

BOST, Marion, POUYA, Ahmad, GUEDON , Sylvine, MARTINEAU, François, 2010, Avancées en mécanique des roches expérimentales : étude expérimentale de la propagation des fissures sous l'action du gel dans les massifs calcaires, CFMR - Avancées en mécanique des roches expérimentales, LYON, FRANCE, 2010-06-10, Comité Français de Mécanique des Roches - CFMR, 37 p.

Disponible en ligne : <http://www.cfmr-roches.org/manifestations-pass%C3%A9es/manifestations-du-cfmr>



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**



Marion Bost , Ahmad Pouya, Sylvine Guédon, François Martineau

Enjeux du gel dans les roches

- ◆ Sensibilité au gel des pierres de construction

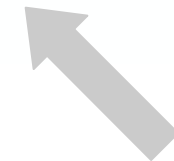


*Route d'accès au Mont Blanc,
mars 2007*



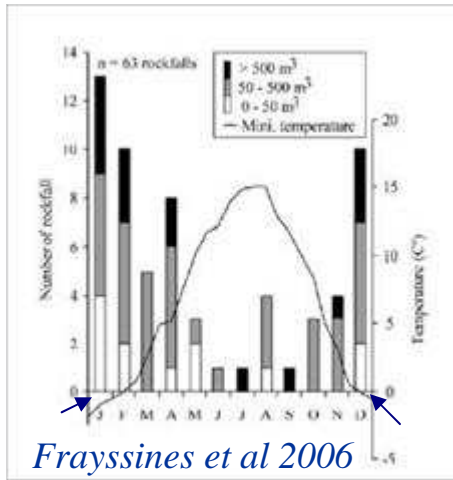
Calcaire en carrière

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



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

Problématique

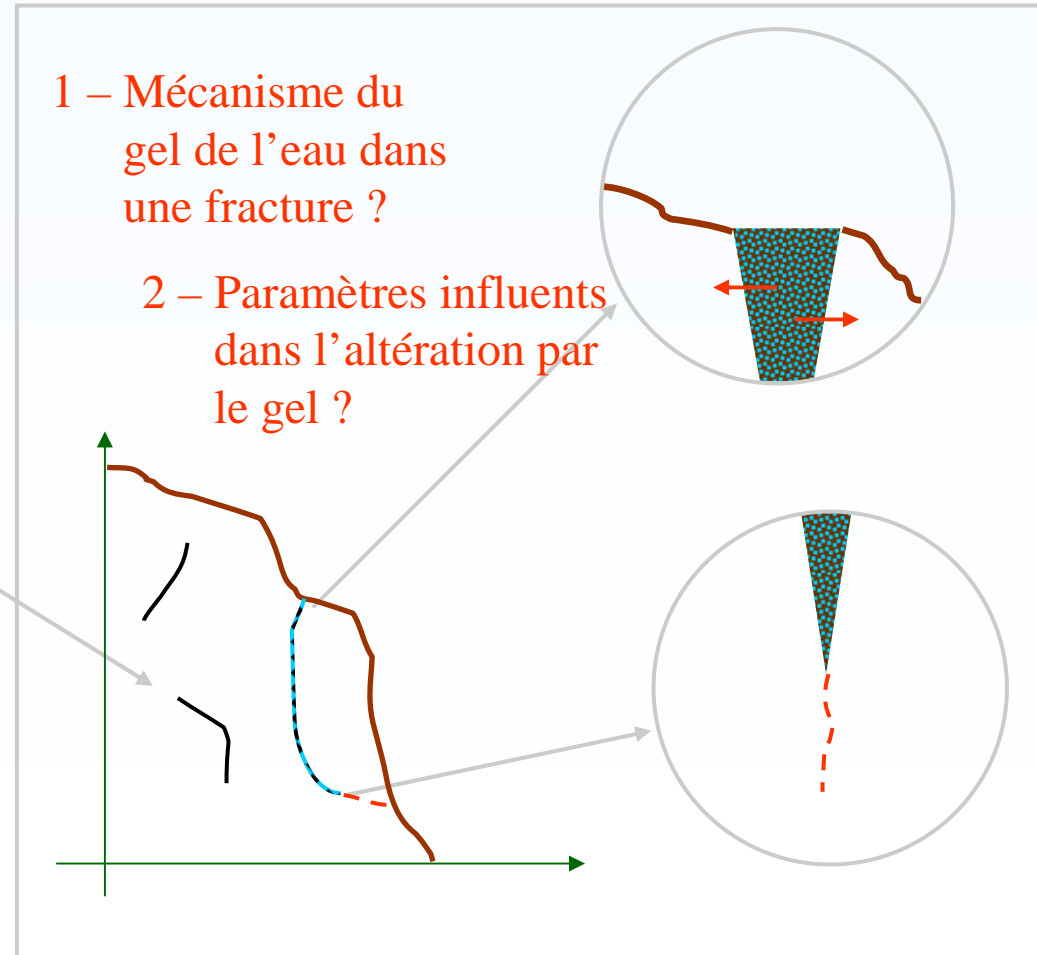


Les Grands Goulets,

février 2003

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

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



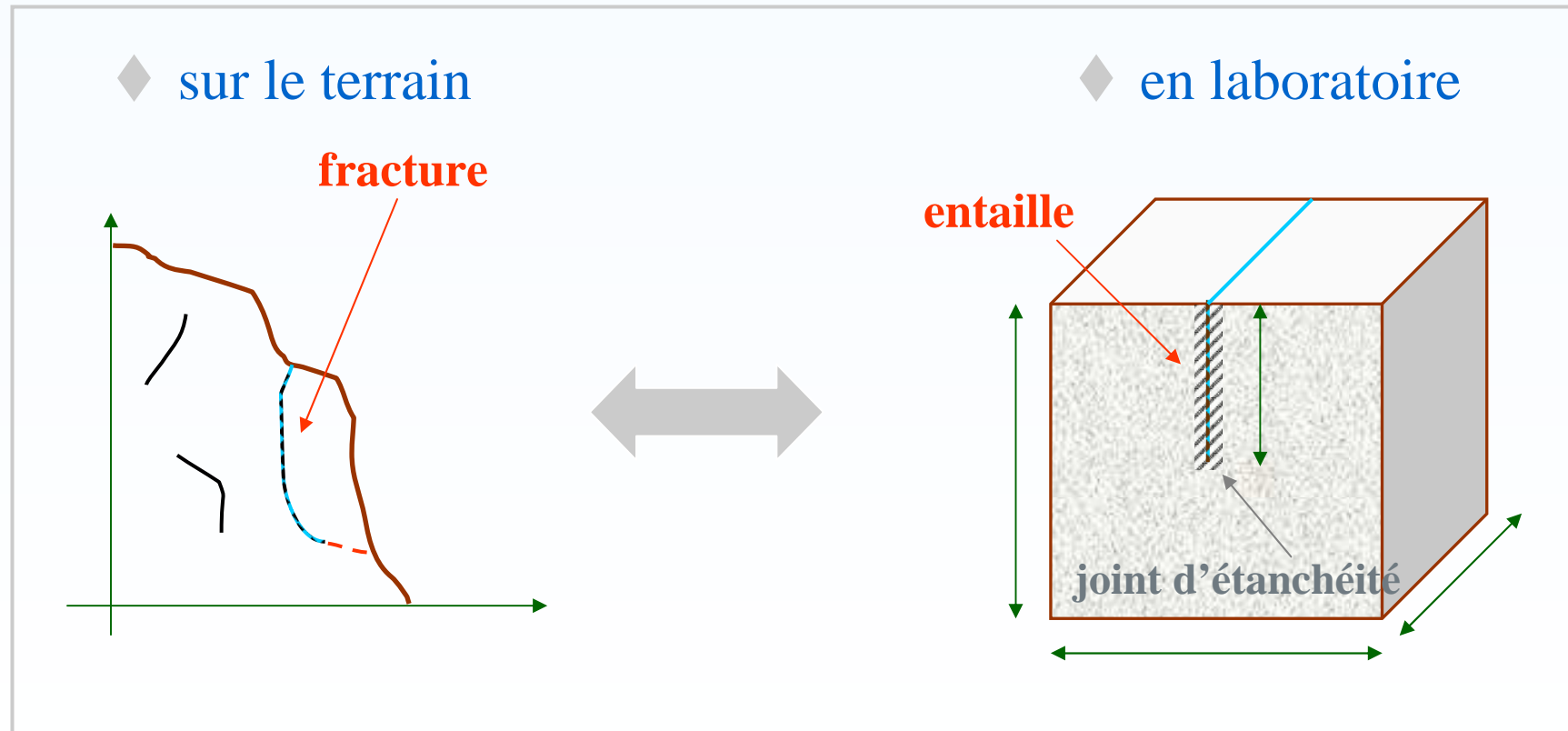
Modèle théorique ?

- ◆ 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

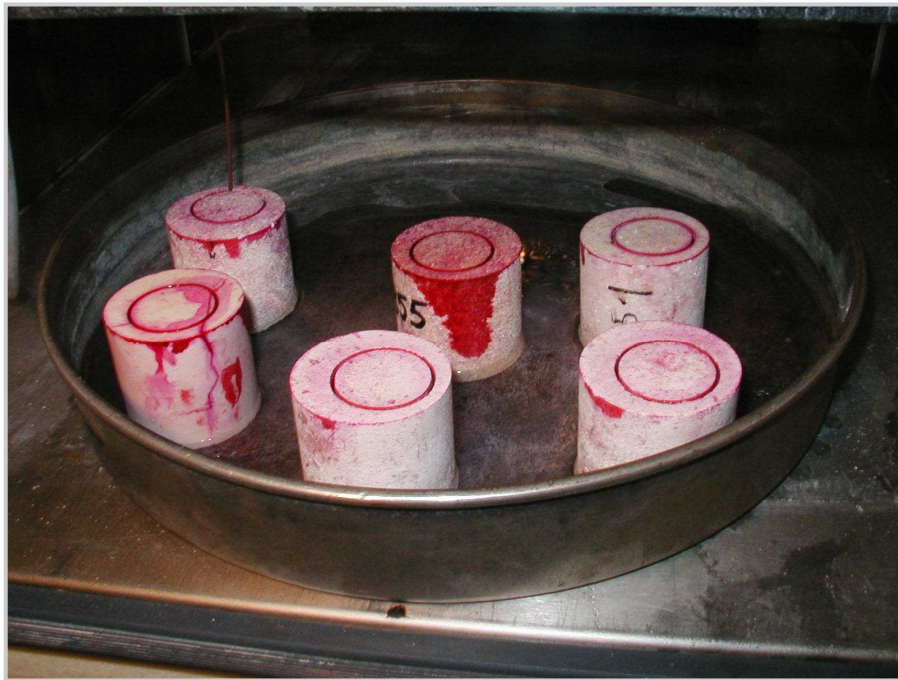
- ⇒ Valeurs trop élevées (changement d'état de la glace...)
- ⇒ Difficulté pour établir un modèle théorique en système ouvert car transferts thermique et de liquide dépendants
 - ⇒ Développement d'un modèle empirique

Reproduction du phénomène en laboratoire

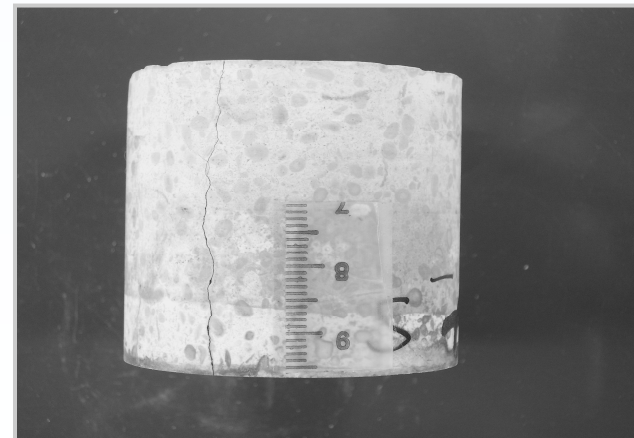
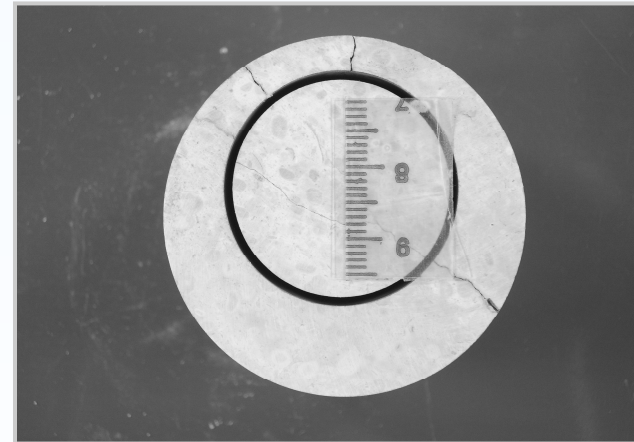


« Études de faisabilité »

Un nouvel essai de résistance au gel



Échantillons de calcaire surcarottés testés



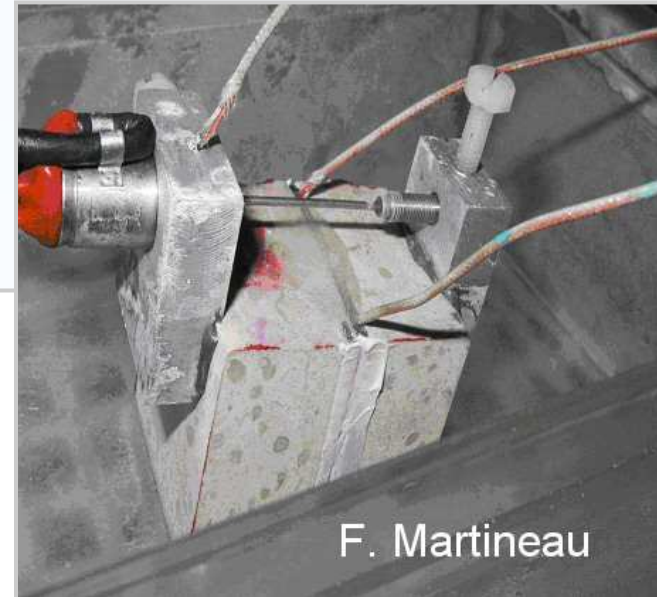
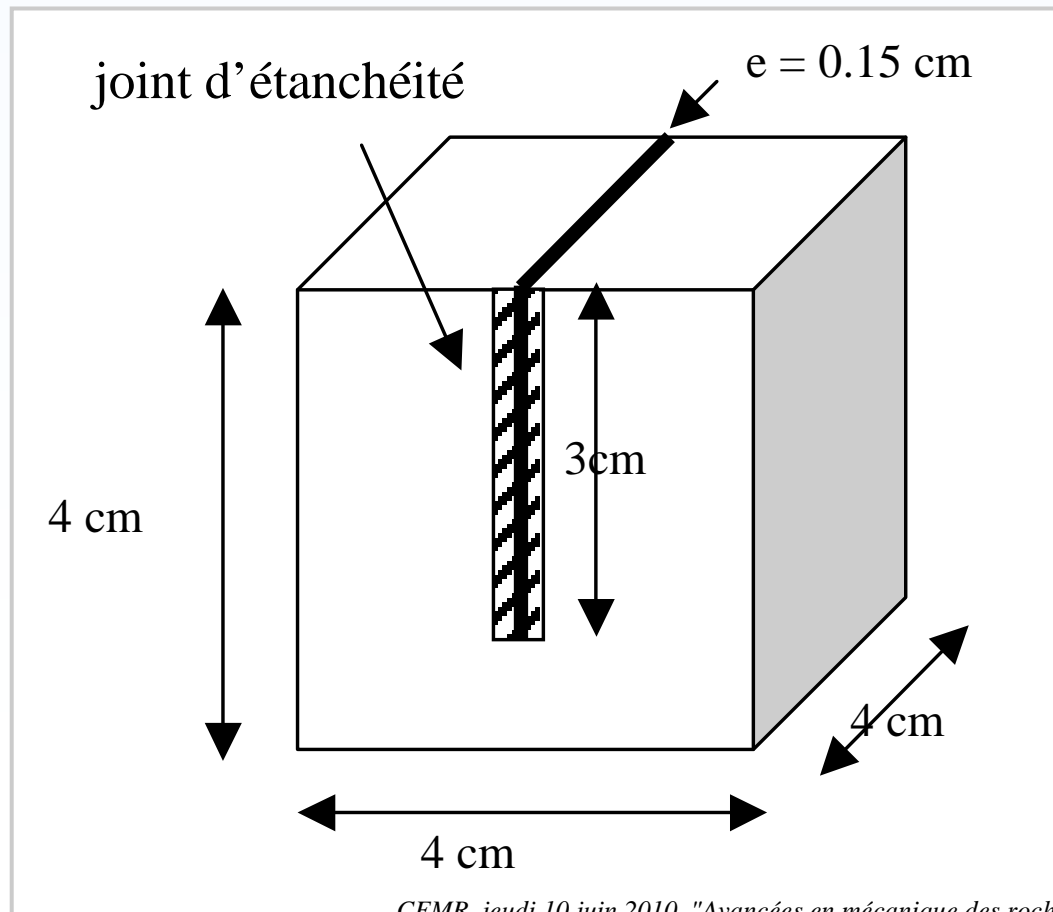
Un échantillon fissuré

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

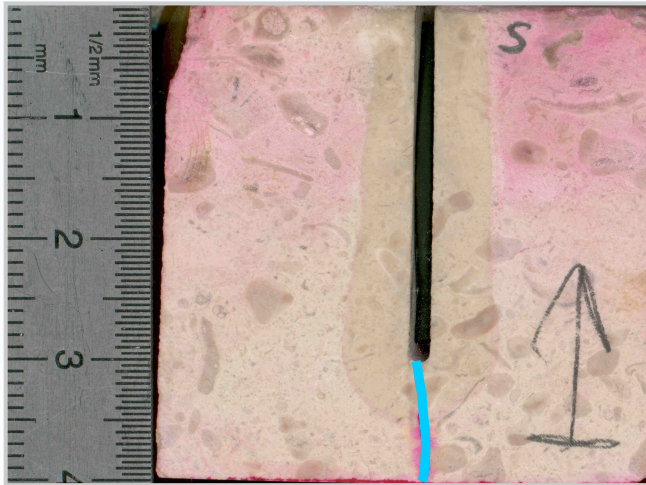
Calcaire	Initiation de la fissuration	Rupture complète	EN12371
	<i>Nombre de cycles</i>	<i>Nombre de cycles</i>	
Courville	70	>80	Gélif
Farges	75	>80	Peu gélif
Pierre de Lens	23	>64	Non gélif
Roquemaillère	/	50	Non gélif
Urgonien	1	8	Non gélif
Vilhonneur-bed 2	4	/	Non gélif
Vilhonneur-bed 7	4	/	Gélif
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

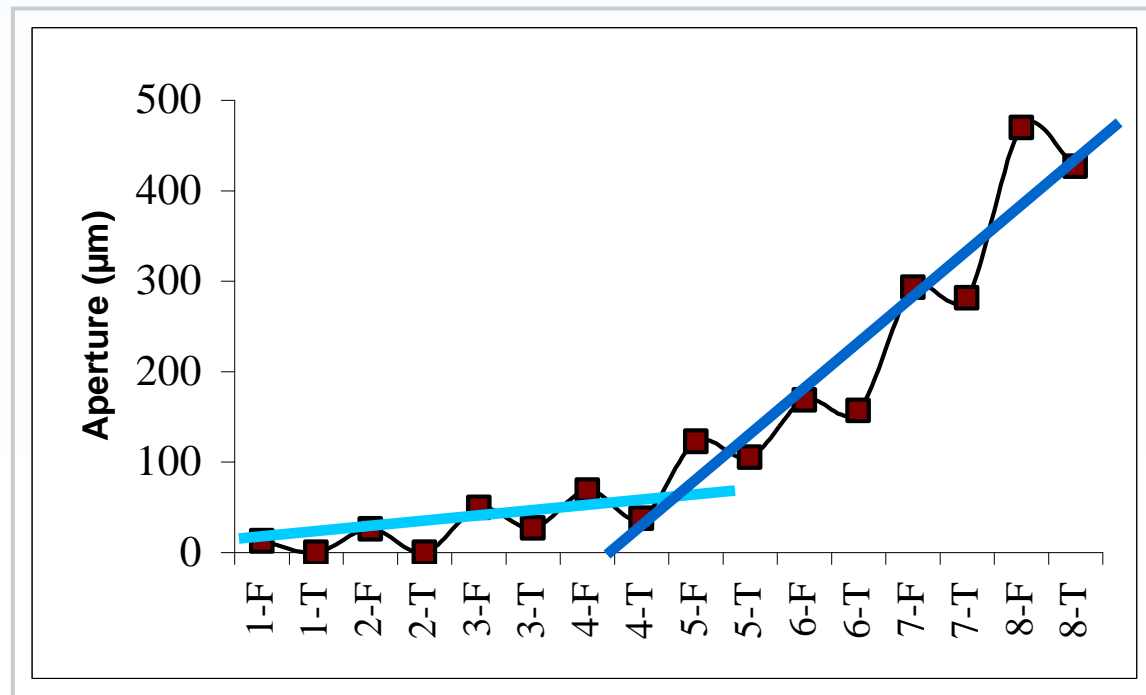


Une propagation de la fissure en deux temps...



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

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

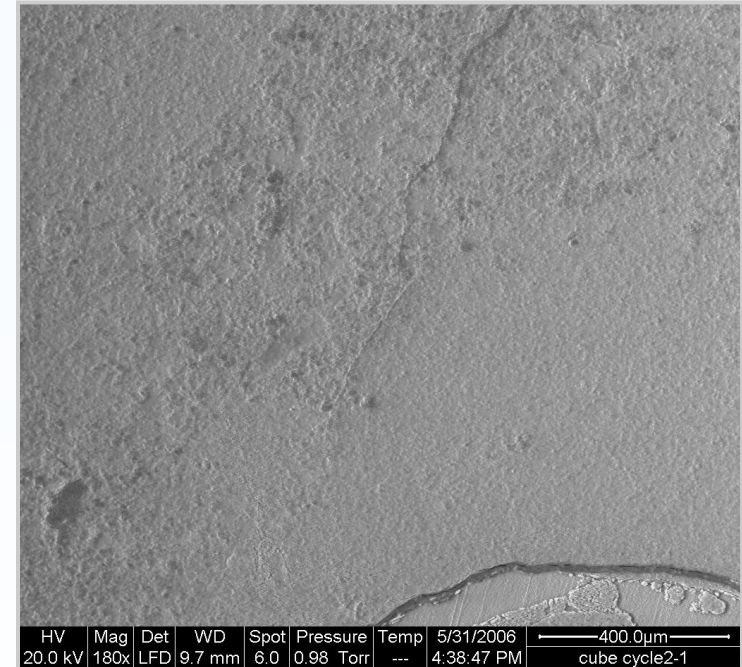
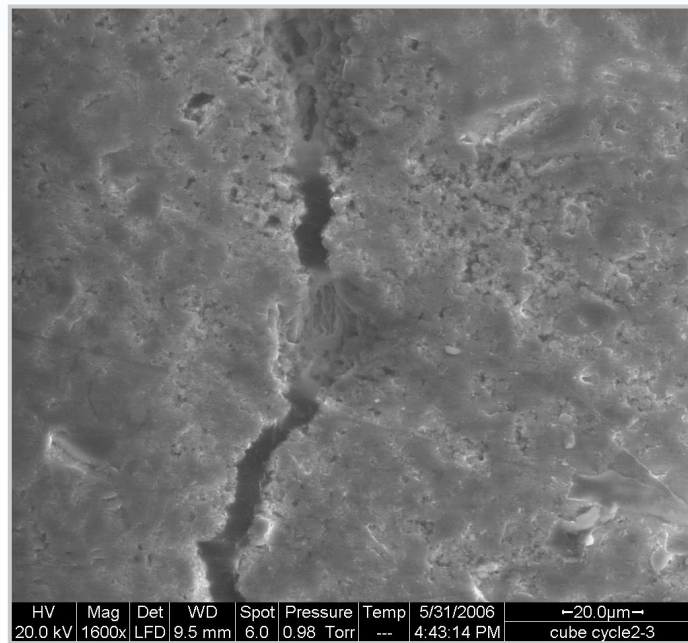


Observations microscopiques

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

1cm

Point de contact



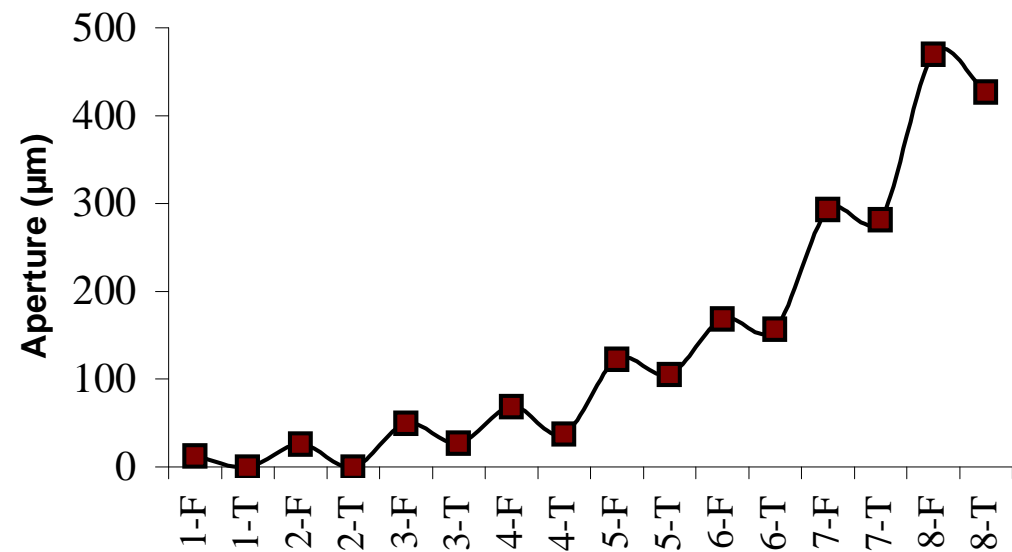
Contournement d'une oolithe...

« 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

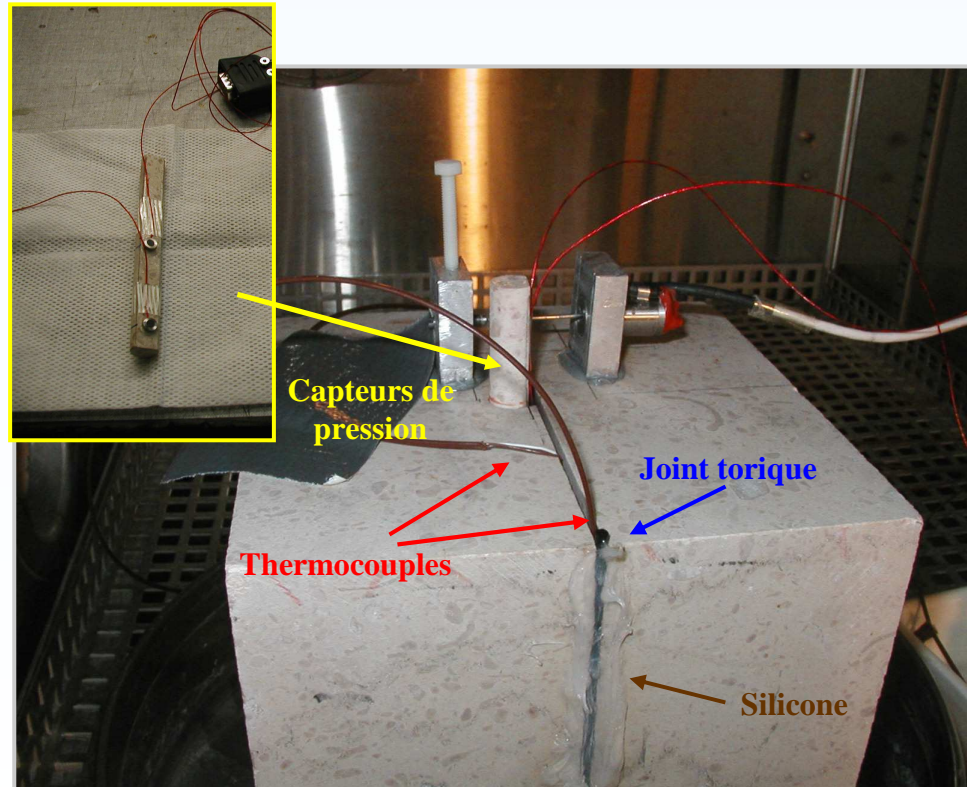


Goodman et al. (1968):

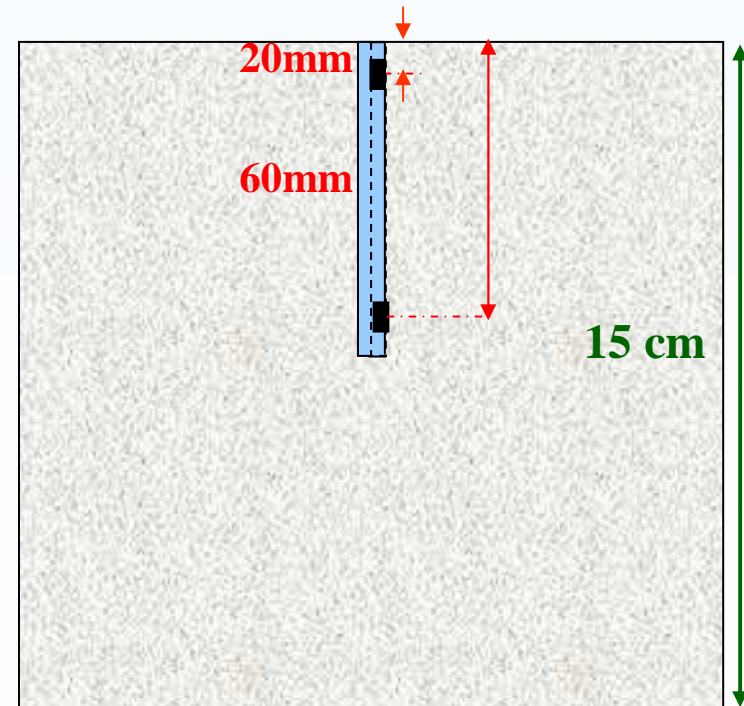
$$\sigma_n = k_n u_n$$

Dispositif et protocole expérimentaux

Instrumentation



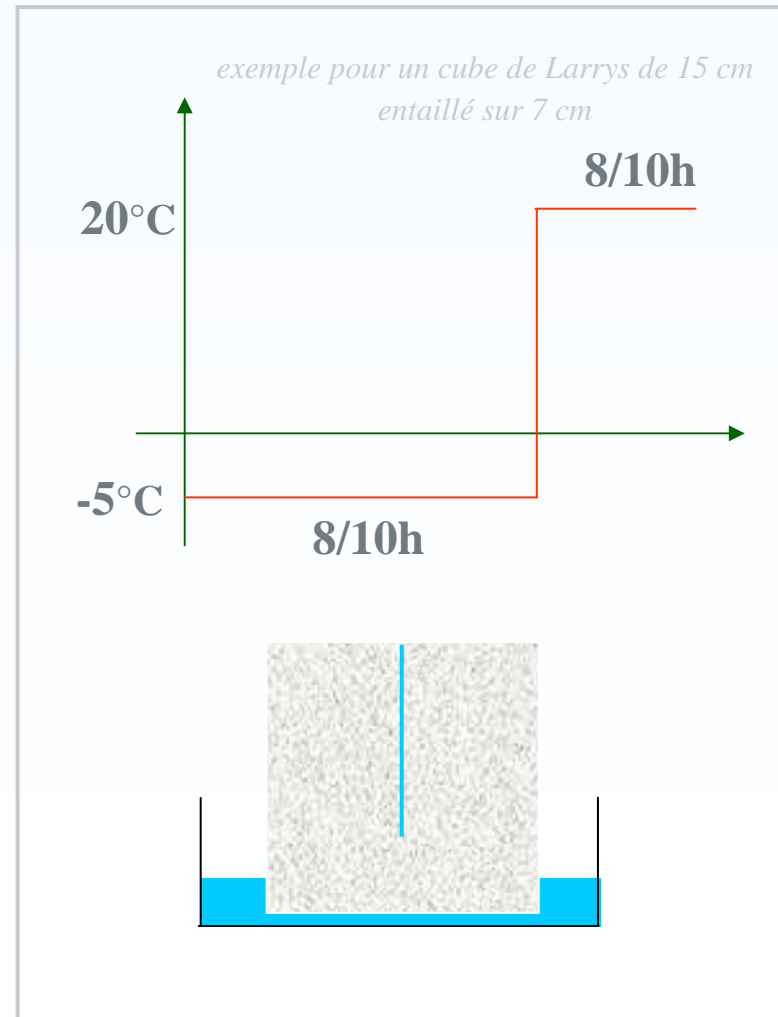
Installation
expérimentale



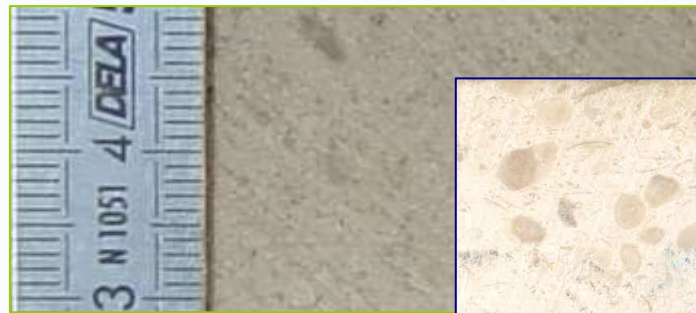
Position des capteurs de
pression dans l'entaille

Reproduction d'un cycle de gel-dégel

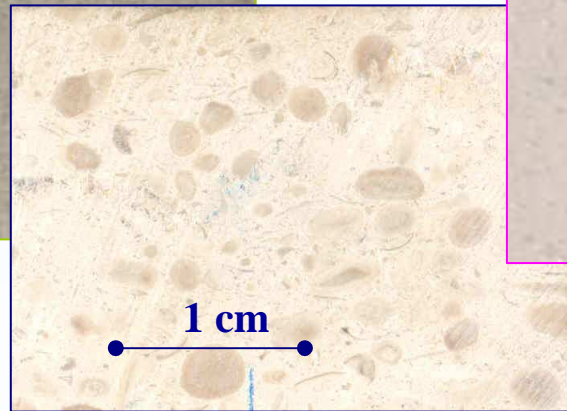
- ◆ Contraintes:
 - fidélité par rapport aux conditions naturelles
 - problème de la durée de l'expérimentation
- ◆ Variations de température choisies:
 - Gel à -5°C
 - Dégel à 20°C
- ◆ Gestion de l'humidité :
 - Éprouvette saturée à l'eau sous vide
 - Éprouvette placée dans un fond d'eau
- ◆ Durée des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



Choix des calcaires d'étude :



Chamesson

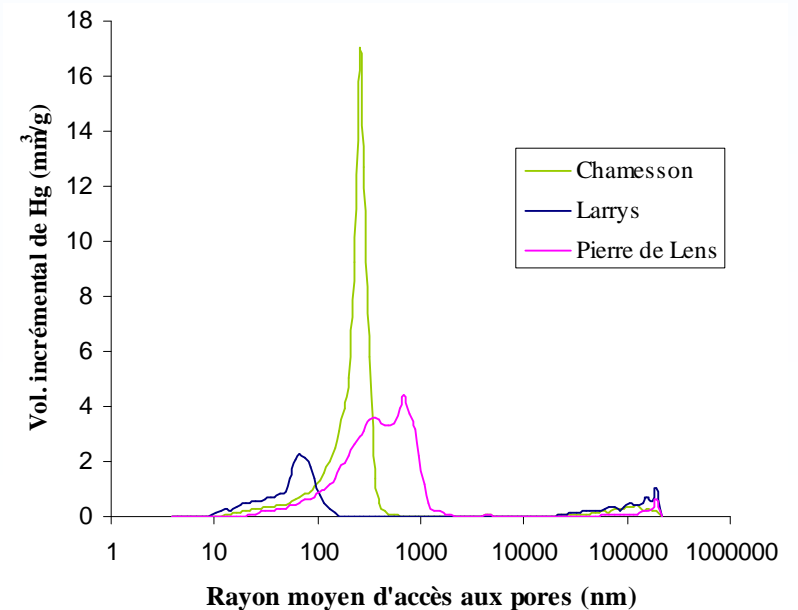


Larrys



Pierre de Lens

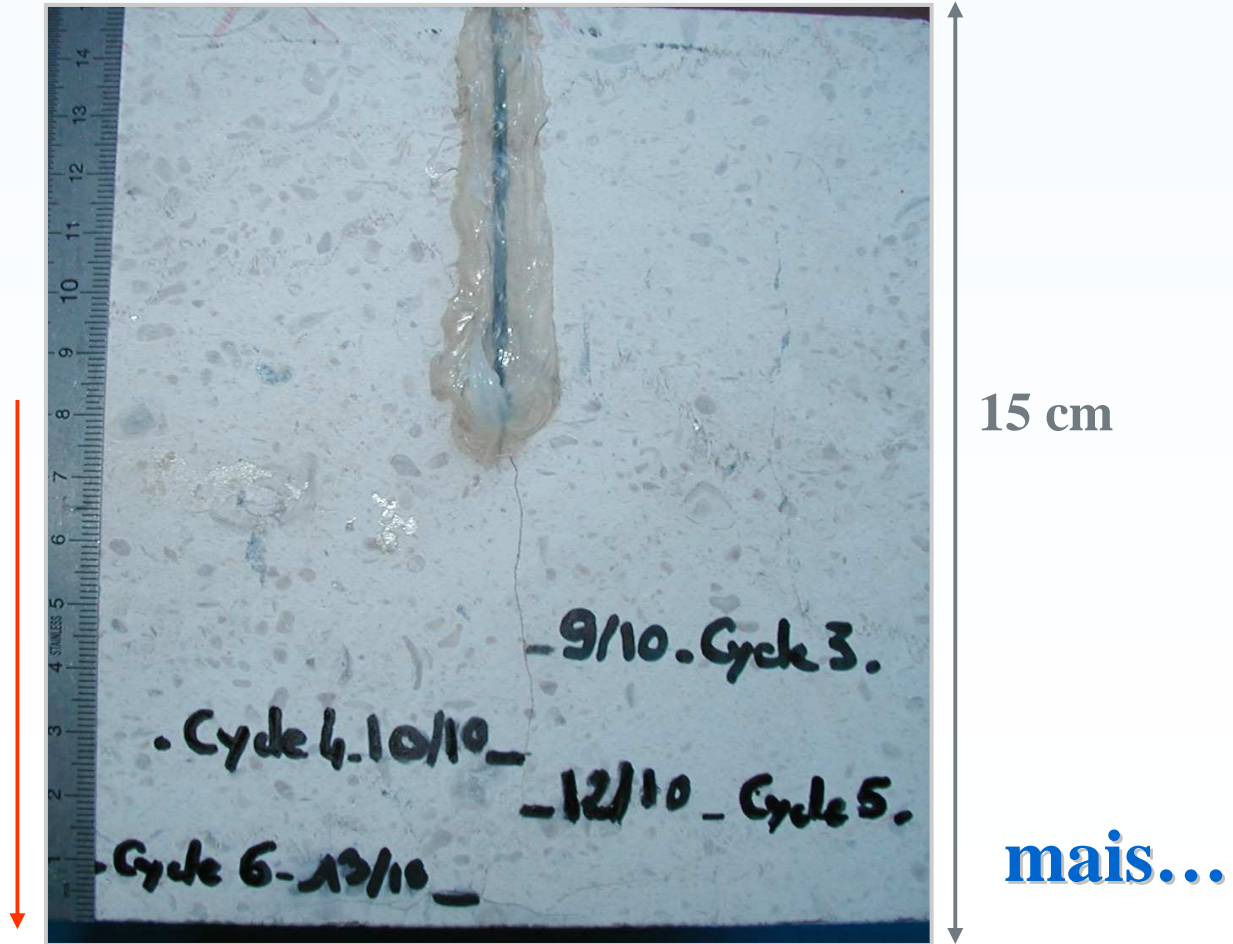
Calcaire	Porosité sous vide	Rayon moyen d'accès aux pores	Perméabilité
	%	nm	$10^{-15} m^2$
Chamesson (Côtes-d'Or)	17,5	284	0,88
Larrys (Yonne)	4,3	75	0,015
Pierre de Lens (Gard)	14	600	3,15



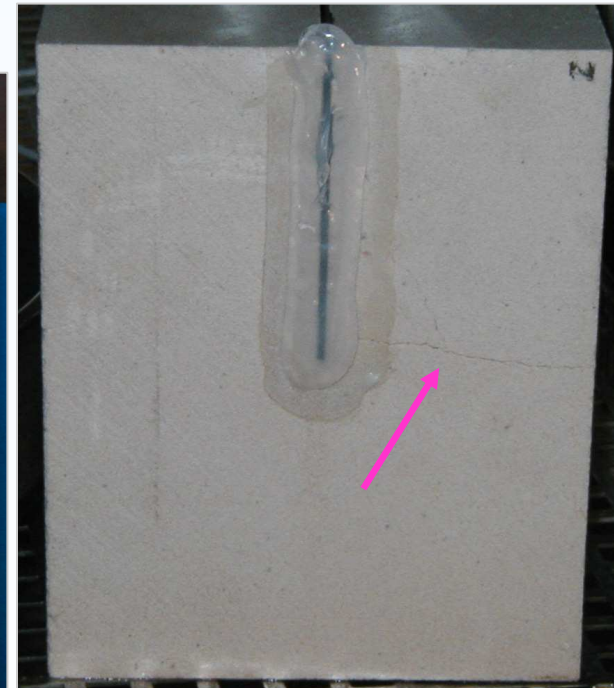
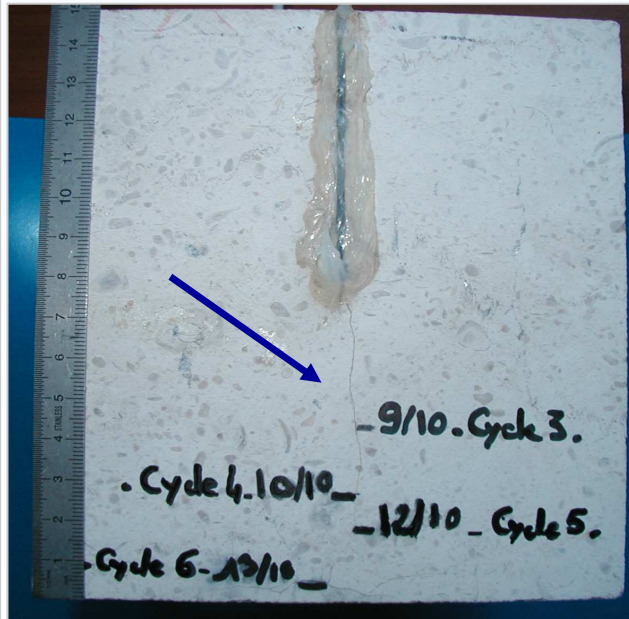
Résultats

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

Propagation de la fissuration au cours des cycles successifs

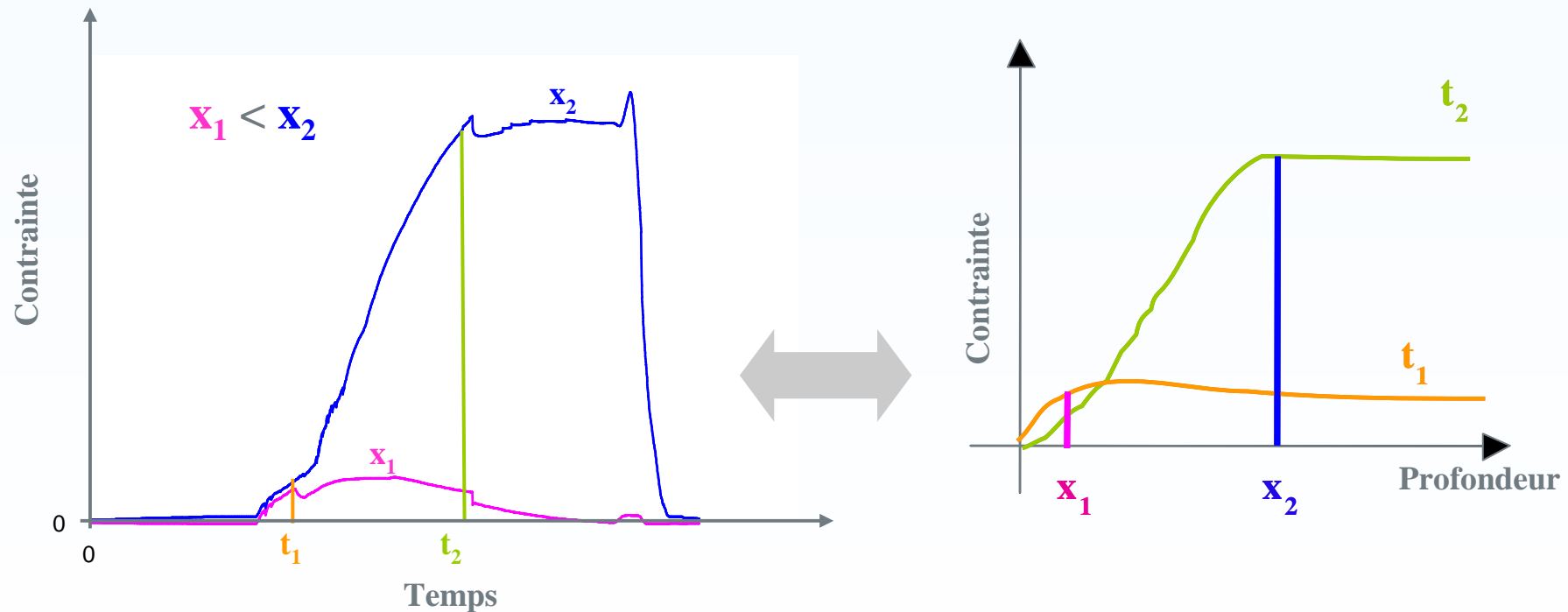


... sensibilité au gel différente selon le calcaire



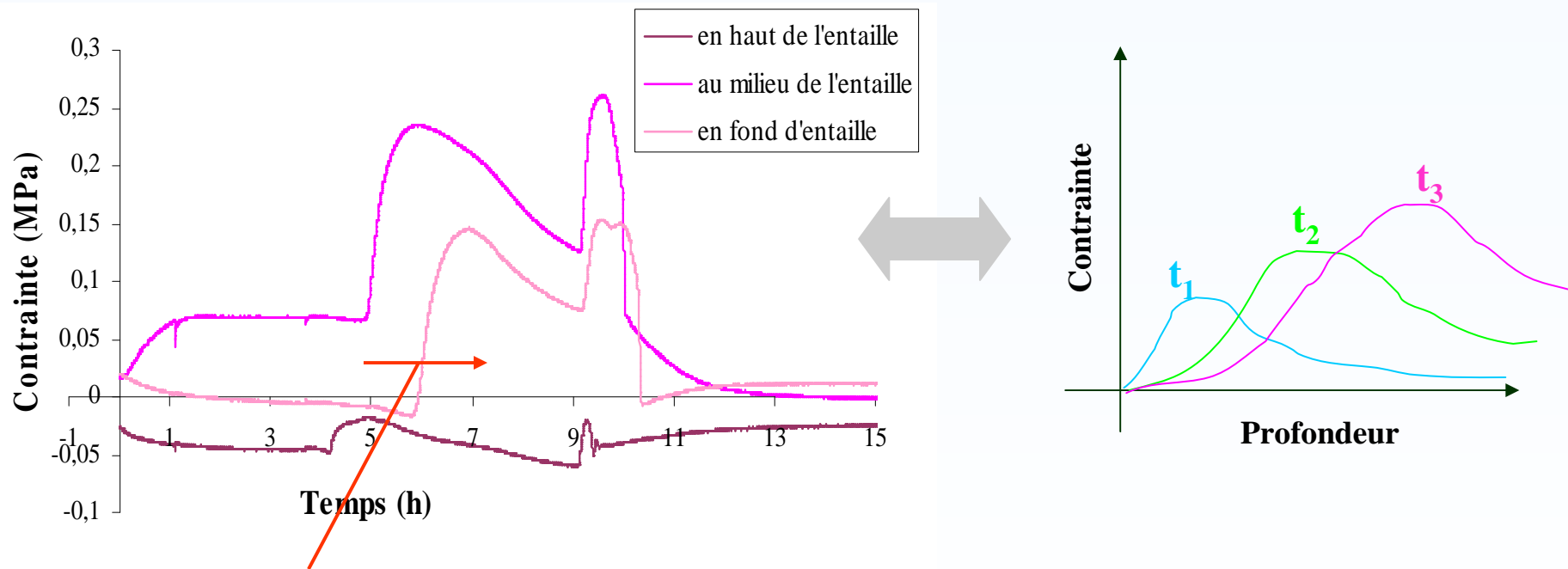
Chamesson	Larrys	Pierre de Lens
Initiation de la rupture visible après 1 cycle	Initiation de la rupture visible après 2 cycles	Initiation de la rupture visible après 5 cycles
σ_{\max} en fond d'entaille = 1,8 MPa	σ_{\max} en fond d'entaille = 6 MPa	σ_{\max} en fond d'entaille = 0,3 MPa

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



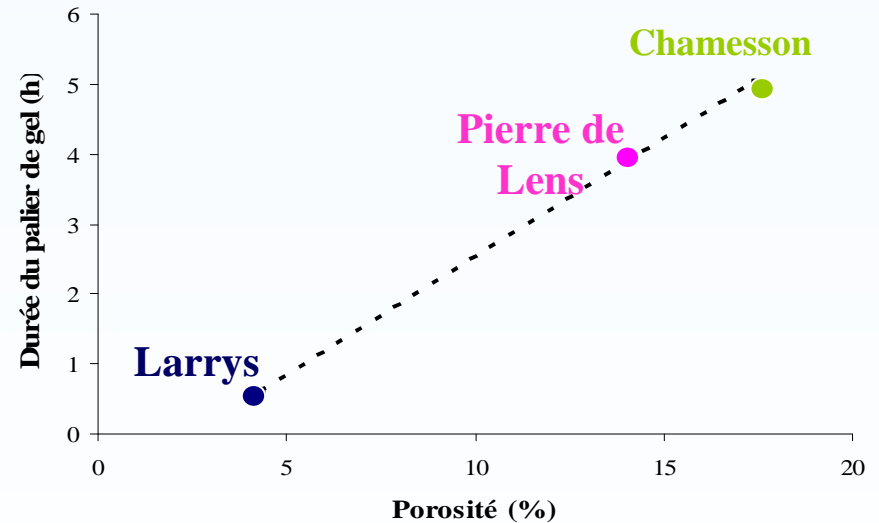
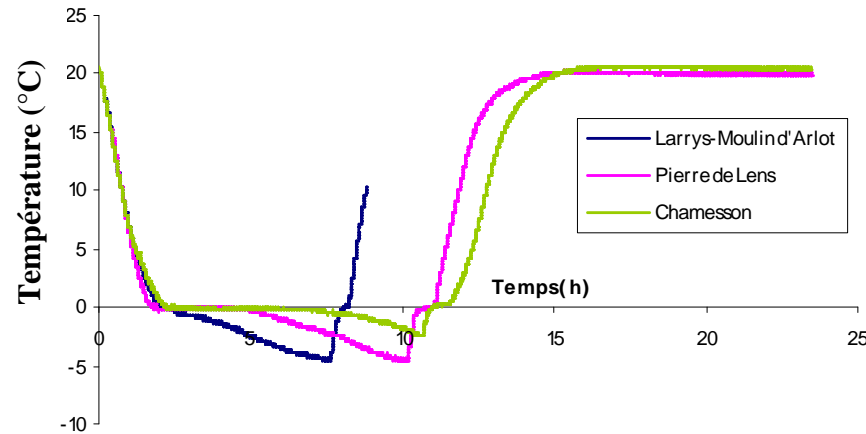
Décalage dans le temps de l'augmentation de la contrainte

- ◆ 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

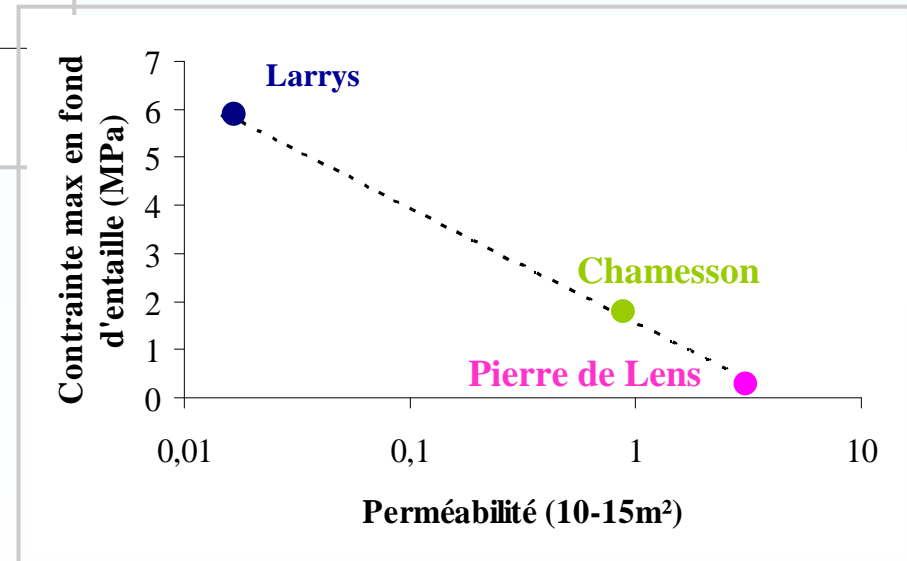
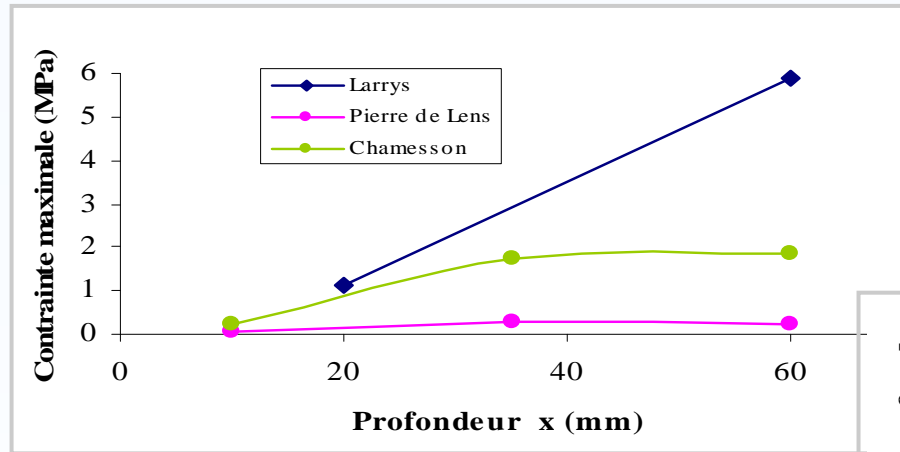


- ◆ $T^{\circ}\text{C}$ entaille = $T^{\circ}\text{C}$ roche
- ◆ Plus une roche est poreuse, plus le gel de l'eau liquide qu'elle contient sera long.
- ◆ Conflit entre la cinétique de gel dans l'entaille et celle dans la roche => confinement latéral



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

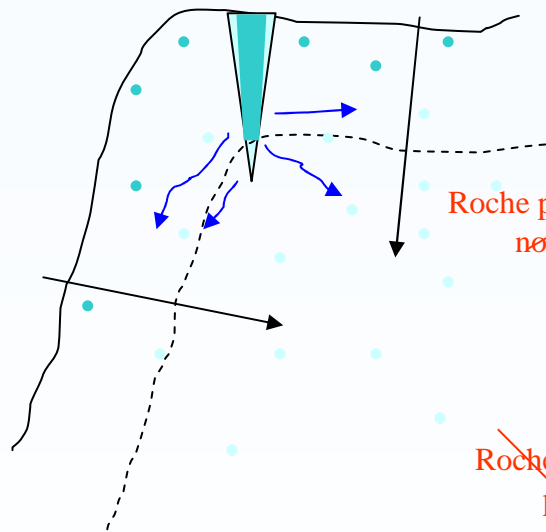
Influence de la perméabilité



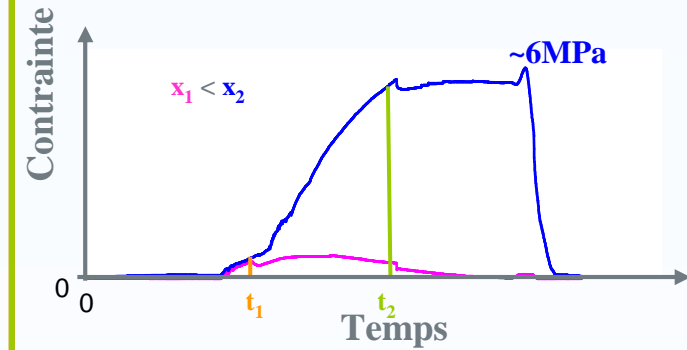
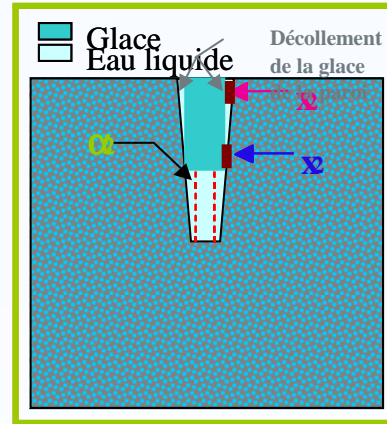
- ◆ Valeur-limite de la contrainte maximale linéairement corrélée à la perméabilité
- ◆ Confinement généré par la propagation du front de gel, limité par la perméabilité

Modèle physique de la propagation du gel dans une fissure

Text $< 0^{\circ}\text{C}$

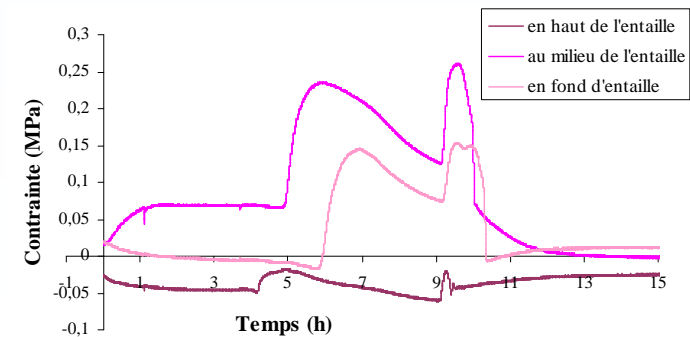
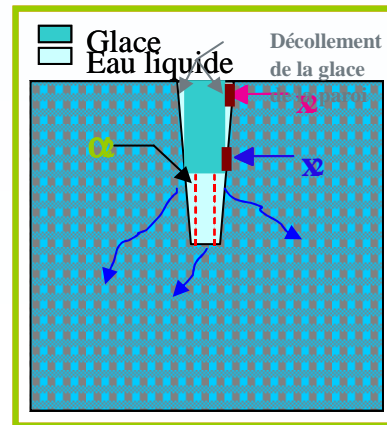


Roche peu poreuse,
non perméable



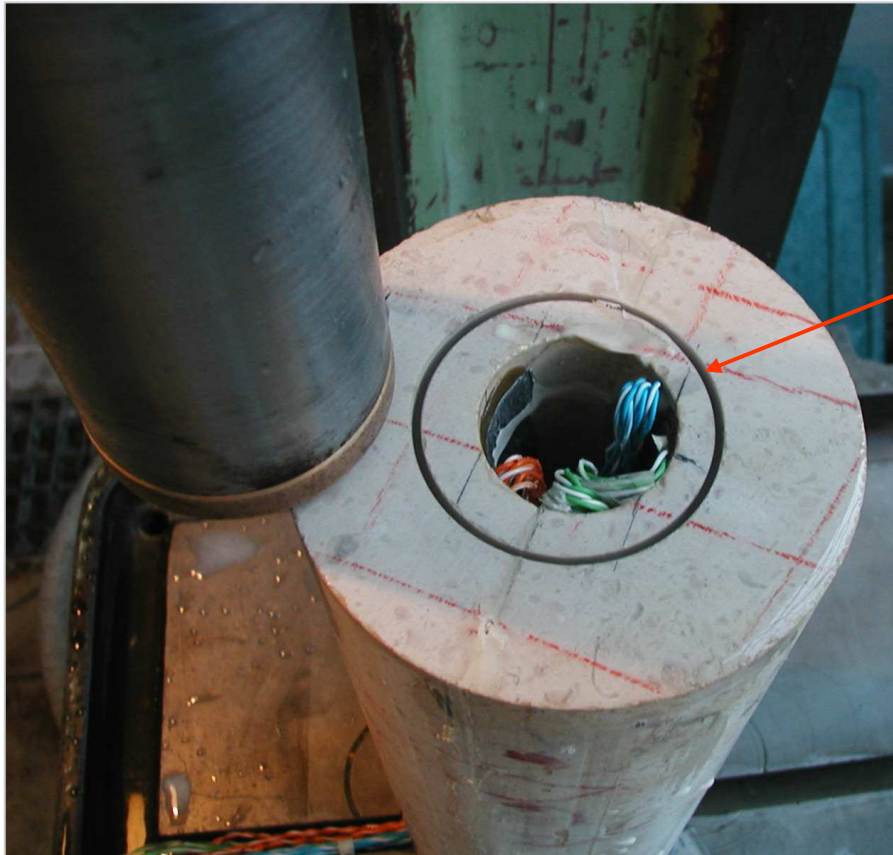
Roche poreuse,
perméable

- Eau liquide
- Eau gelée
- Pore non gelé
- Pore gelé
- Isotherme 0°C
- Migration d'eau
- Direction de propagation de l'isotherme 0°C



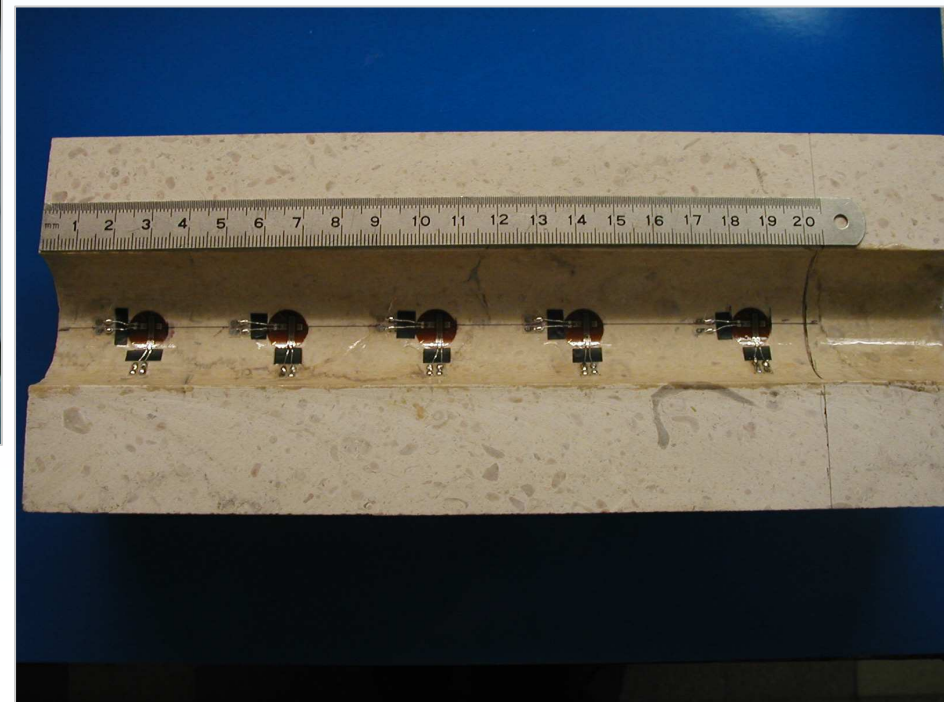
Modèle empirique de la contrainte générée

Dispositif expérimental



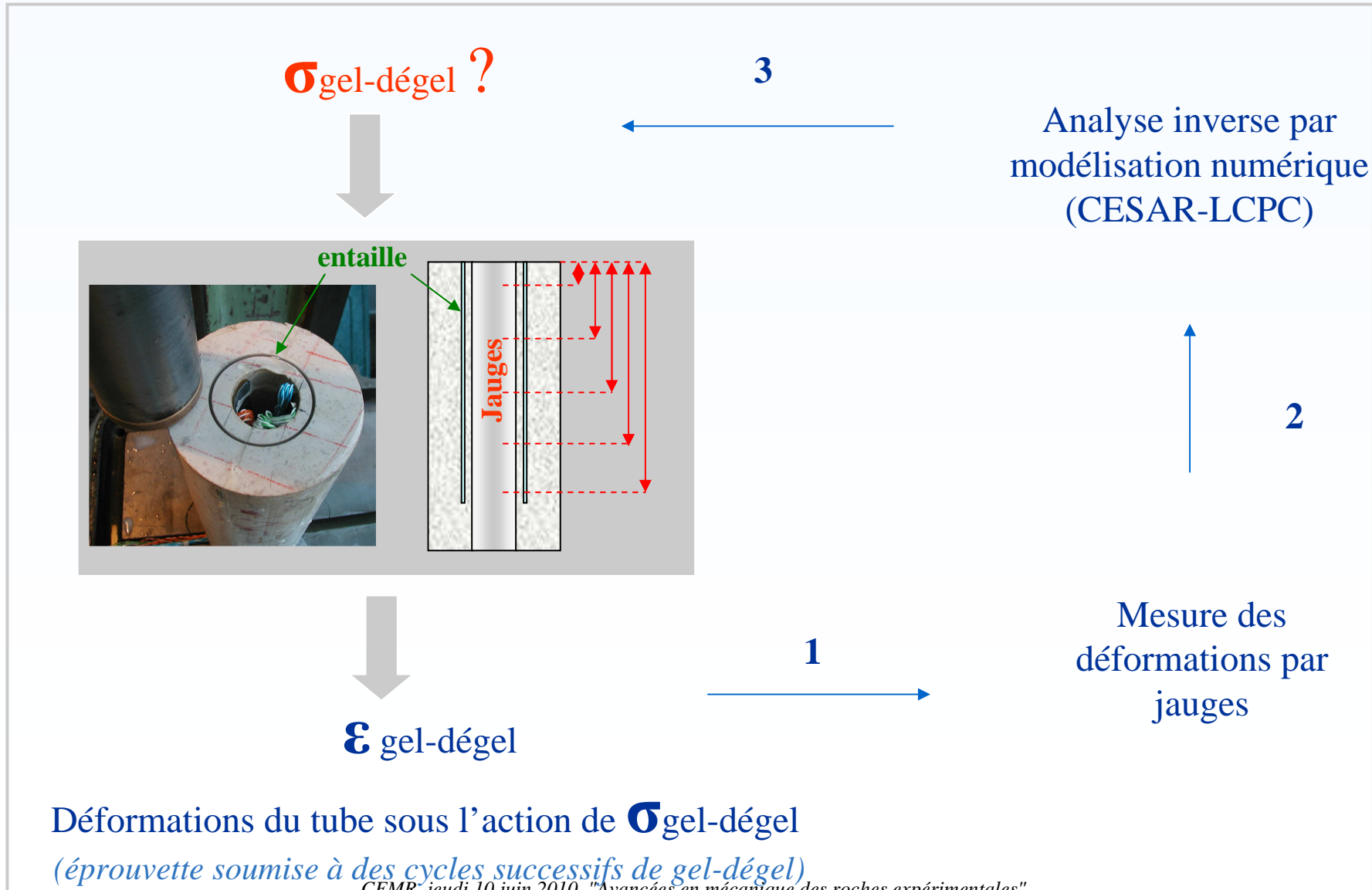
Entaille

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:

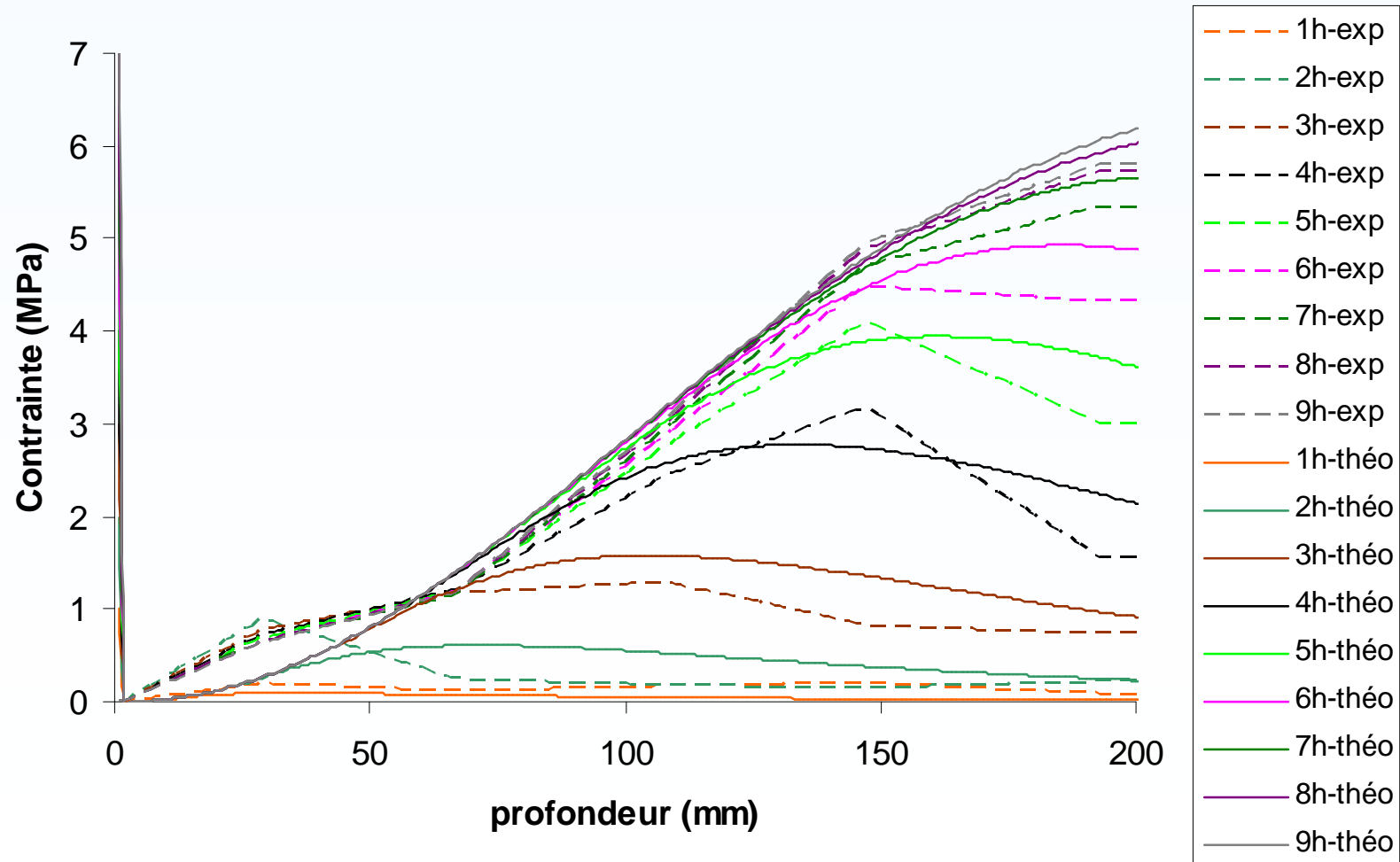
$$a(x) = a_1 \left[1 - \exp^{-\frac{x^2}{a_2}} \right]$$

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

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

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'

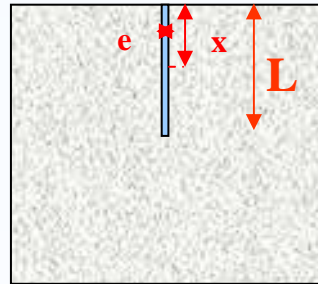
= contrainte à retenir en terme de gestion du risque

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

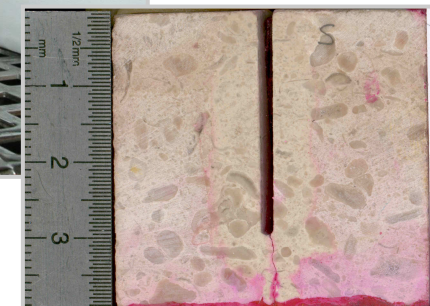
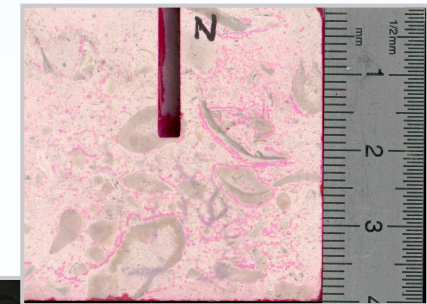
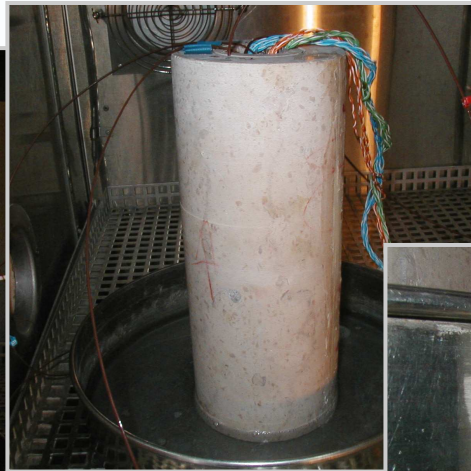
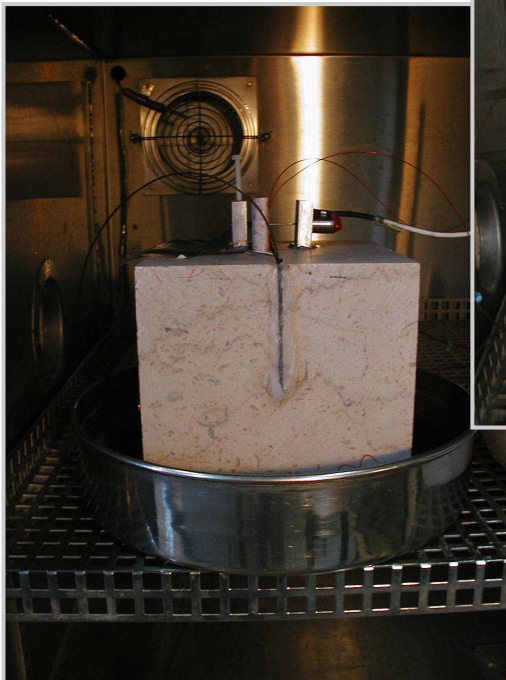
$$c(x) = \frac{c_1}{x^2}$$

Fonctions positives

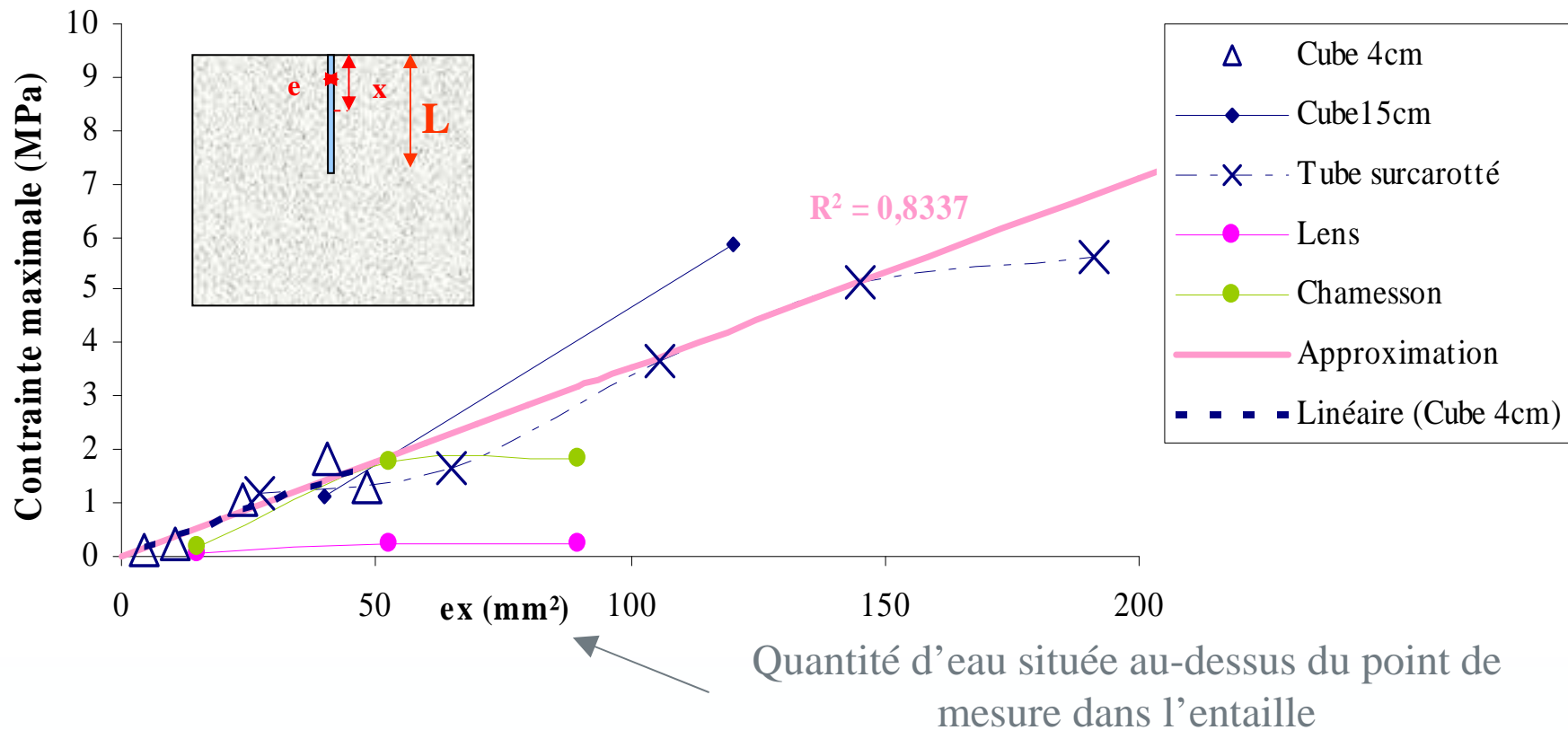
Étude de l'influence de la géométrie sur la contrainte générée par le gel



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



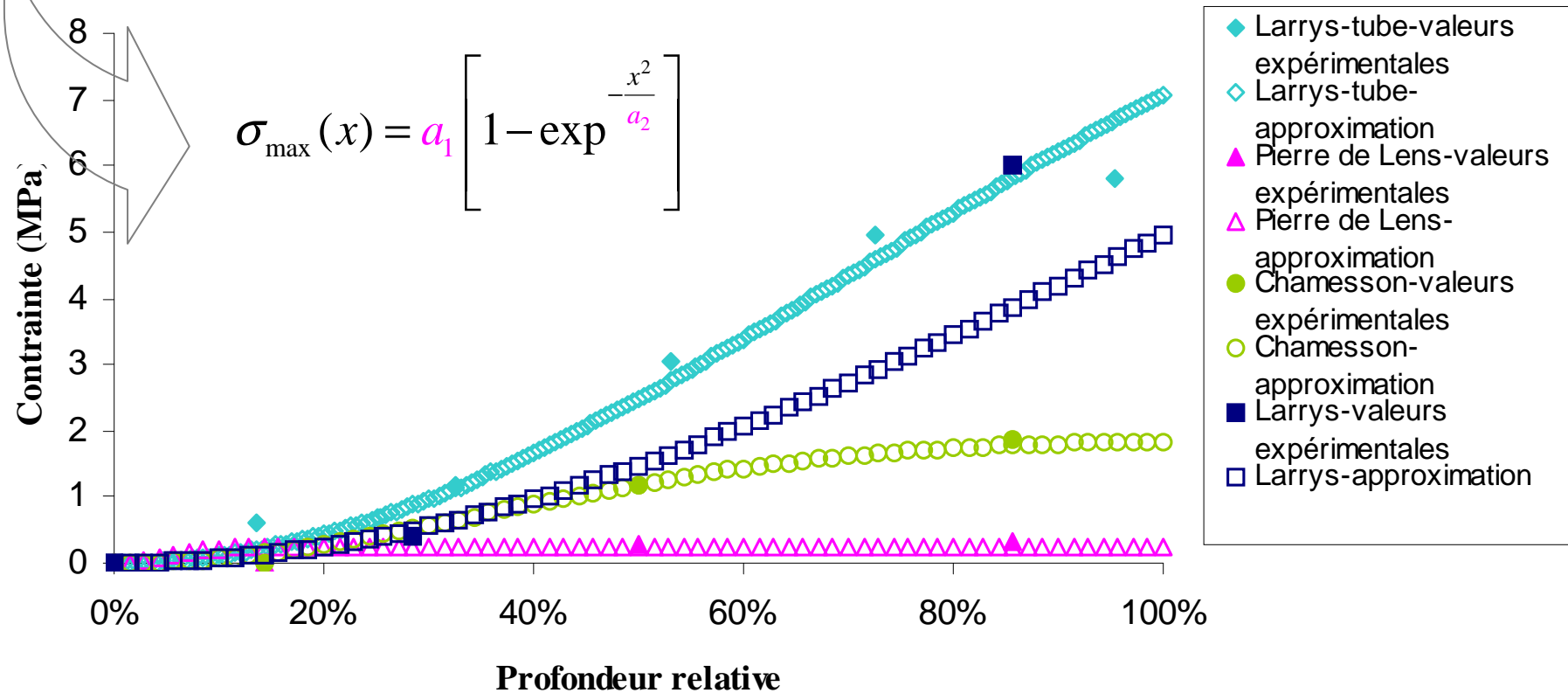
La contrainte maximale dépend de la géométrie de l'entaille



⇒ 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...**