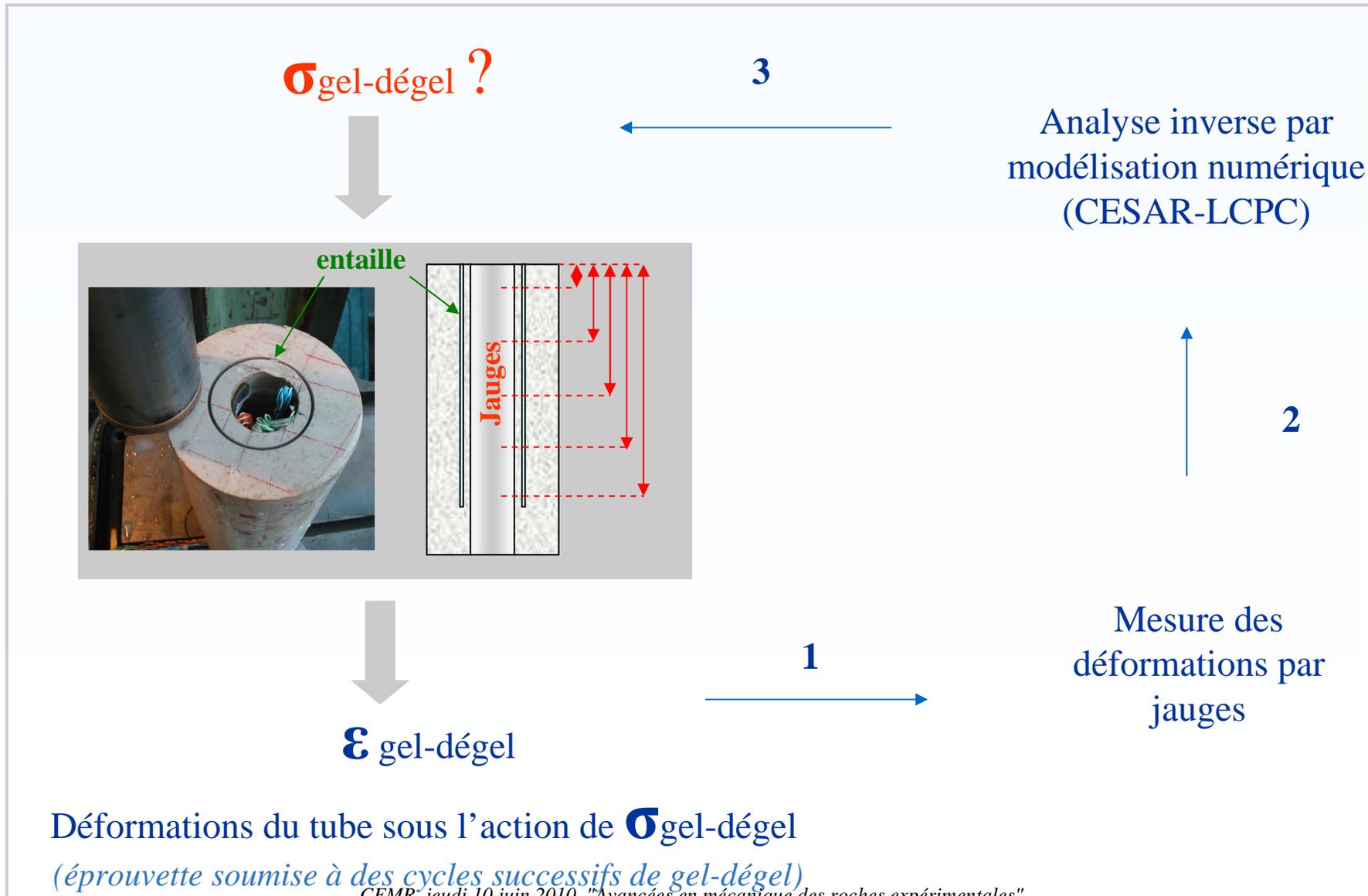
Entaille

*Collage des jauges*



*Tube reconstitué : surcarottage*

# Principe de l'analyse inverse



## Modèle mathématique de l'allure de la contrainte le long de l'entaille

$$\sigma(x, t) = a(x) \left[ 1 - \exp^{-b(x)t} \right] \left[ 1 - \exp^{-c(x)t^3} \right]$$

Où:

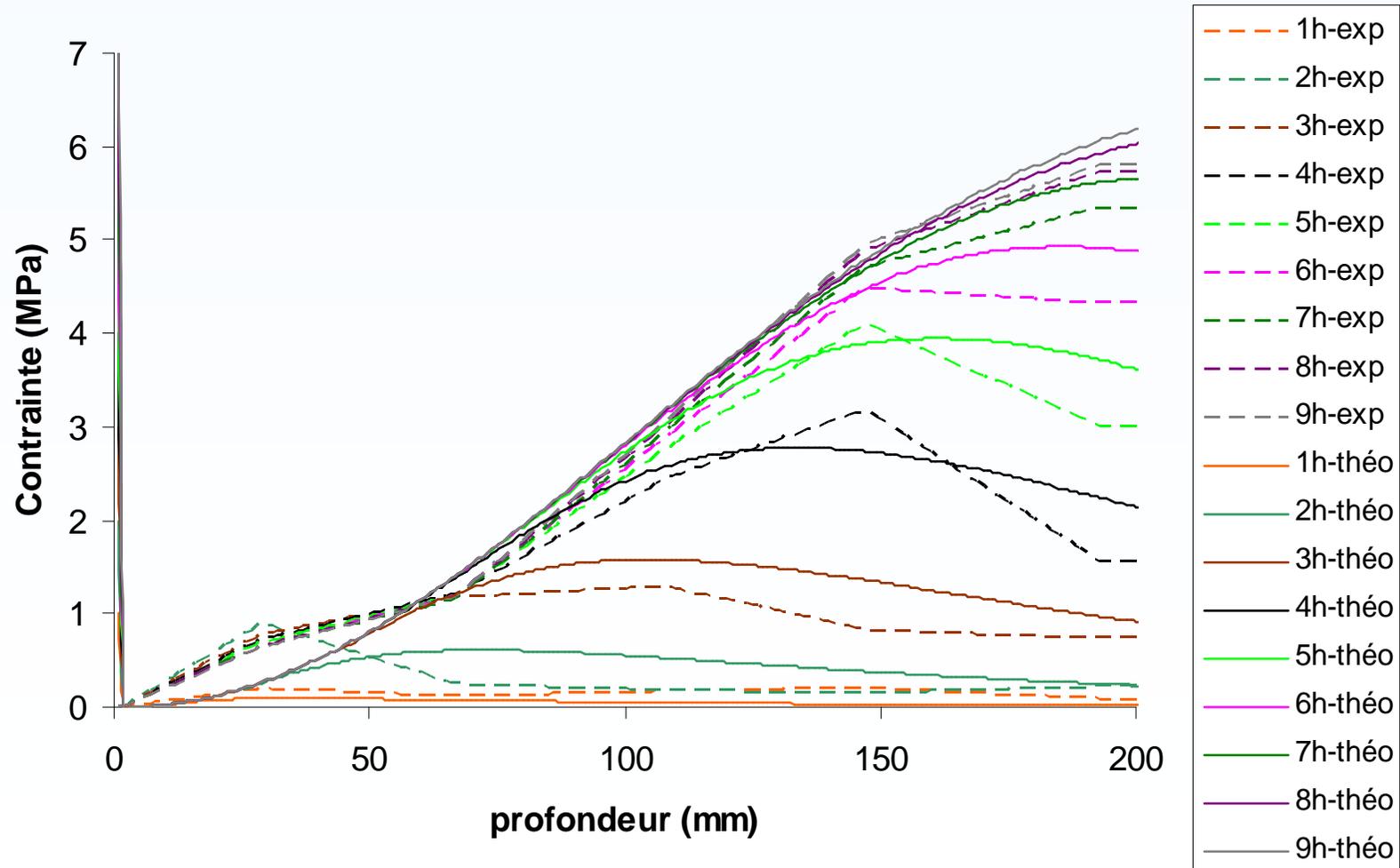
$$a(x) = a_1 \left[ 1 - \exp^{-\frac{x^2}{a_2}} \right]$$

$$b(x) = \frac{b_1}{x}$$

$$c(x) = \frac{c_1}{x^2}$$

**Fonctions positives**

# Contrainte en fonction du temps : théorie/expérience



## Modèle mathématique de l'allure de la contrainte le long de l'entaille

$$\sigma(x, t) = a(x) \left[ 1 - \exp^{-b(x)t} \right] \left[ 1 - \exp^{-c(x)t^3} \right]$$

Où:

$$a(x) = a_1 \left[ 1 - \exp^{-\frac{x^2}{a_2}} \right]$$

'Allure maximale de la contrainte le long de l'entaille'

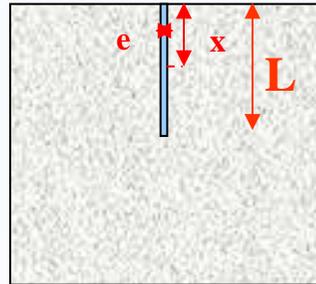
= contrainte à retenir en terme de gestion du risque

$$b(x) = \frac{b_1}{x}$$

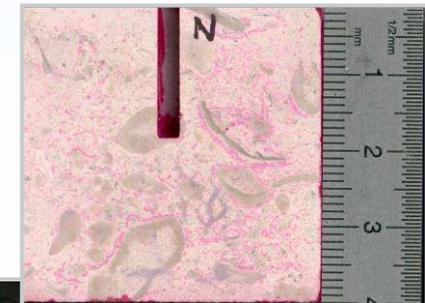
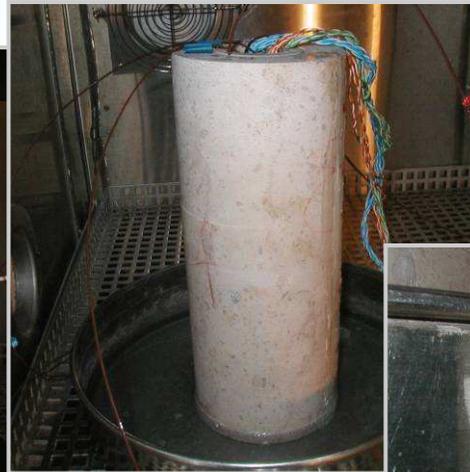
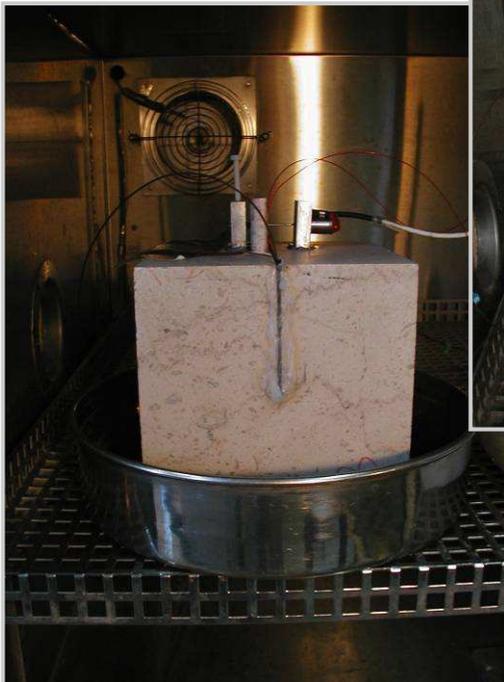
$$c(x) = \frac{c_1}{x^2}$$

Fonctions positives

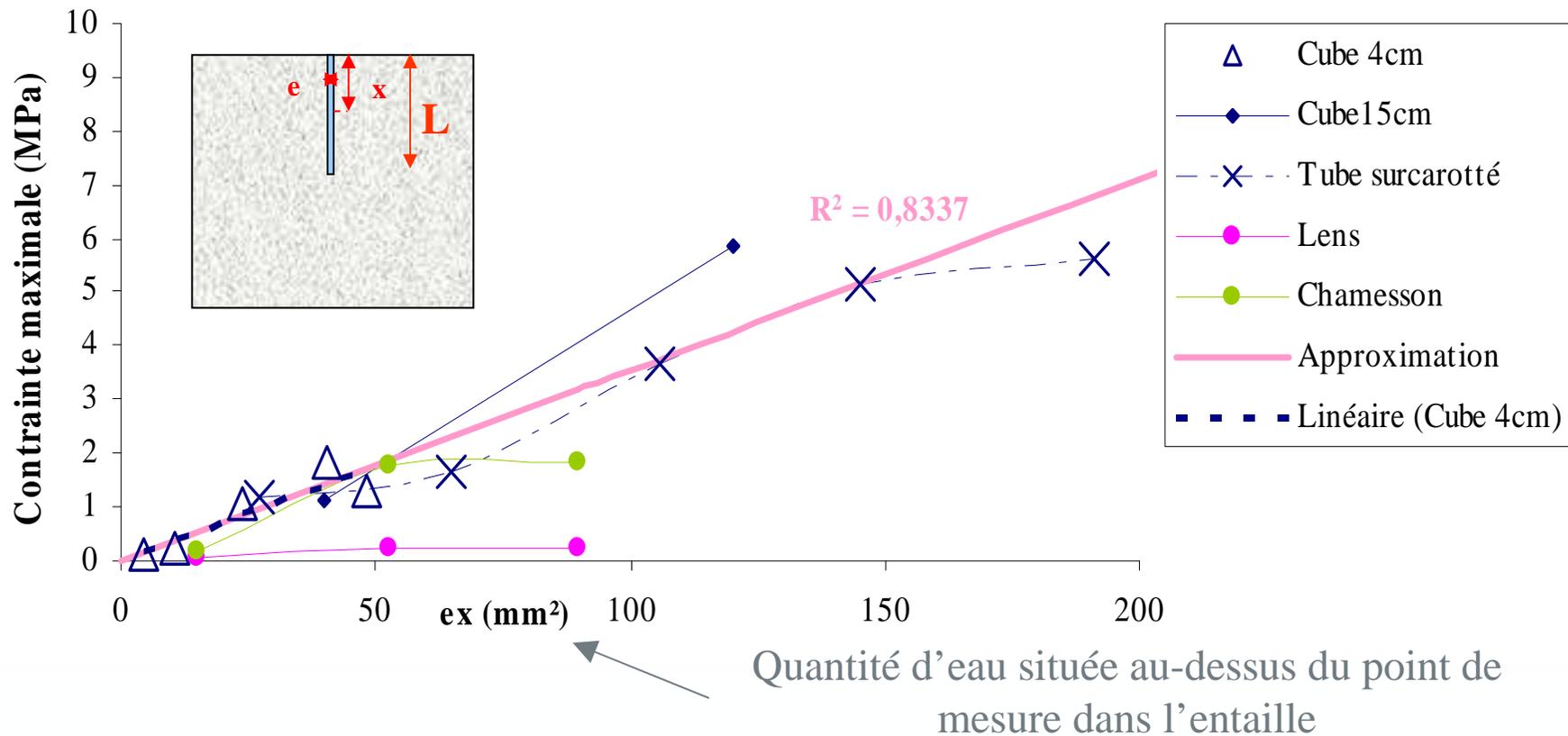
# Étude de l'influence de la géométrie sur la contrainte générée par le gel



- ◆  $e$  : épaisseur de l'entaille
- ◆  $L$  : profondeur de l'entaille
- ◆  $x$  : profondeur de mesure



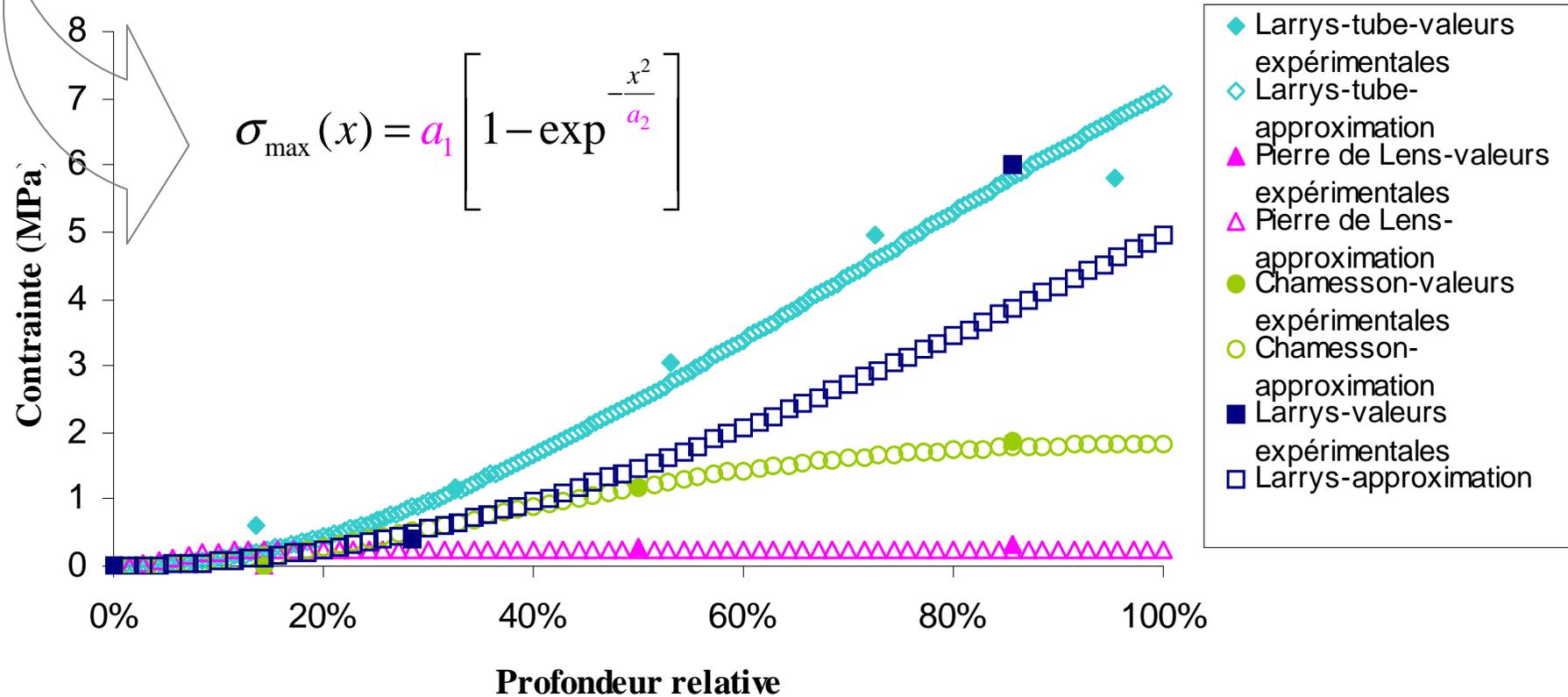
# La contrainte maximale dépend de la géométrie de l'entaille



⇒ **contrainte maximale proportionnelle à la quantité d'eau sus-jacente jusqu'à une valeur-limite**

# Modèle de l'allure de la contrainte

*et comparaison avec résultats expérimentaux  
(cubes entaillés de 15 cm de côté)*



**=>  $a_1$  et  $a_2$  entièrement paramétrés par la géométrie de l'entaille et les caractéristiques du réseau poreux**

# *Conclusions et perspectives*

## ◆ Intérêts de ces dispositifs expérimentaux

- Le gel de l'eau dans un réseau de fissures d'un massif calcaire suffit à expliquer la propagation des fissures
- Sollicitation due au gel, fonction de la compétition entre :
  - la cinétique d'écoulement des fluides dans le réseau poreux environnant de la roche (rôle de la perméabilité de la roche)
  - la cinétique de progression du front de gel dans la fissure (rôle de la porosité de la roche)
- Contrainte générée par le gel dans une fissure de l'ordre de quelques MPa

## ◆ Perspectives d'évolution de ces dispositifs

- Tenir compte de la perméabilité du réseau de fissures à l'échelle du massif
- Tenir compte de l'état réel des fissures (remplissage, tortuosité...)
- Influence de l'action chimique de l'eau dans l'altération des roches sous températures négatives



*Gorges du Loup, avril 2005*

**Merci de votre  
attention...**