



Comité Français de Mécanique des Sols
et de Géotechnique

Jubilé du Professeur François SCHLOSSER

EFFETS DE LA CHALEUR SUR LE COMPORTEMENT DES ROCHES ARGILEUSES

Pierre Delage
Ecole des ponts ParisTech
Laboratoire Navier/CERMES



*Thermal Impact on the Damaged Zone
Around a Radioactive Waste Disposal
in Clay Host Rocks*



ESV EURIDICE GIE

Remerciements

ANDRA, France

G. Armand, N. Conil, B. Gatmiri, J. Talandier

Euridice, Belgium

L.X. Li

Nagra, Switzerland

T. Vietor, S. Giger, B. Garitte

Projet européen TIMODAZ

F. Bernier, L.X. Li

Ecole des Ponts Navier/CERMES

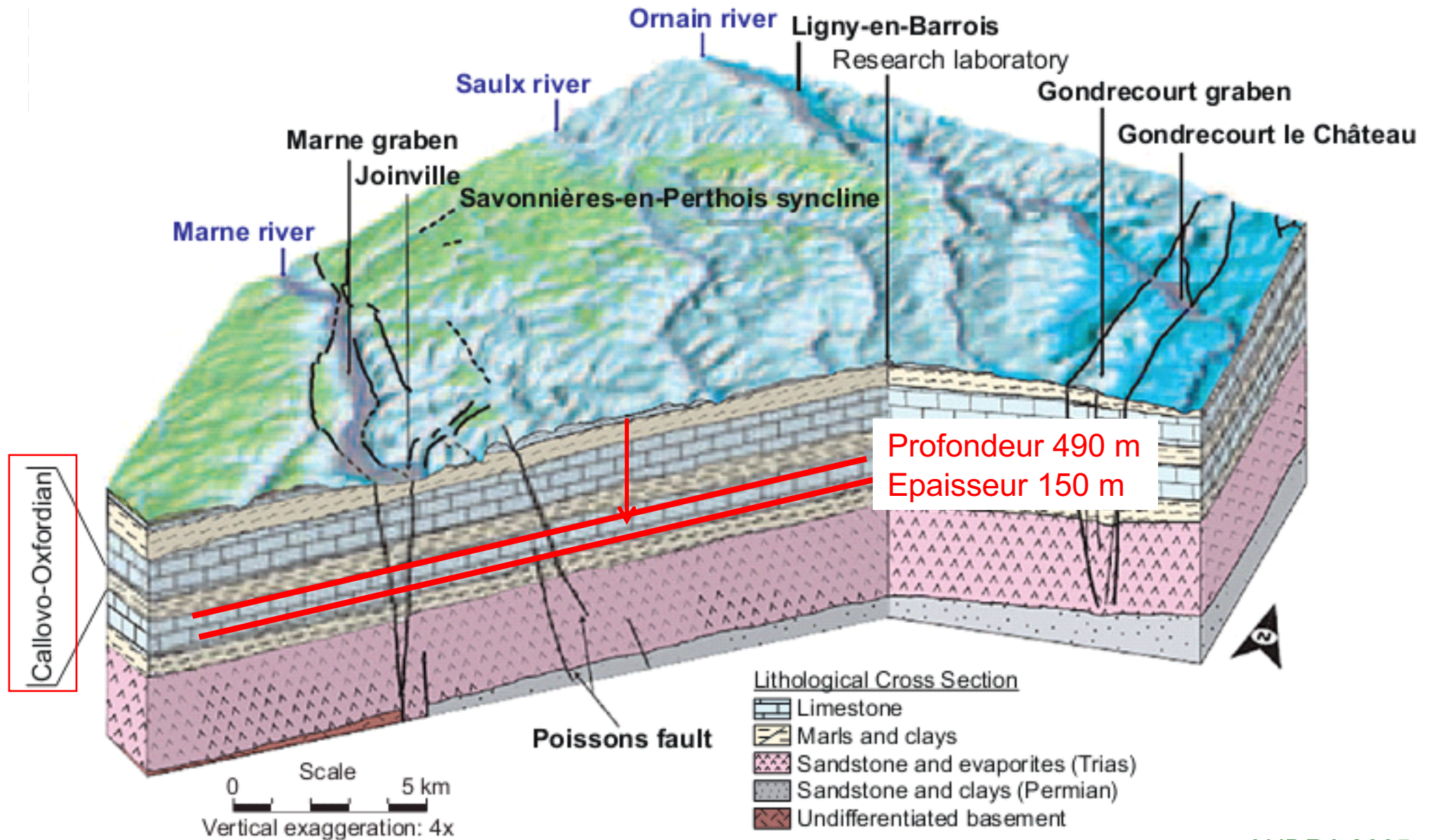
– *Drs Y.J. Cui, J. Sulem, A.M. Tang*

– *Drs M. Mohajerani, M. Monfared, H. Menaceur*

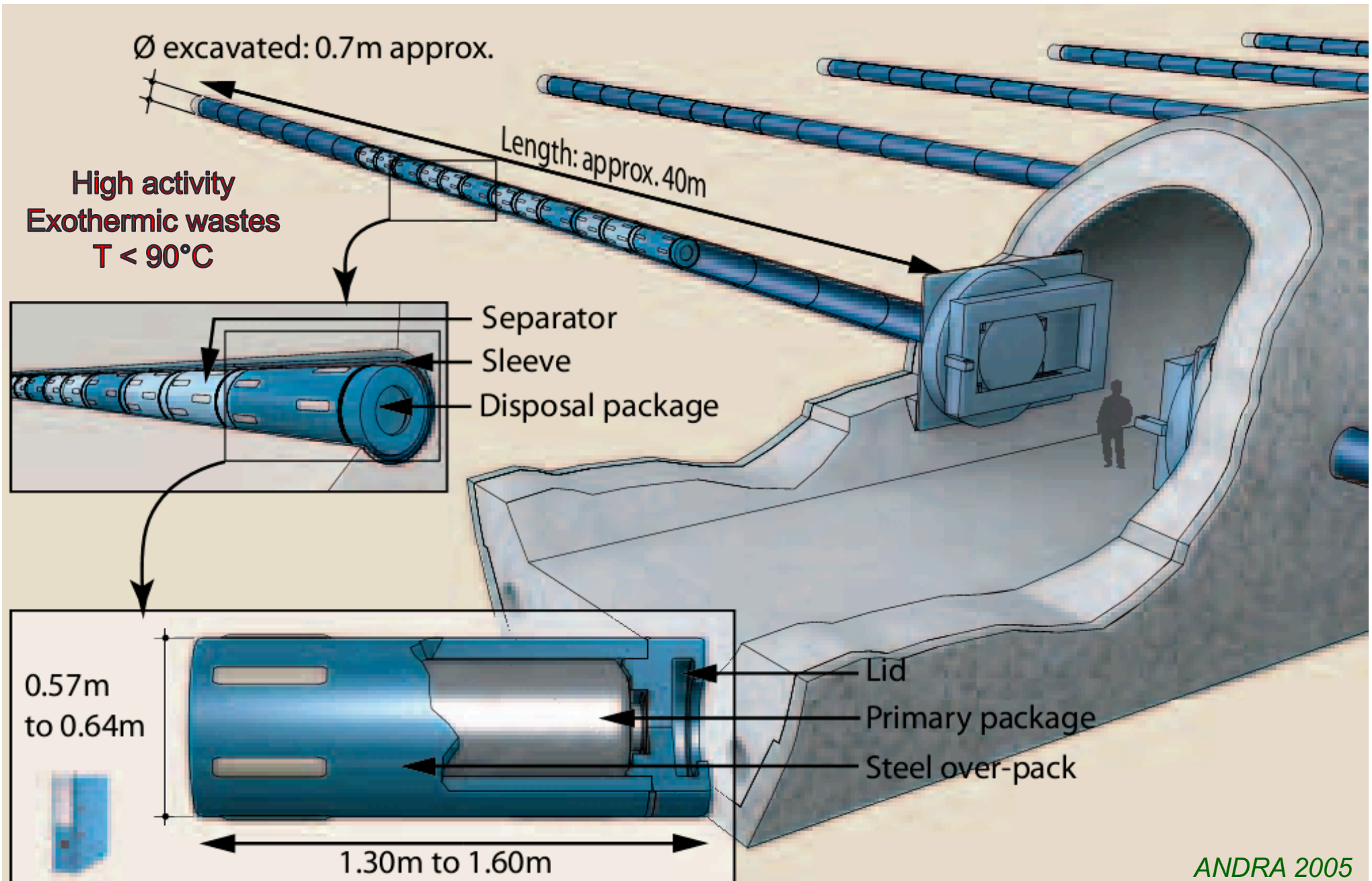
– *Post doc M. Wan*

– *Thèses en cours de M. Belmokhtar et Ph. Braun*

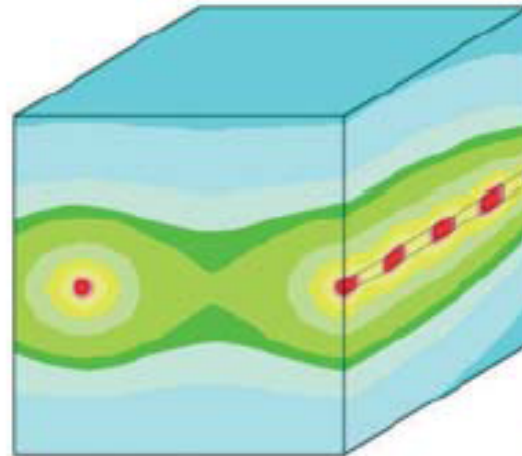
Argilite du Callovo-Oxfordien



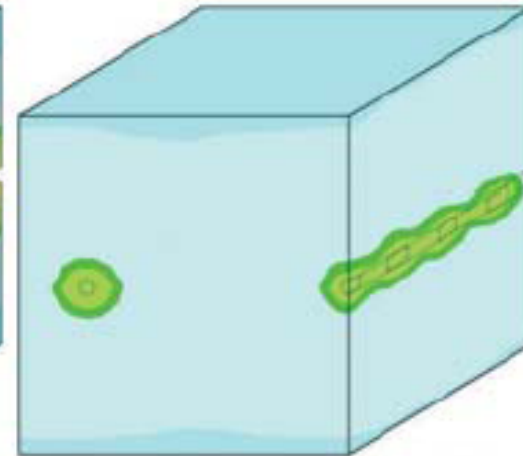
Stockage profond - 490m, concept français



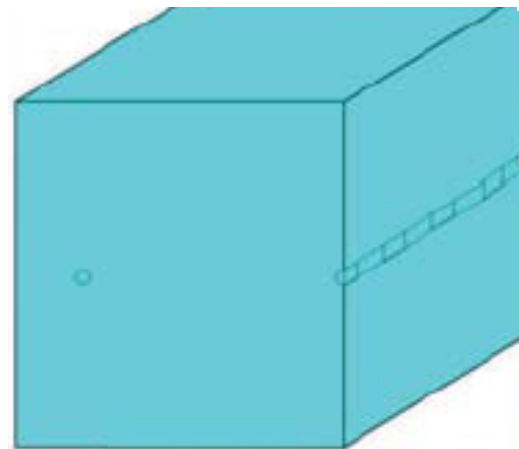
Phase thermique transitoire, concept français



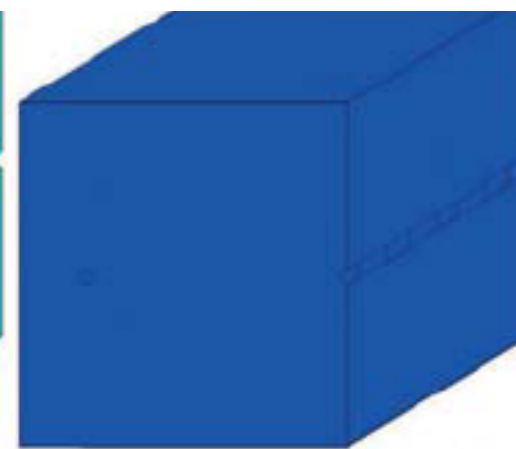
10 - 15 ans
Pic thermique à 90°C



1000 ans
Uniformité locale, 40-46°C

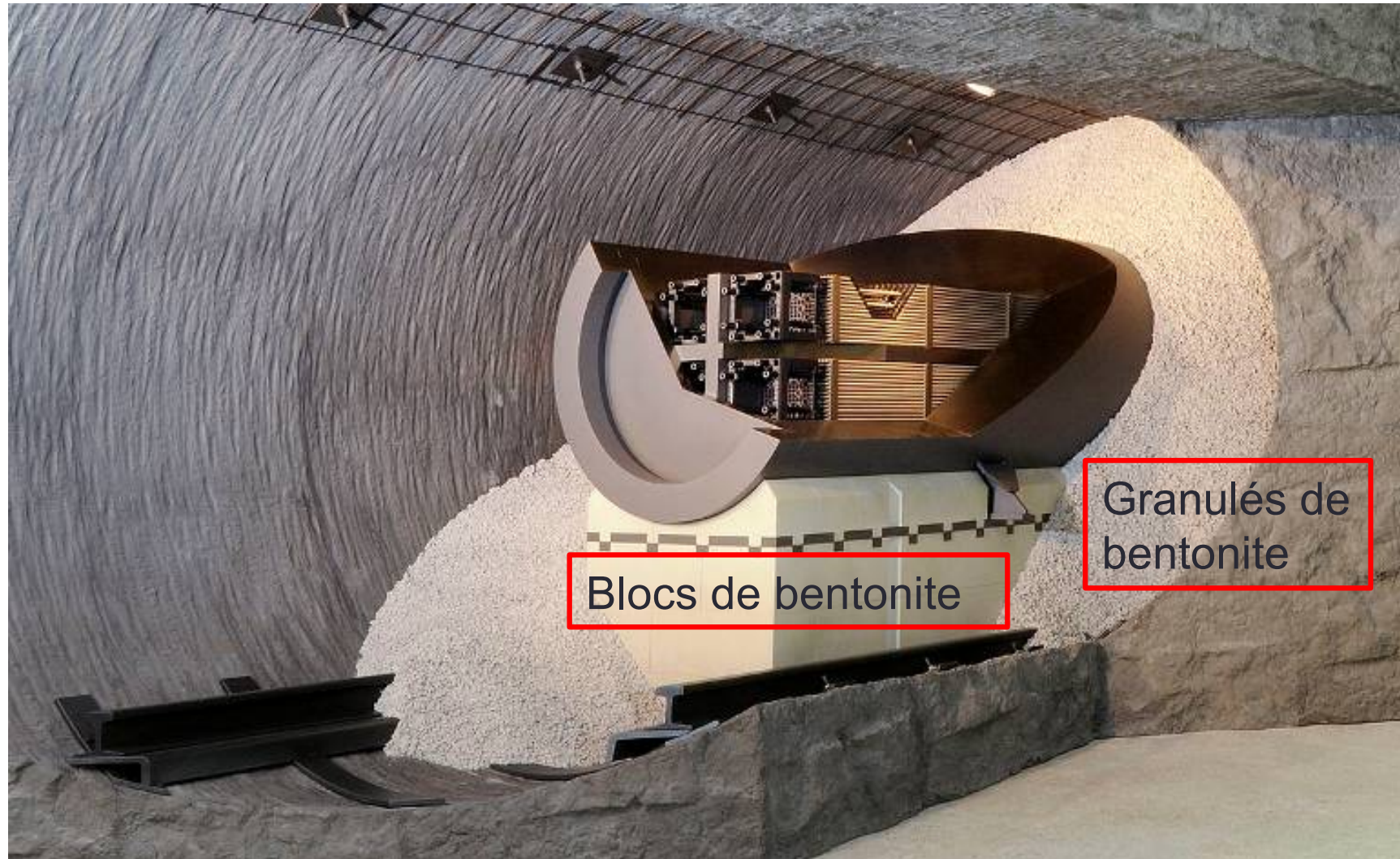


3000 ans
Uniformité globale, 30-35°C



50 000 ans
Retour à T initial

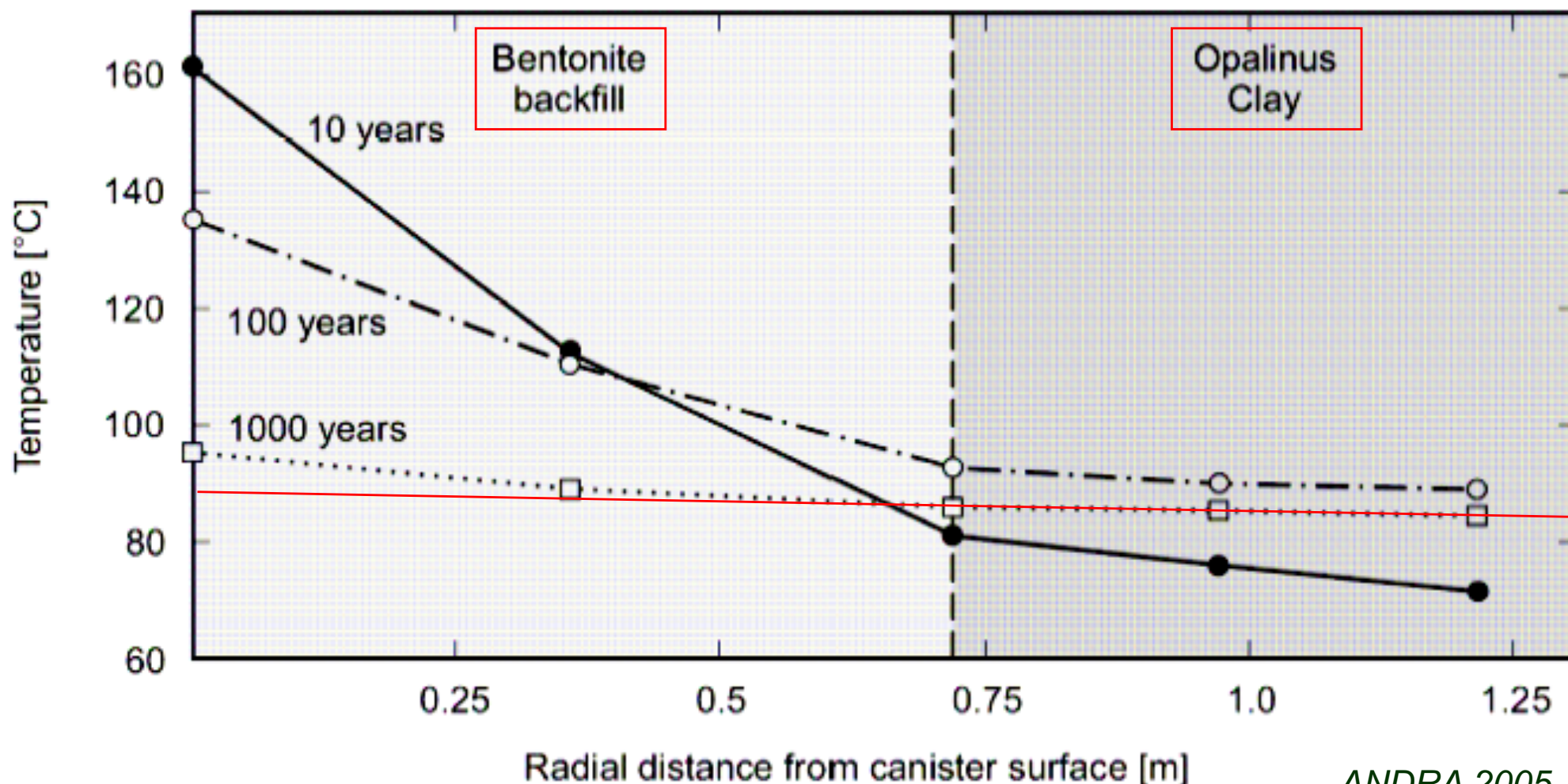
Concept suisse (Nagra)



Phase thermique transitoire, concept suisse

Températures plus fortes
dans la barrière ouvragée

Températures inférieures à
100°C dans la roche hôte



Argilites et argiles

	COX argillite	Opalinus clay	Boom clay
Dry density (g/cm ³)	2.21-2.33	2.22-2.33	1.61-1.78
Calcite content (%)	23 - 42	6 - 22	0 - 3
Porosity (%)	11-16	11-14	35-40
Water content (%)	<6.5	4 - 8	20-30
Clay content (%)	50-65	45-55	40-70
Liquid limit (%)	21-25	21-25	55-80
Plasticity index (%)	11-19	13-17	32-51
Young's modulus (GPa)	3.6-8.5	4-10	0.2-0.4
UCS (MPa)	10-16	8-22	2-2.8
Permeability (m/s)	.7-5x10 ⁻¹³	.5-5x10 ⁻¹³	2-5x10 ⁻¹²
Geological stage	Callovo- Oxfordian	Aalenian	Rupelian
(millions of years)	156-164	171-176	28.4-33.9

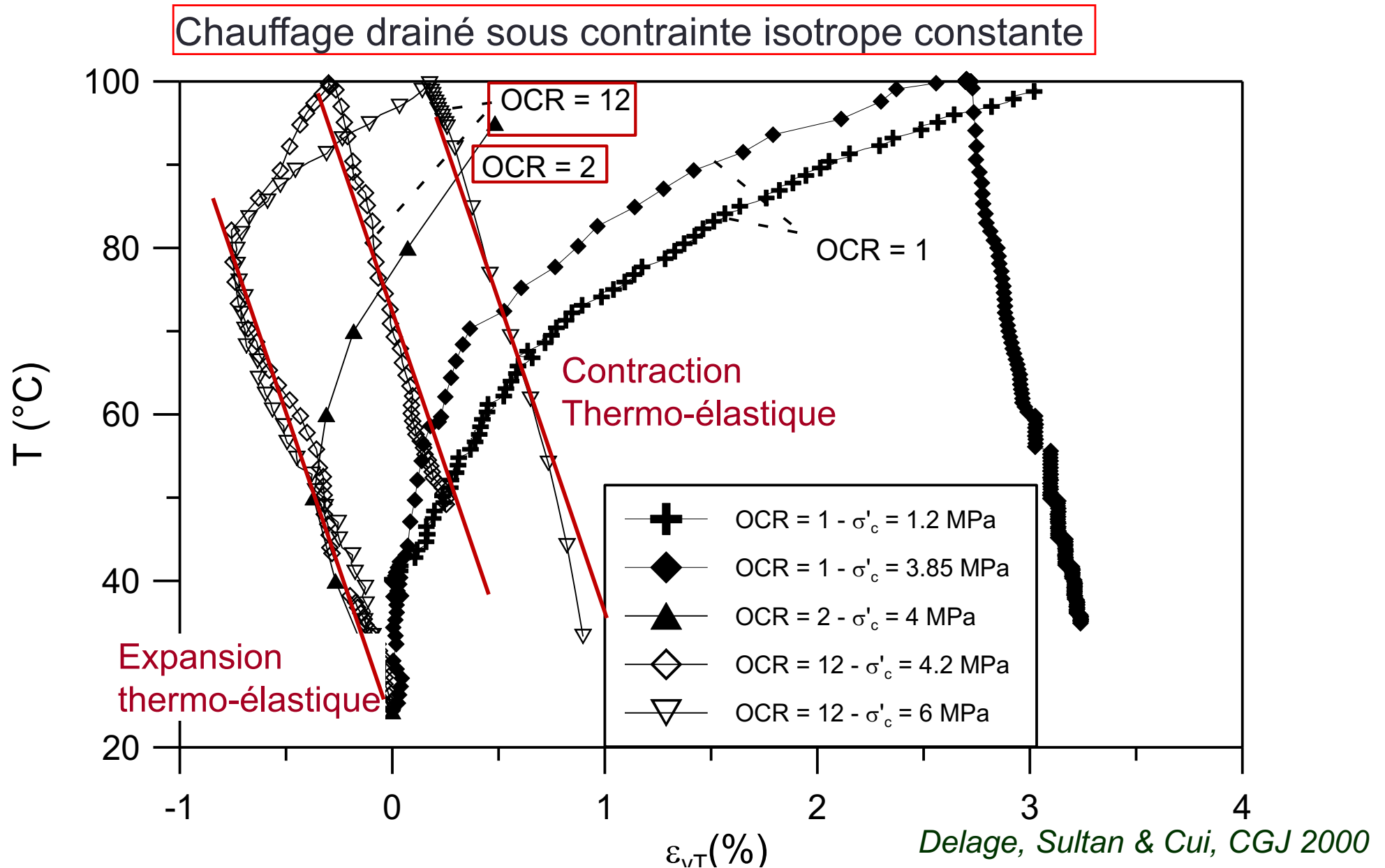
Argilites et argiles

	COX argillite	Opalinus clay	Boom clay
Dry density (g/cm ³)	2.21-2.33	2.22-2.33	1.61-1.78
Calcite content (%)	23 - 42	6 - 22	0 - 3
Porosity (%)	11-16	11-14	35-40
Water content (%)	<6.5	4 - 8	20-30
Interstratifiés illite-smectite (%)	50-65	45-55	40-70
Liquid limit (%)	21-25	21-25	55-70
Plasticity index (%)	11-16	13-17	15-20
Young's modulus (GPa)	3.6	4-10	0.2-0.4
UCS (MPa)	10-16	8-22	2-2.8
Permeability (m/s)	.7-5x10 ⁻¹³	.5-5x10 ⁻¹³	2-5x10 ⁻¹²
Geological stage	Callovo- Oxfordian	Aalenian	Rupelian
(millions of years)	156-164	171-176	28.4-33.9

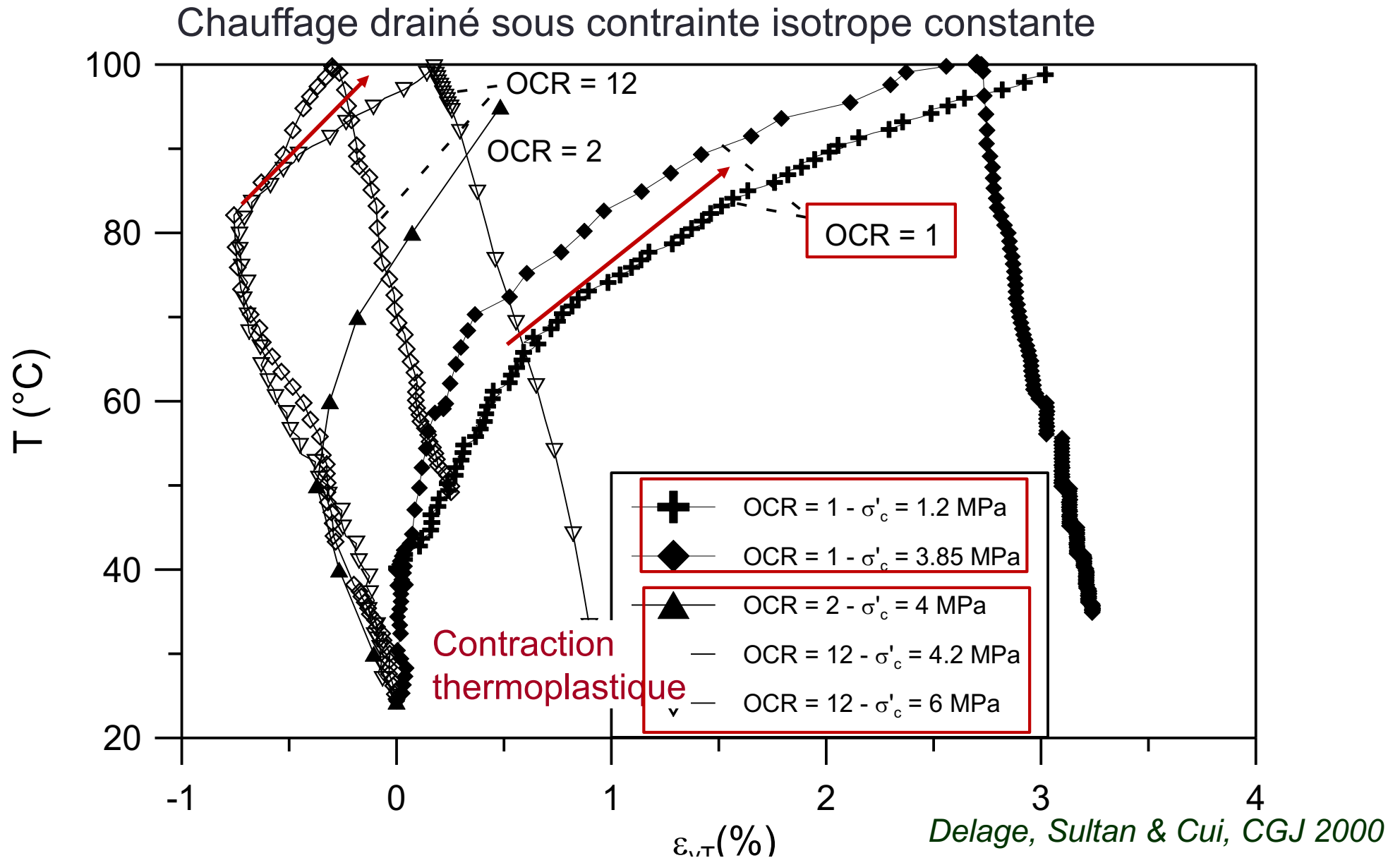
Roches argileuses

Argile (sol)

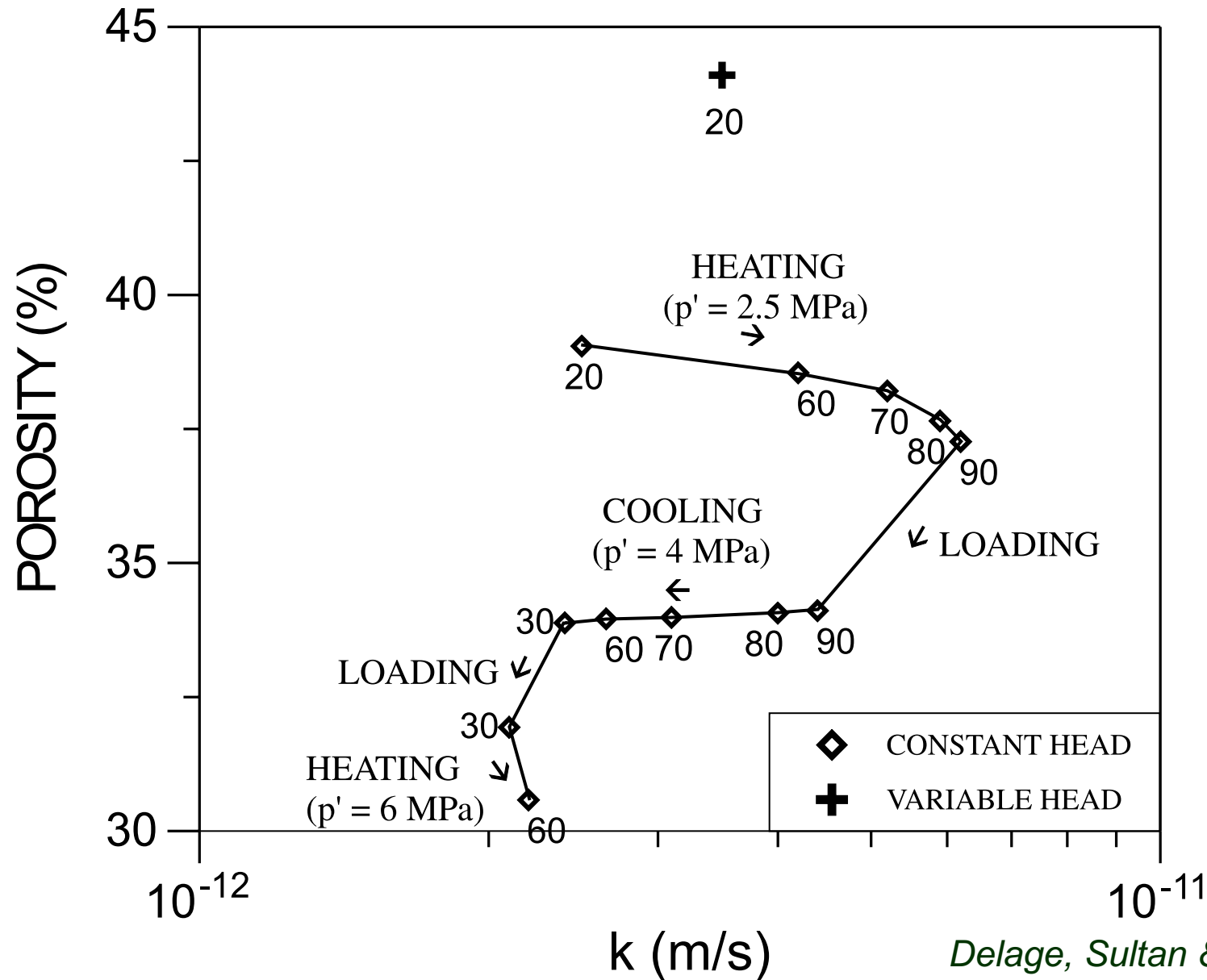
Argile de Boom, comportement volumique thermique



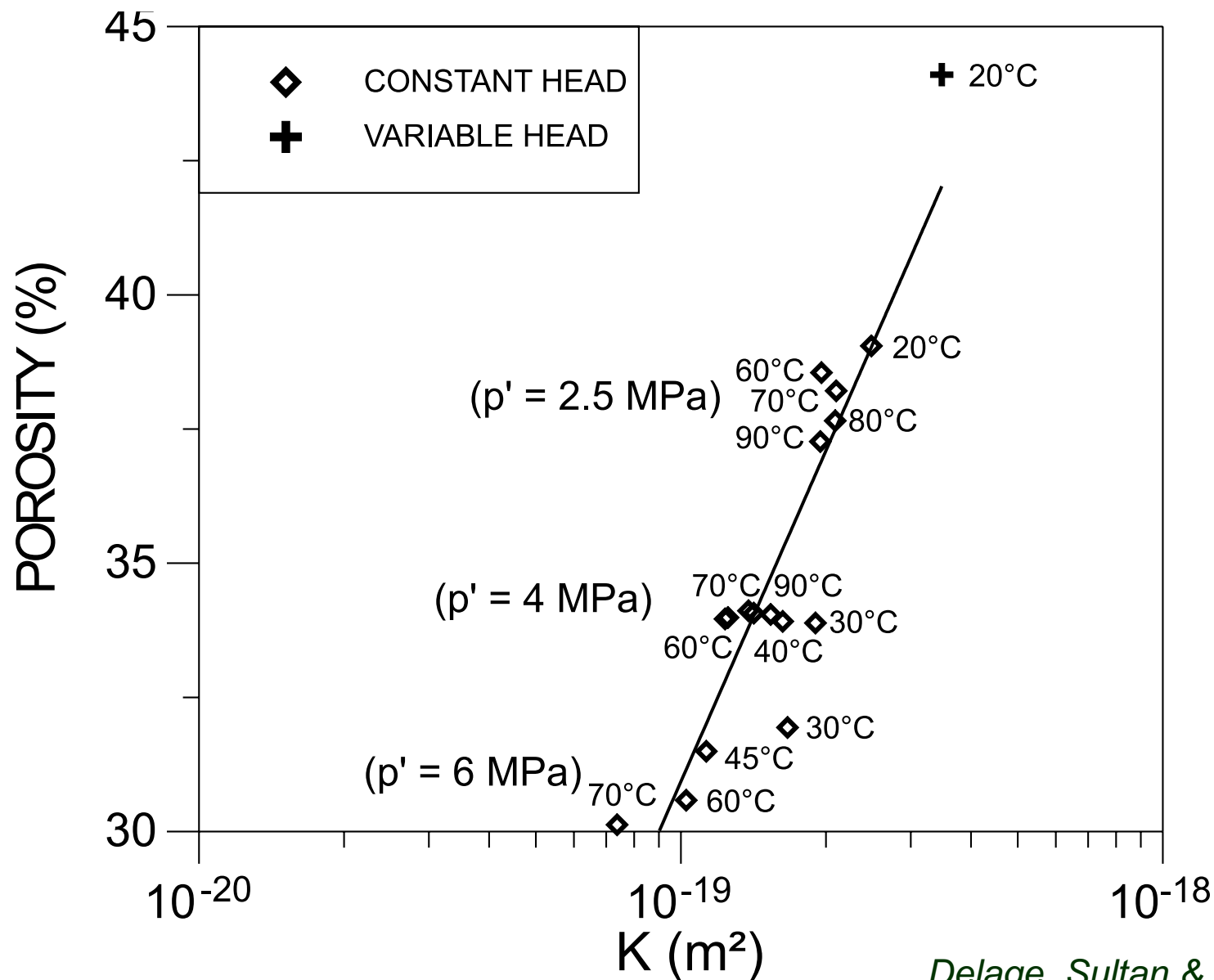
Argile de Boom, comportement volumique thermique



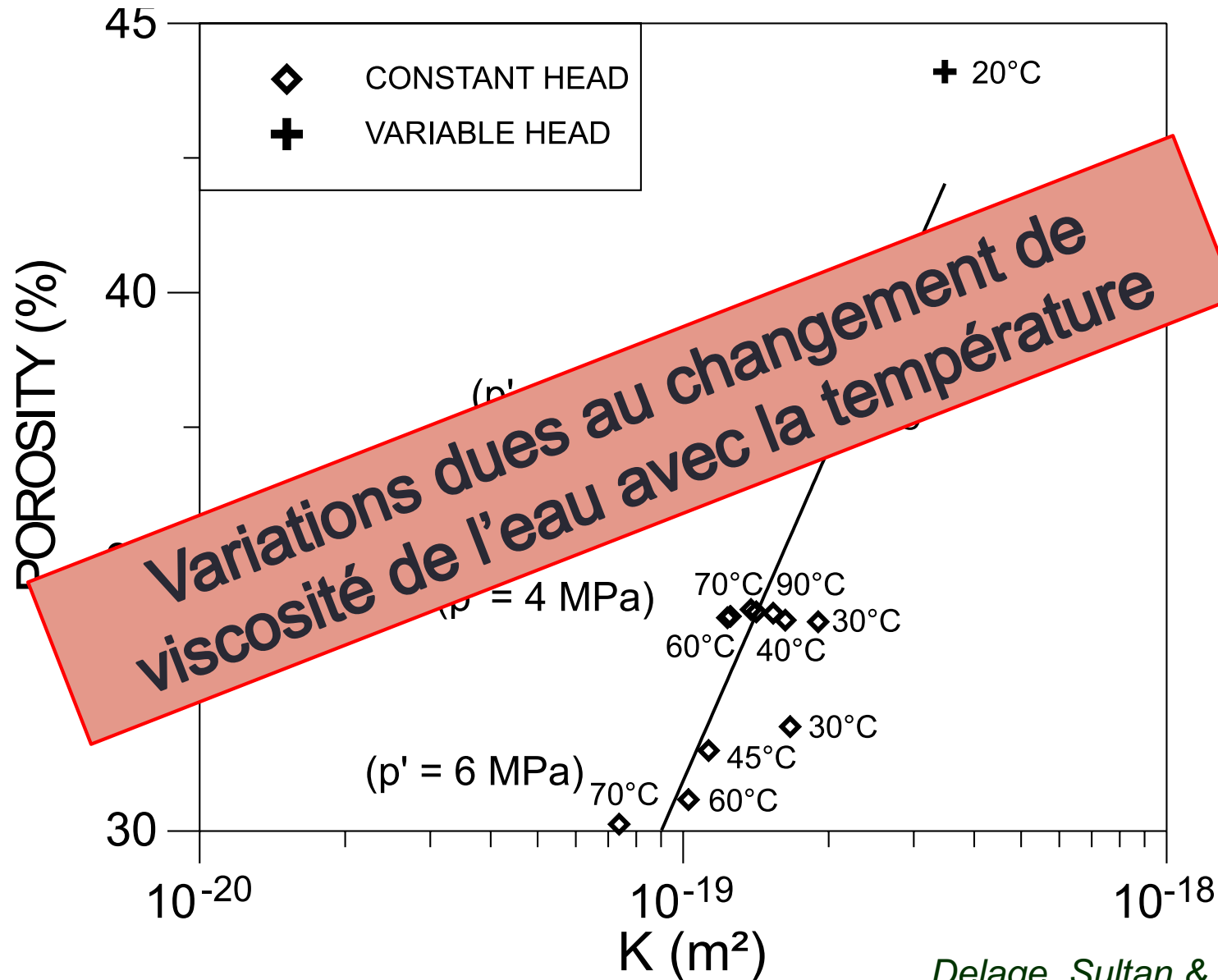
Argile de Boom, effet de la température sur la perméabilité



Argile de Boom, effet de la température sur la perméabilité intrinsèque



Argile de Boom, effet de la température sur la perméabilité intrinsèque



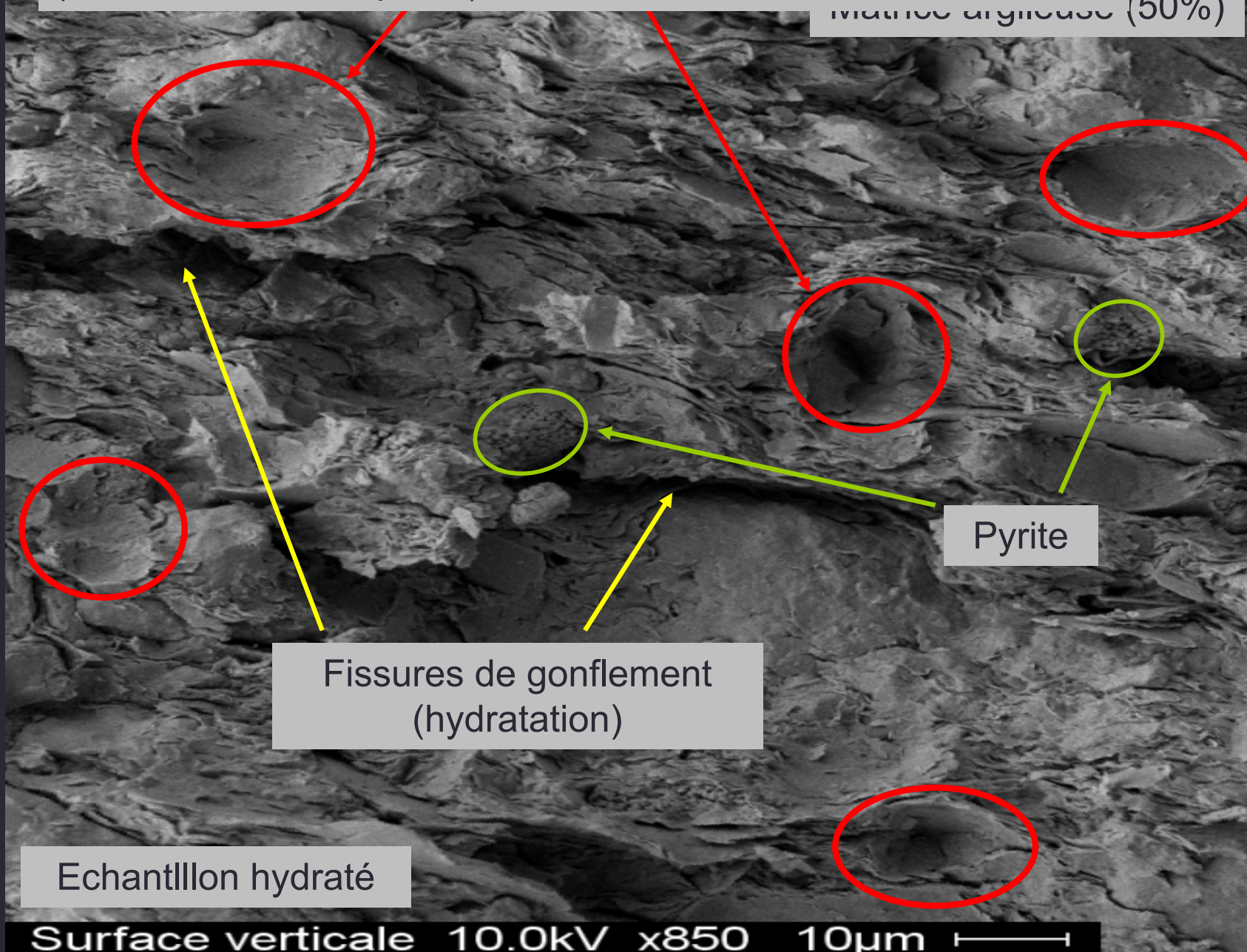
Argilite du Callovo Oxfordien

- Contexte géologique stable (155 My)
- Porosité: 14-19%
- Fraction argileuse 48-50% à 490m
- Très faible perméabilité: 10^{-13} – 10^{-14} m/s
- Faible deformabilité
- Bonne capacité de rétention des radionucléides

Mais Zone endommagée par l'excavation - EDZ

Arrachement de grains lors de la fracturation congelée
(25% calcite, 20% quartz)

matrice argileuse (50%)



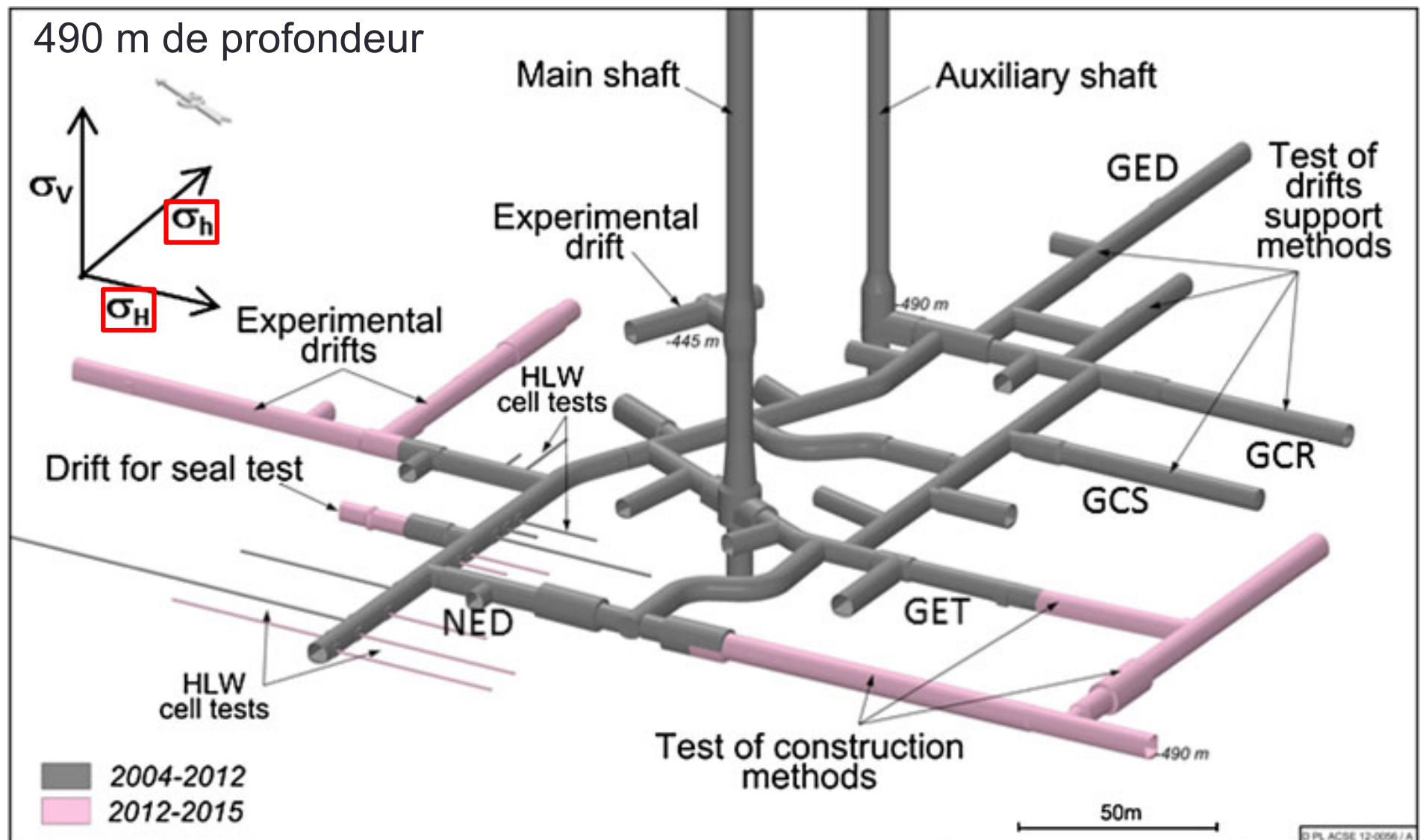
Pyrite

Fissures de gonflement
(hydratation)

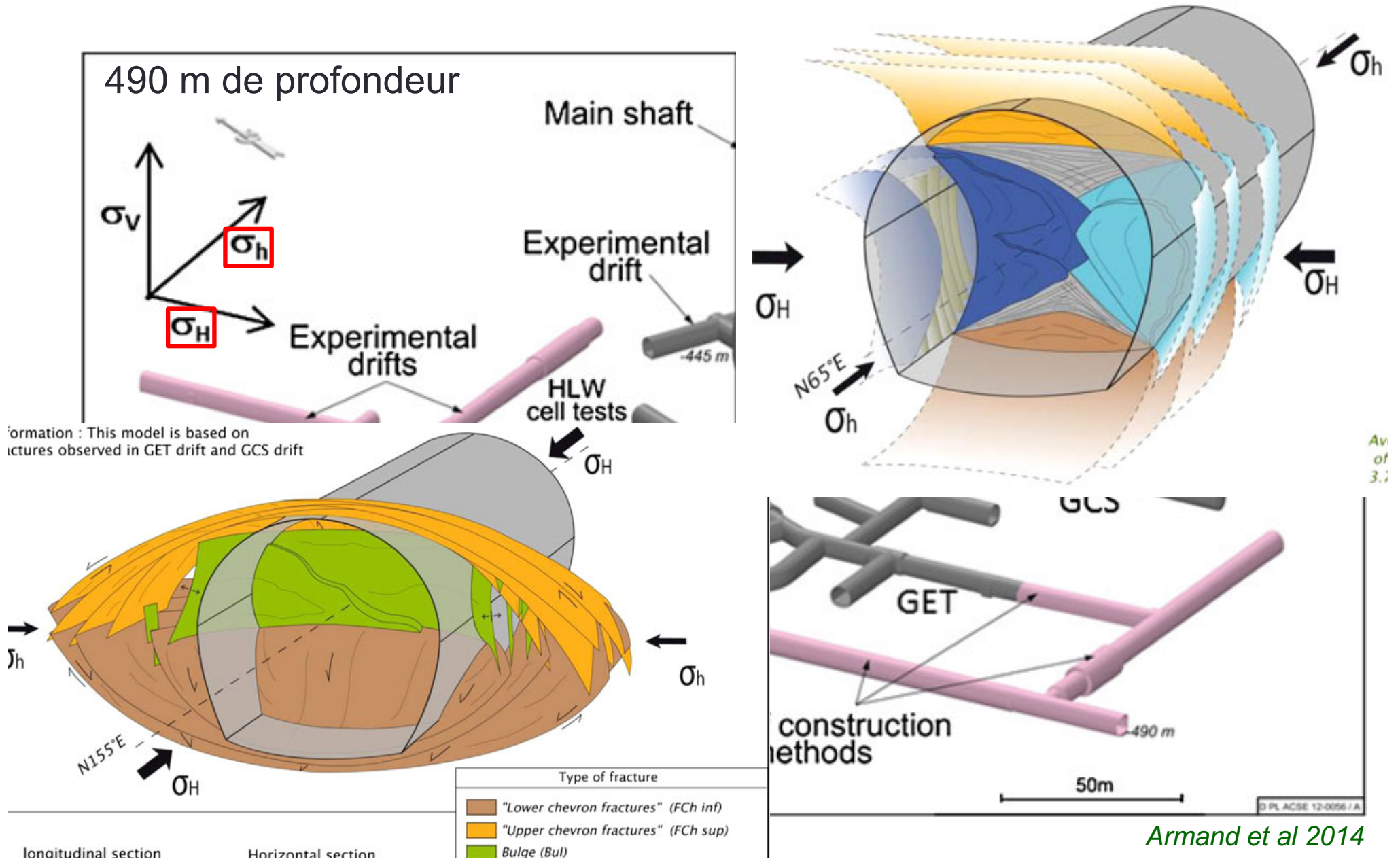
Echantillon hydraté

Surface verticale 10.0kV x850 10µm

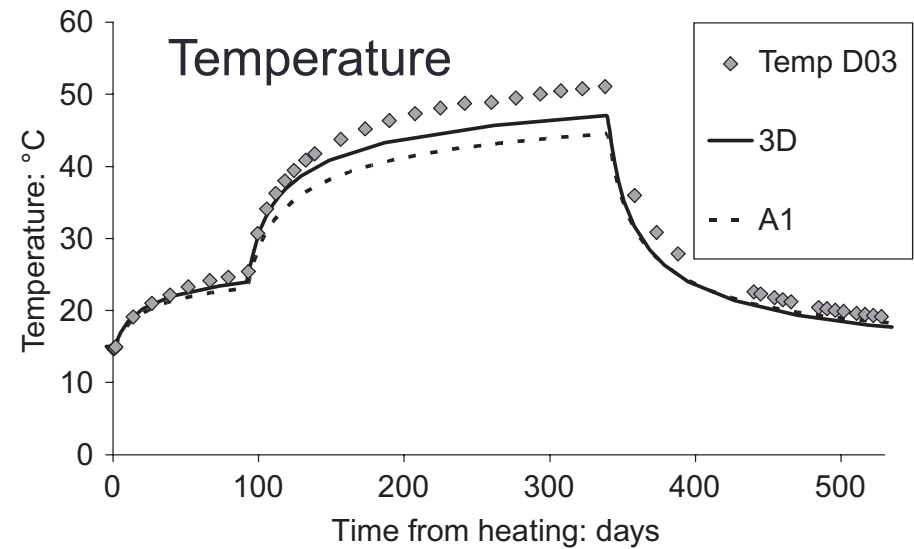
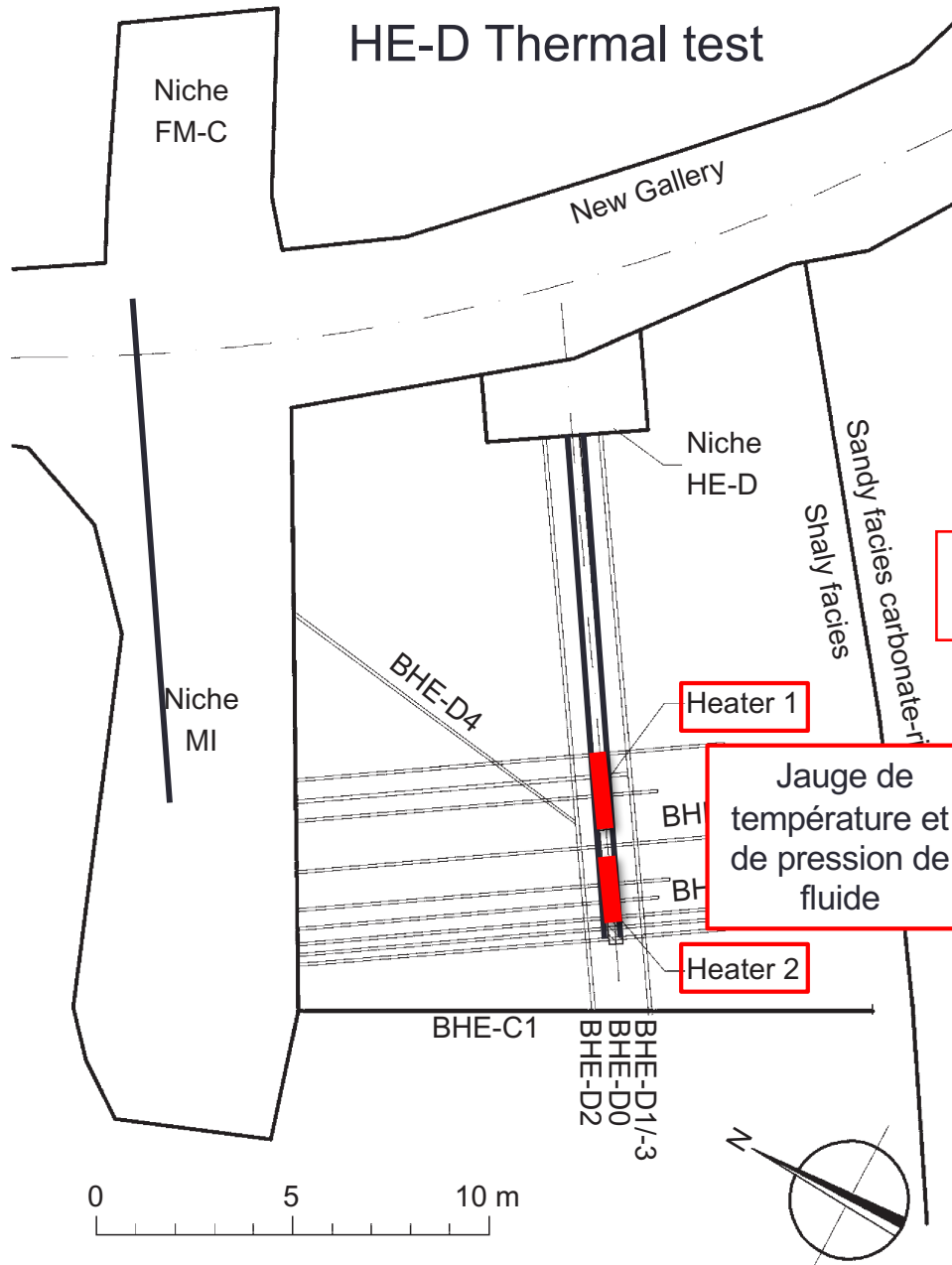
Laboratoire de recherche souterrain de l'Andra à Bure



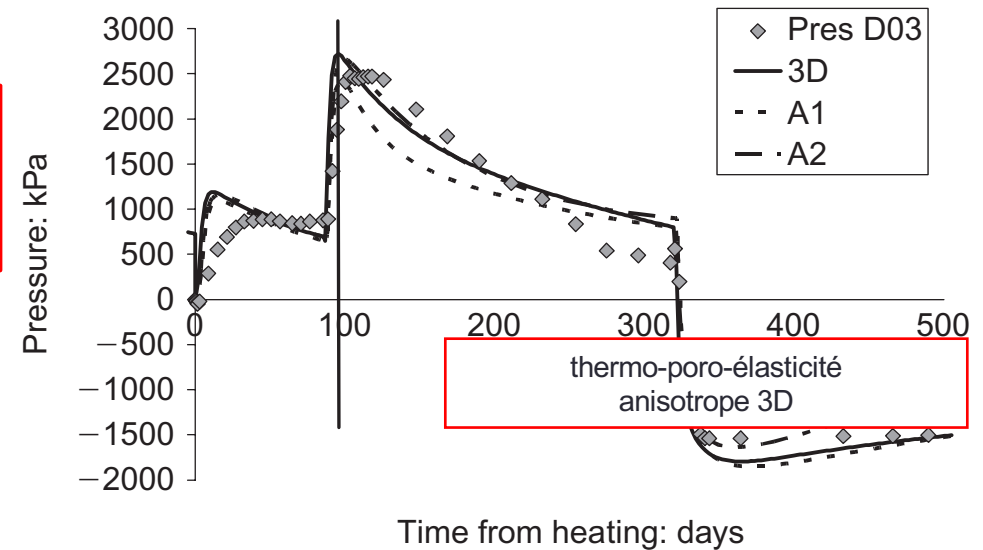
Laboratoire de recherche souterrain de l'Andra à Bure



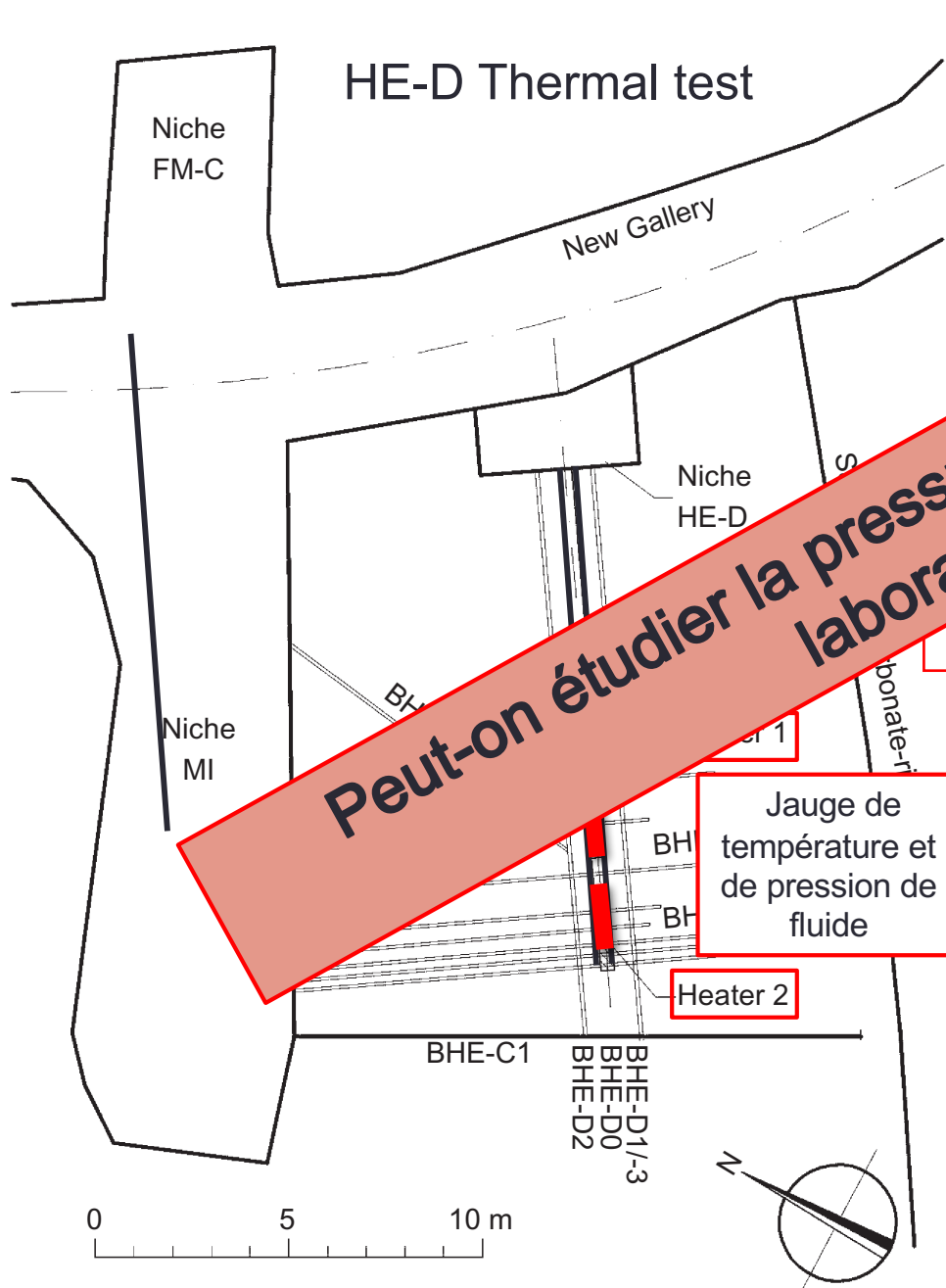
Expérimentations thermiques in-situ (Mt Terri, Suisse)



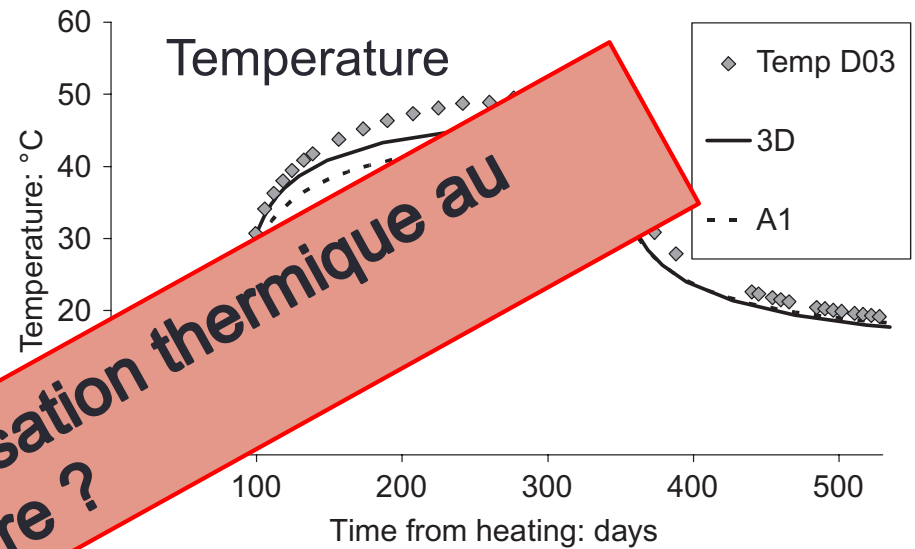
Suppression thermique
dilatation thermique de l'eau $\alpha_w \gg \alpha_s$ dilatation thermique du solide



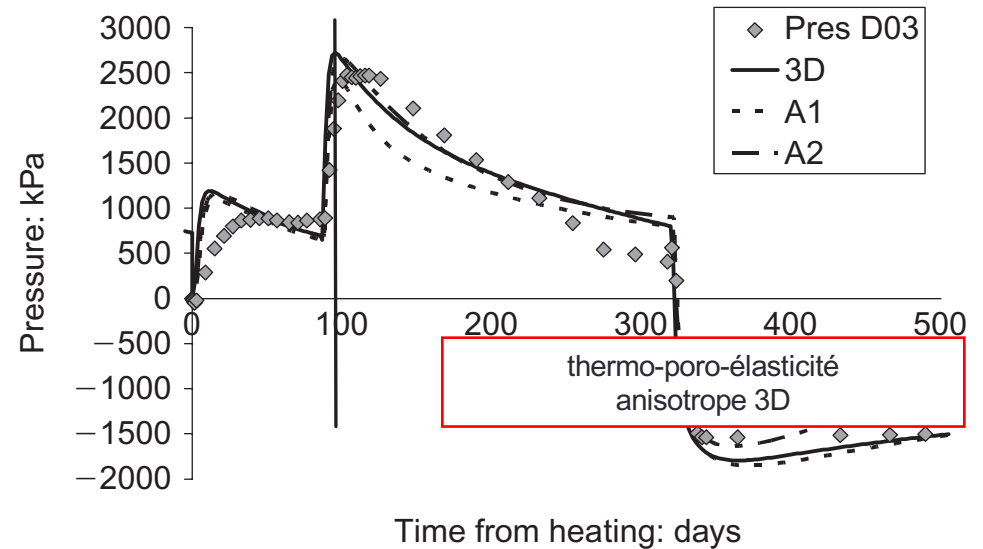
Expérimentations thermiques in-situ (Mt Terri, Suisse)



Peut-on étudier la pressurisation thermique au laboratoire ?



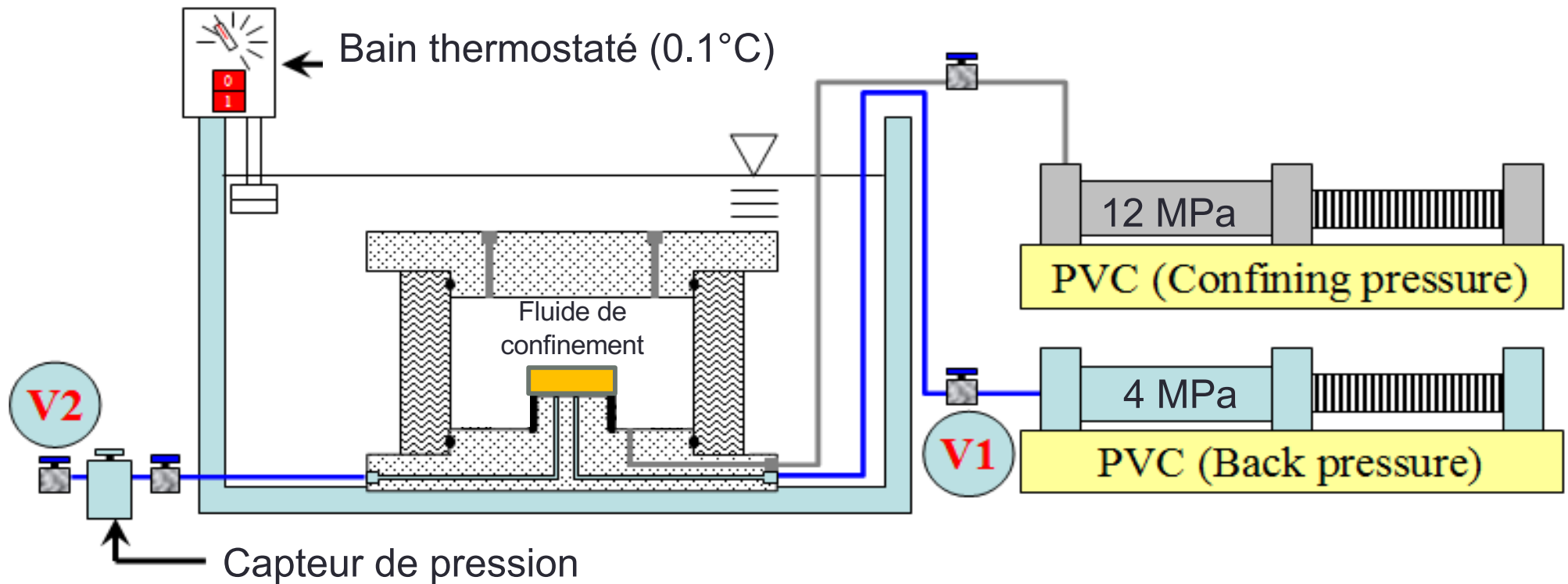
Surpression thermique
dilatation thermique de l'eau $\alpha_w \gg \alpha_s$ dilatation thermique du solide



thermo-poro-élasticité
anisotrope 3D

Pressurisation thermique en labo

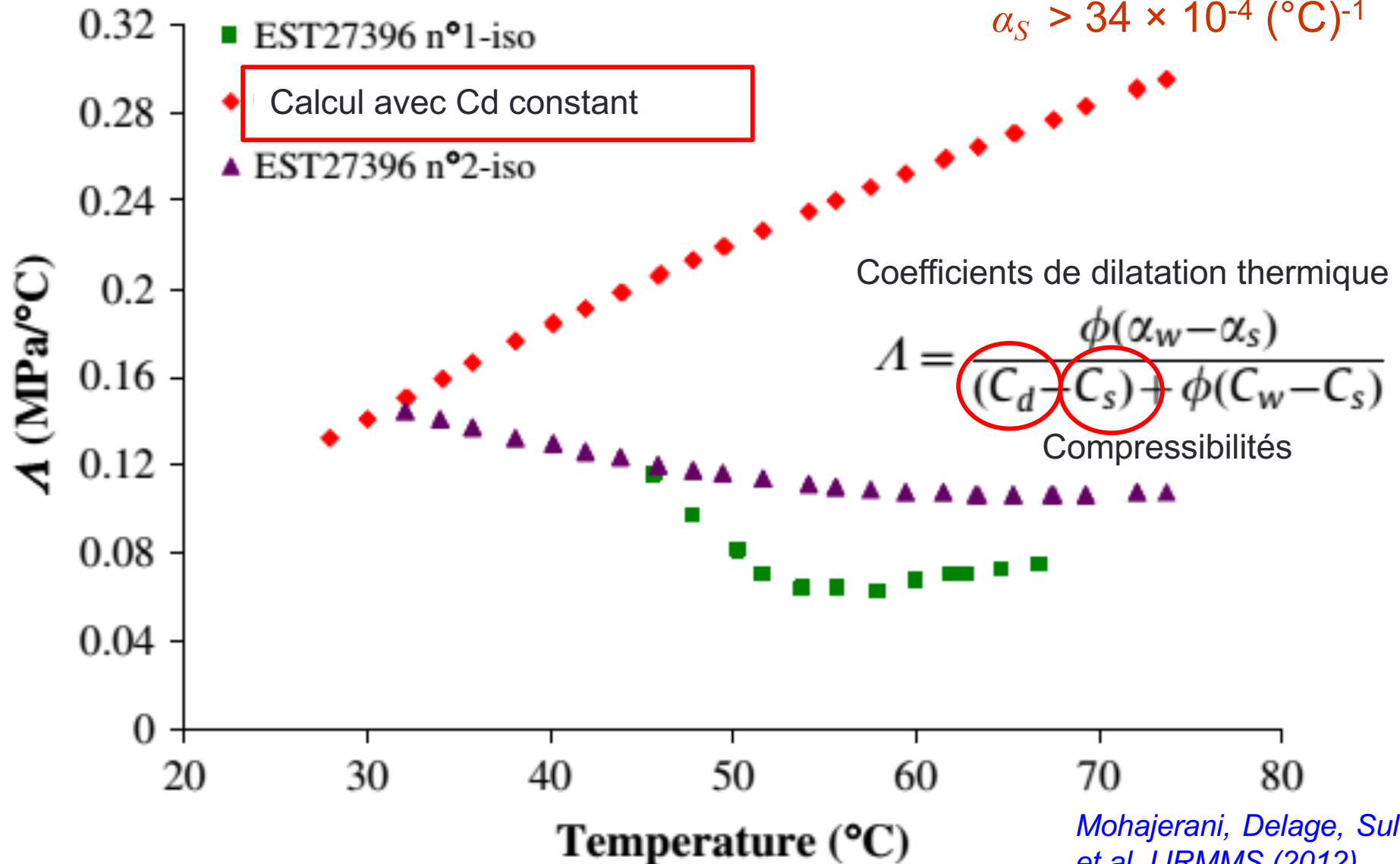
Chauffage non drainé sous contrainte in-situ avec mesure de pression interstitielle



Coefficient de pressurisation thermique Λ , argilite du COx

$$\alpha_w = 2.7 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$$

$$\alpha_s > 34 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$$



Triaxial à cylindre creux TIMODAZ

Diamètre externe 100 mm

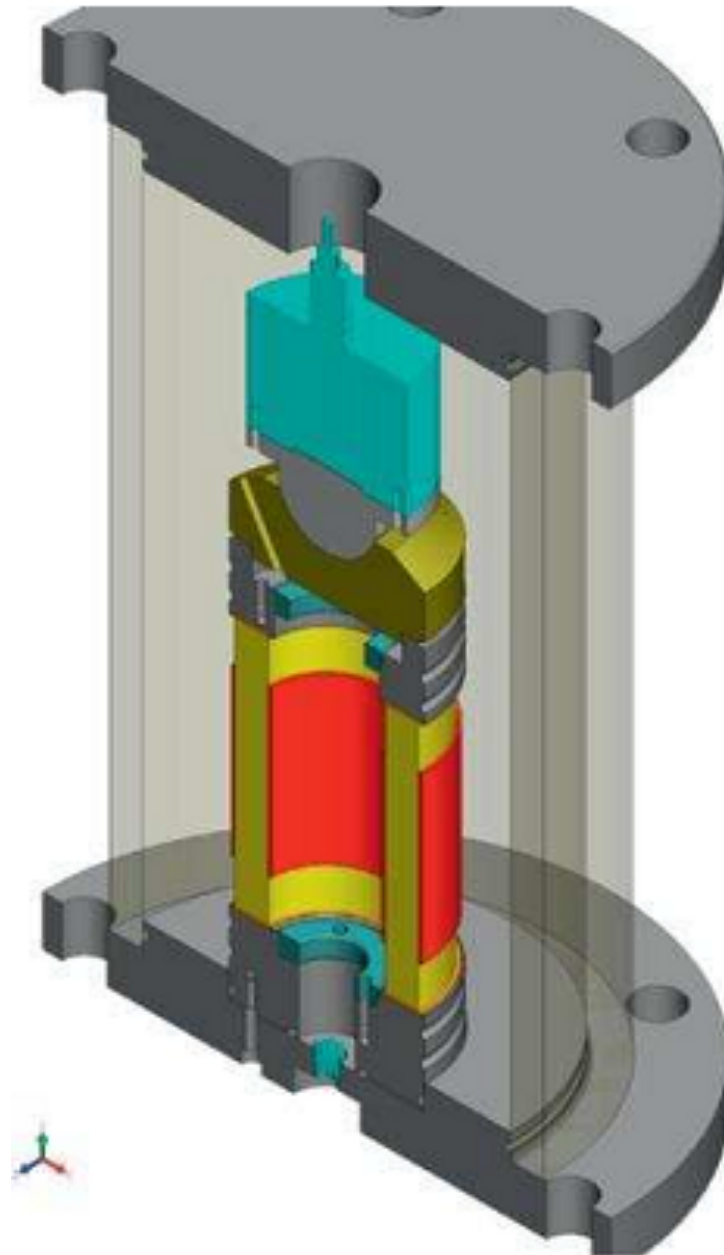
Diamètre interne 60 mm

Hauteur 70 mm

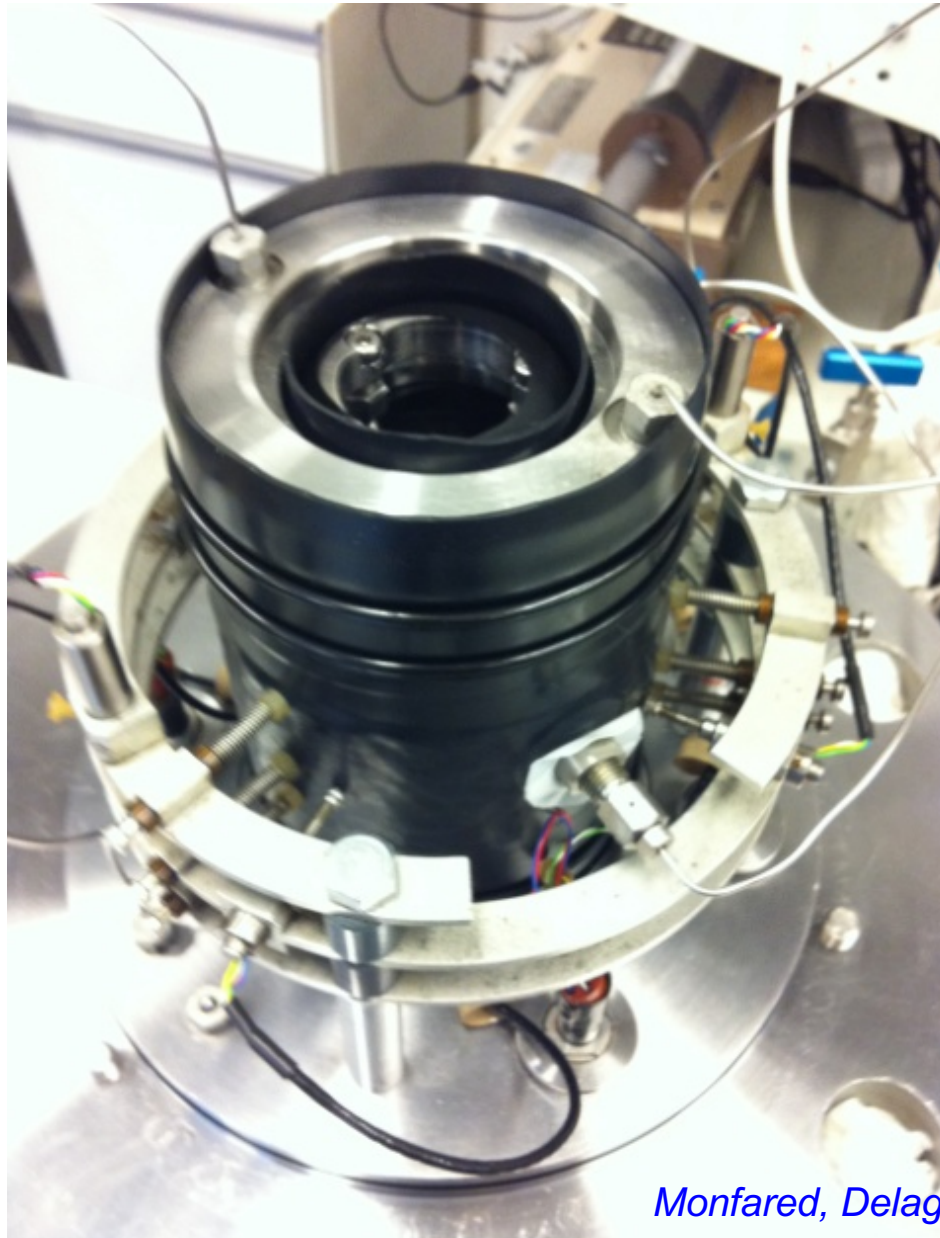
Pression interne et externe égales

Drainage en haut, bas et latéral

Longueur de drainage $H = 10$ mm
(demi épaisseur du cylindre creux)



Mesures locales de déformations

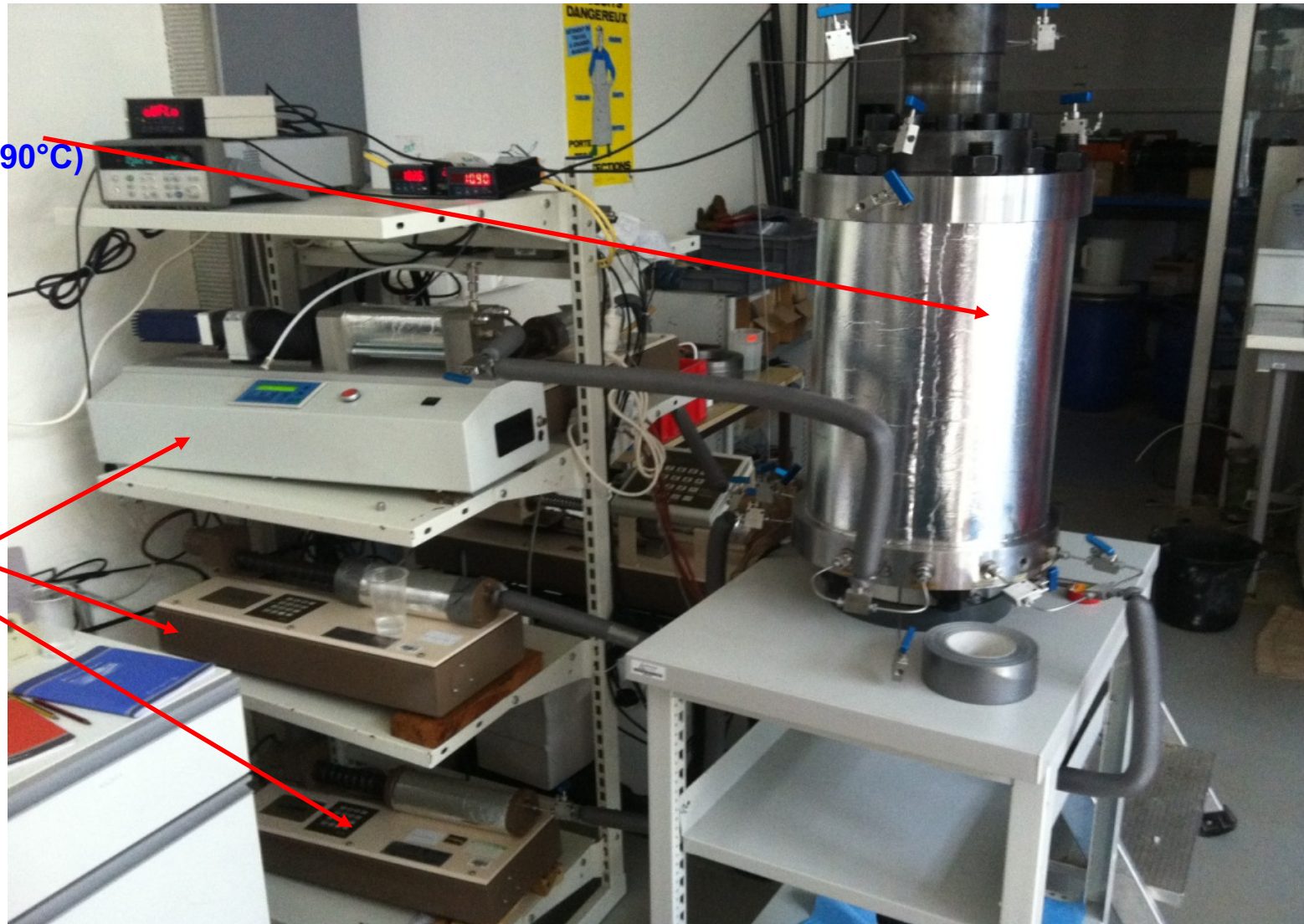


Monfared, Delage, Sulem et al. IJRMMS (2011)

Dispositif

Système de
chauffage (90°C)

Contrôleurs
pression
volume



Ecrouissage thermique de l'argile à Opalinus

Contraintes in-situ Opalinus

Confinement = 4.1 MPa

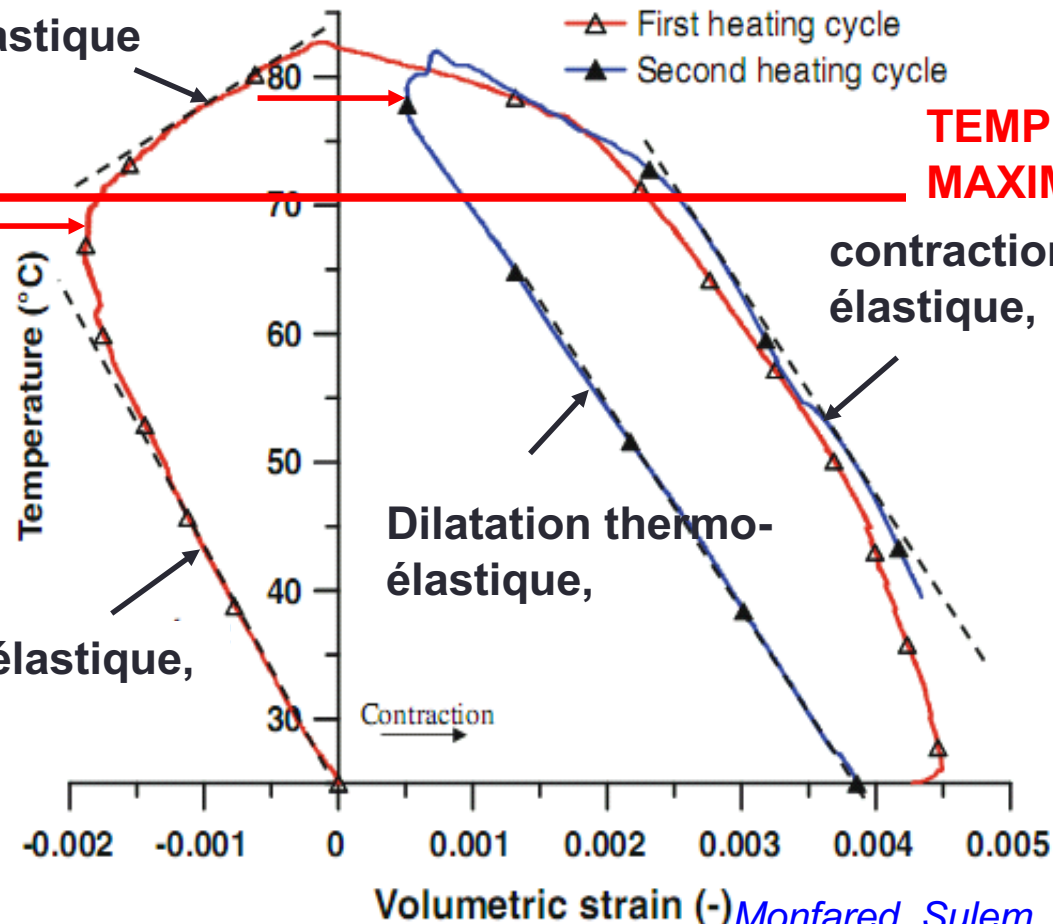
Pressure de pore = 2.2 MPa

Chauffage drainé, 1°C/h

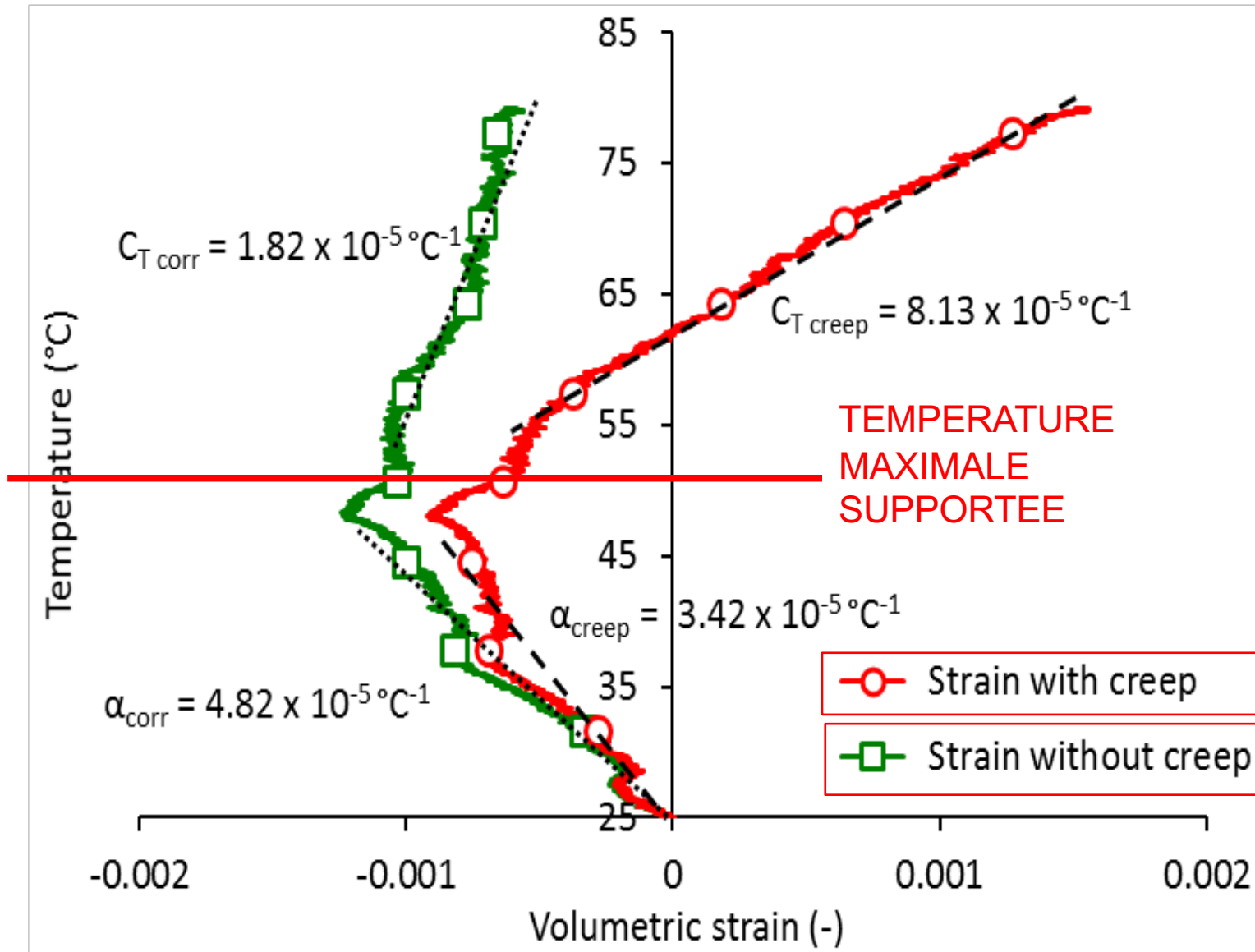
Contraction thermo-
plastique

Ecrouissage
thermique

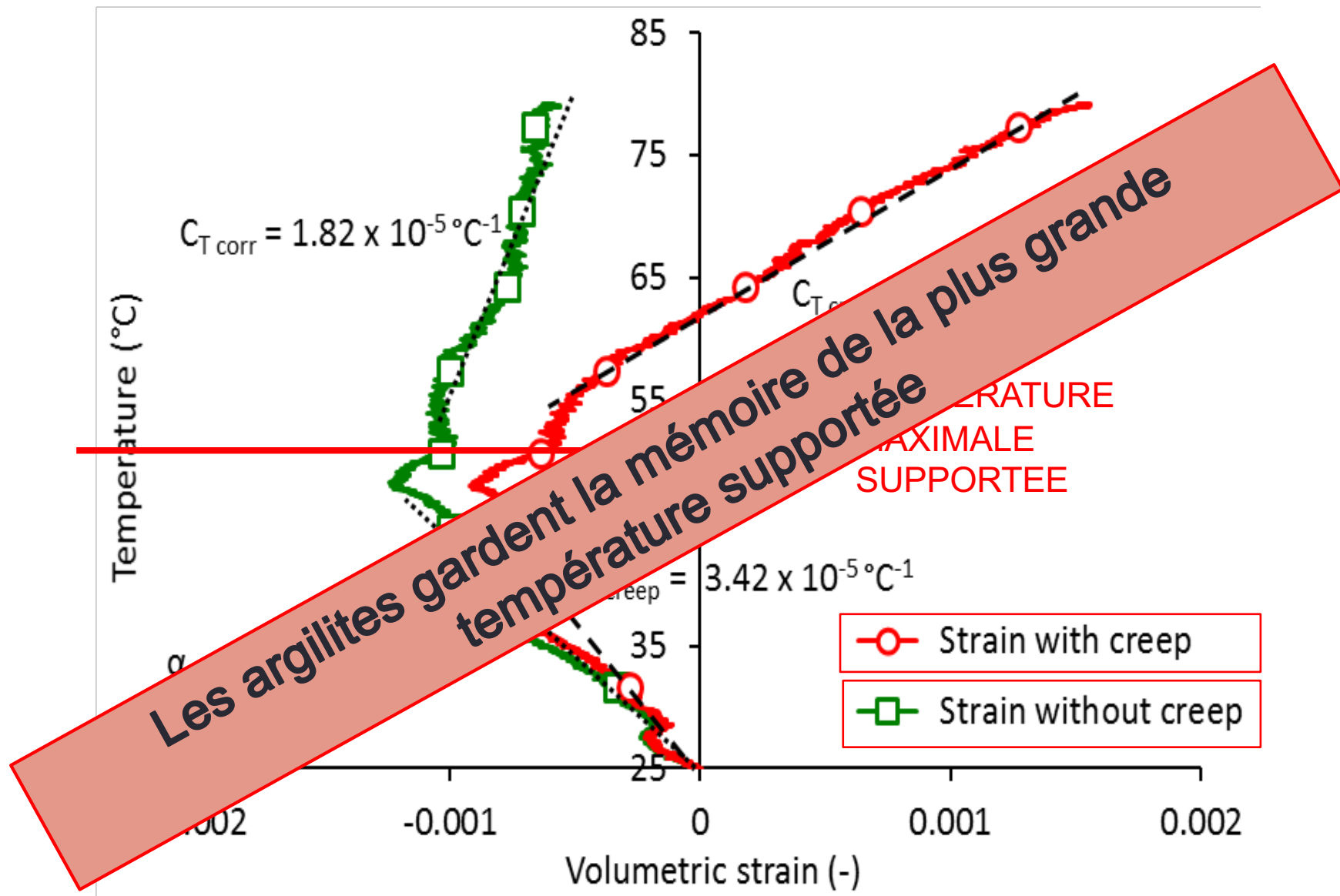
Dilatation thermo-élastique,
 $\alpha = 59 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$



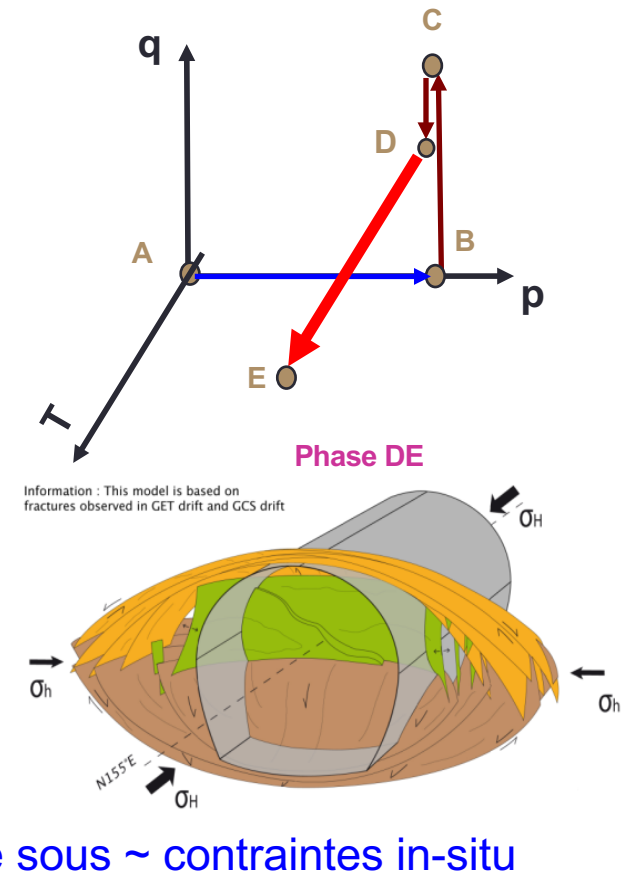
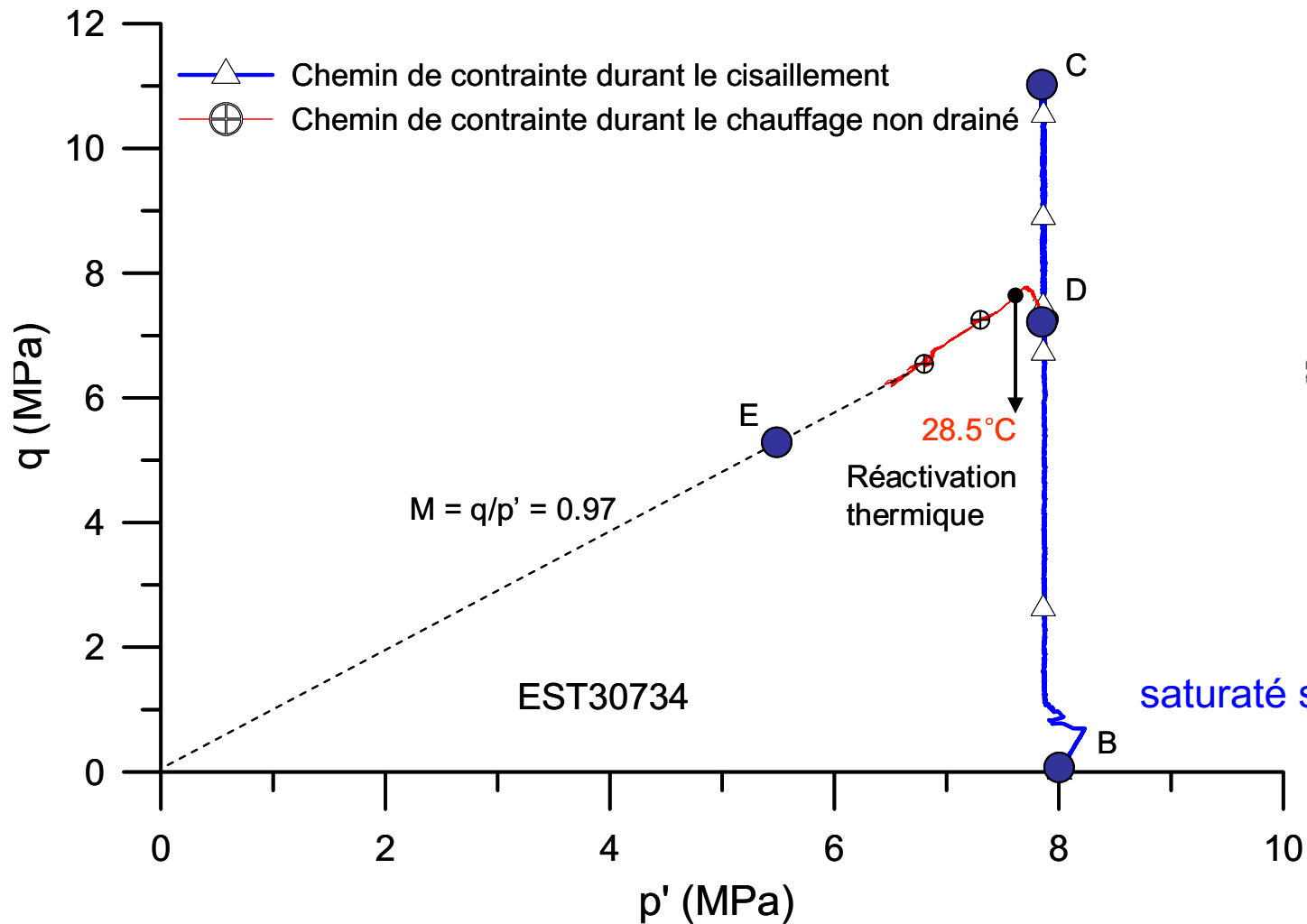
Ecrouissage thermique du COx



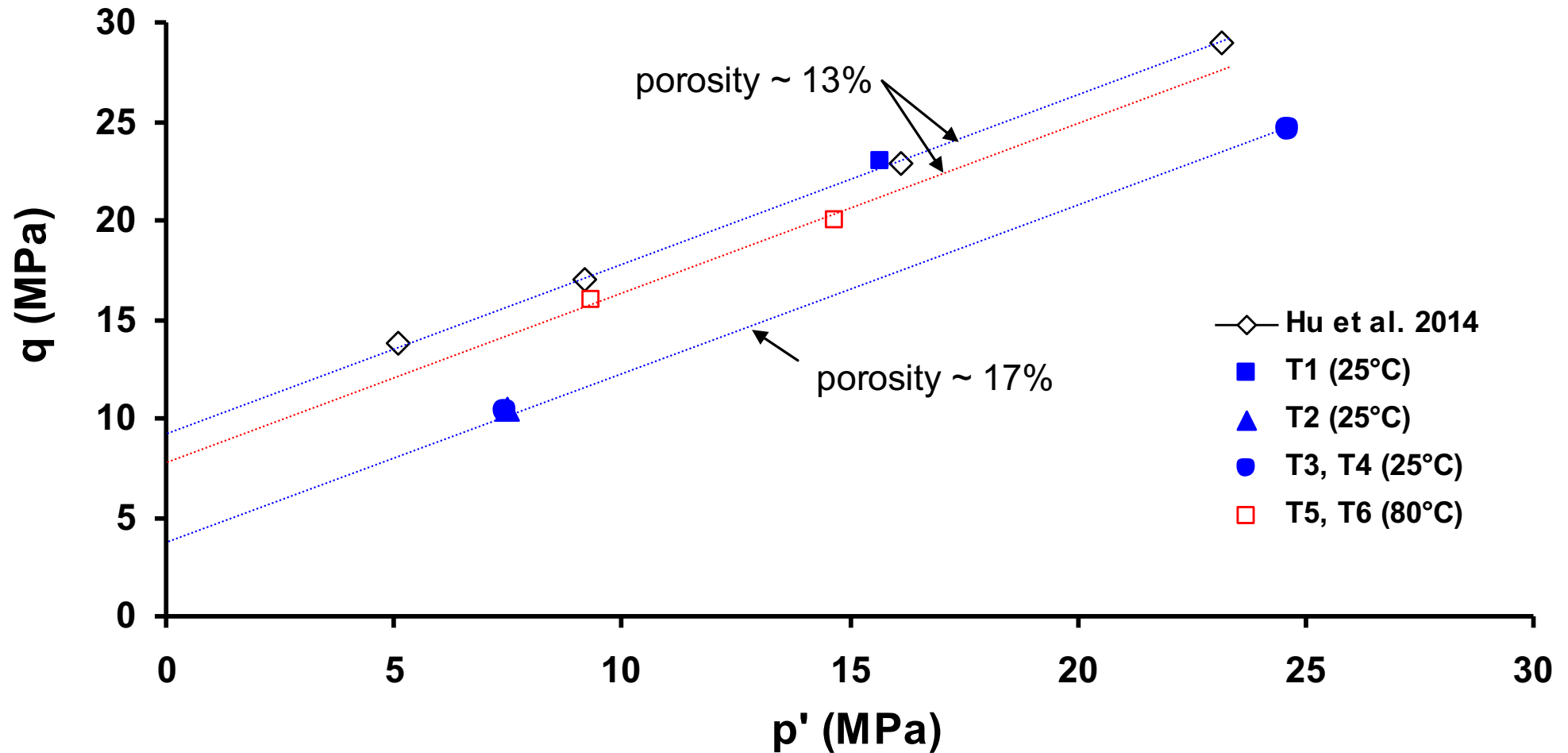
Ecrouissage thermique du COx



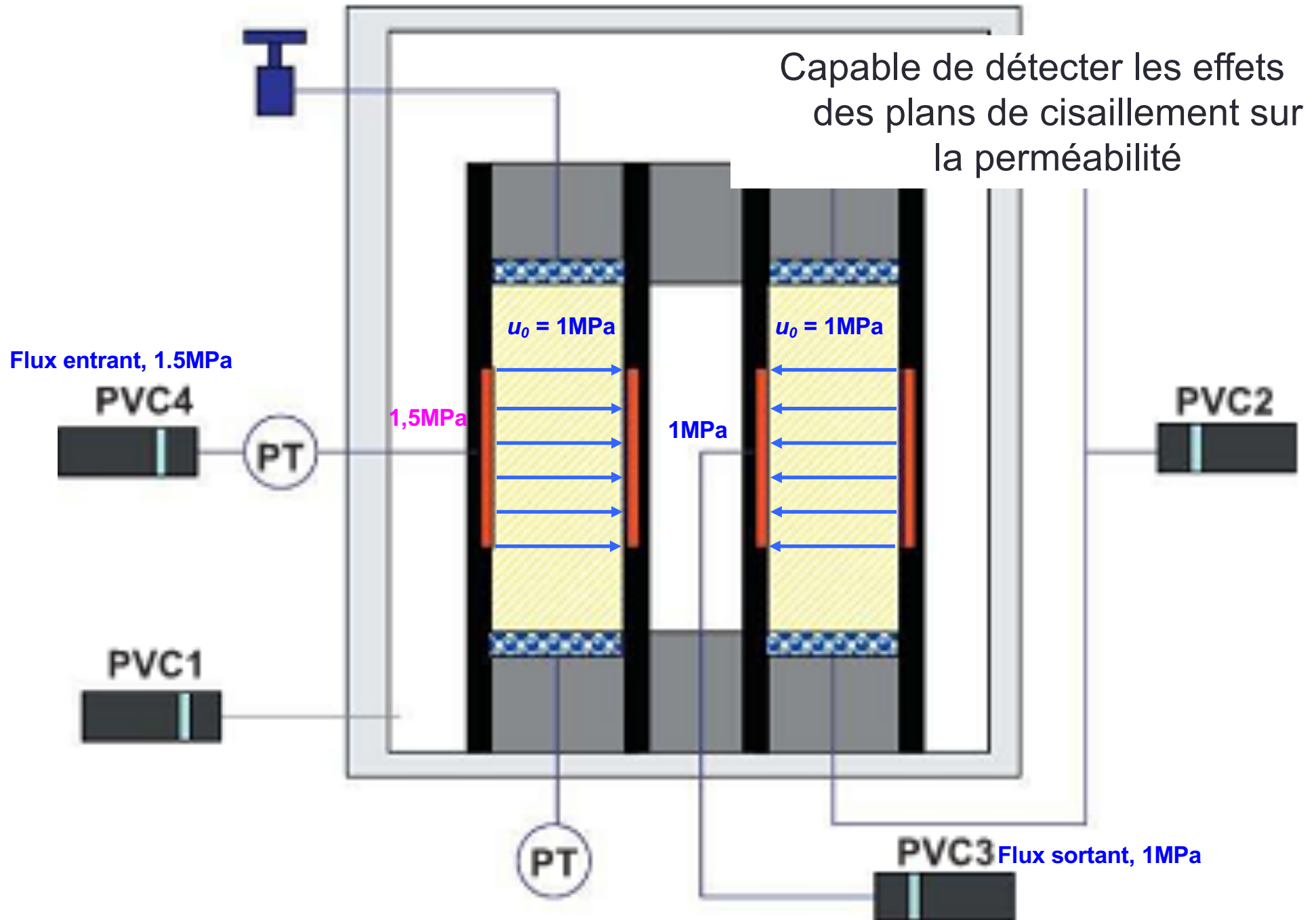
Réactivation thermique d'un plan de cisaillement, COx



Critère de rupture (température), COx

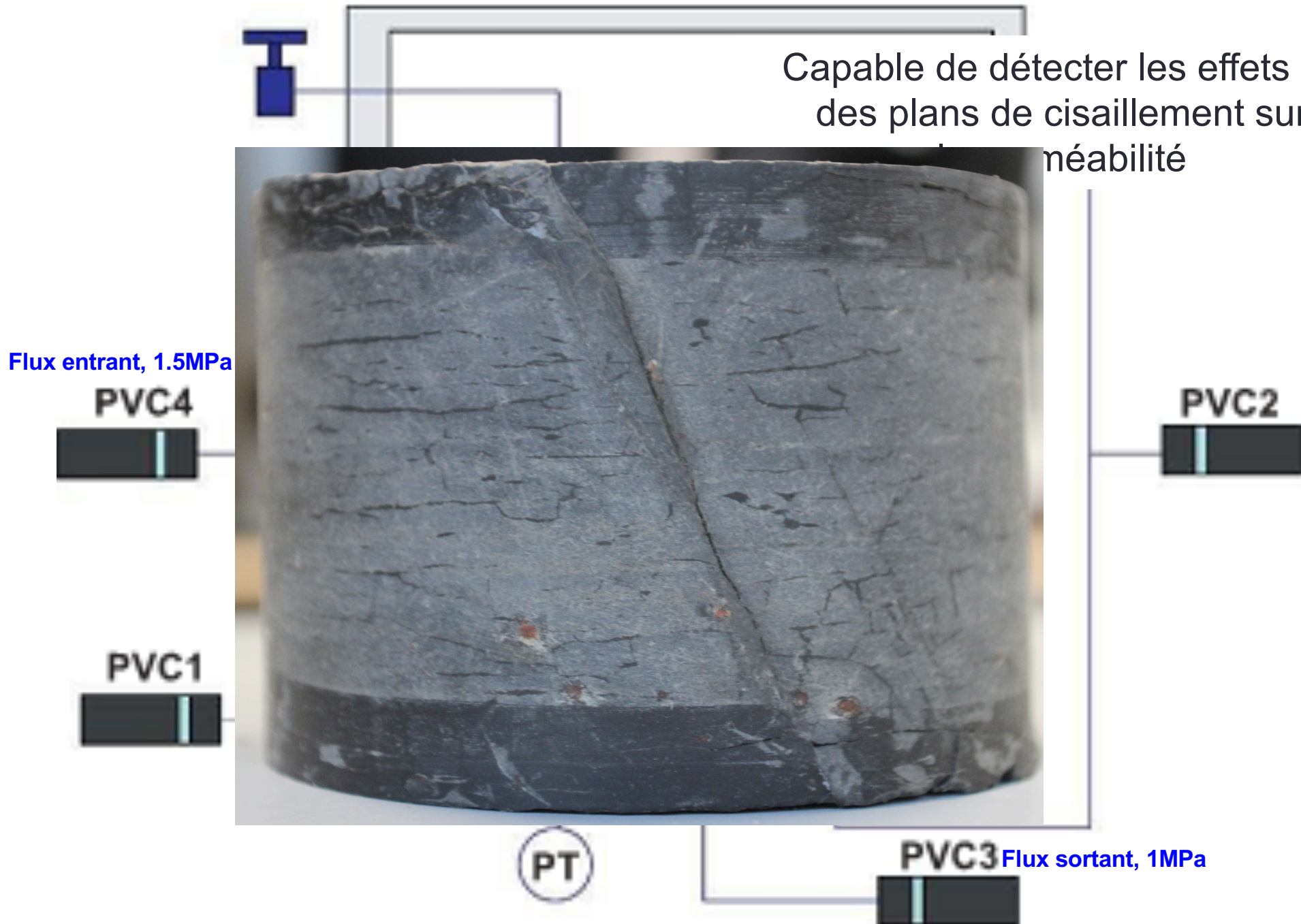


Essai de perméabilité radiale

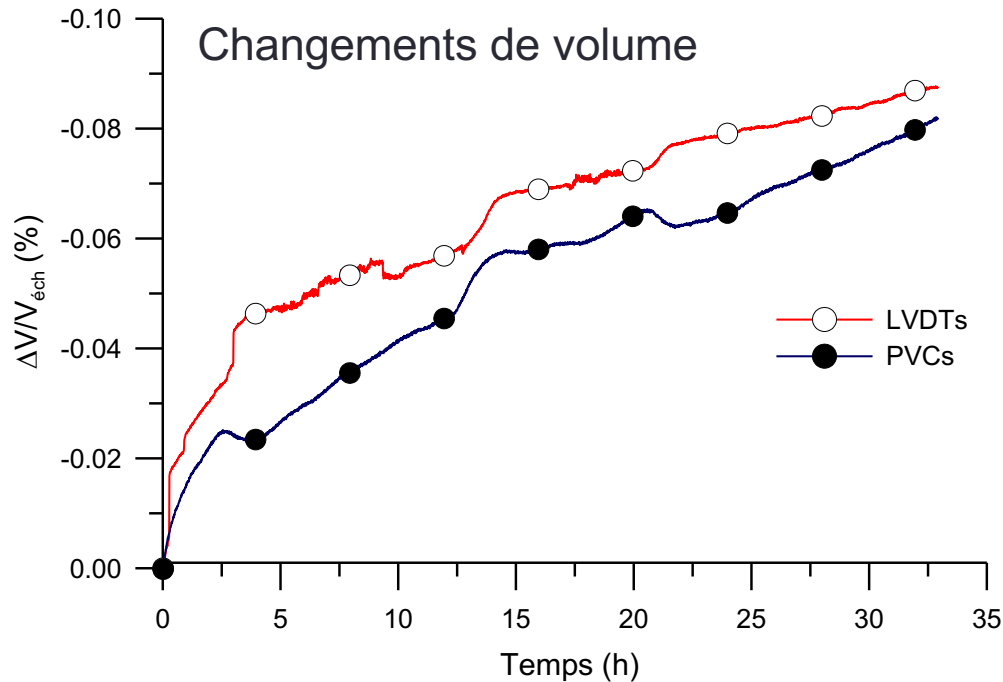
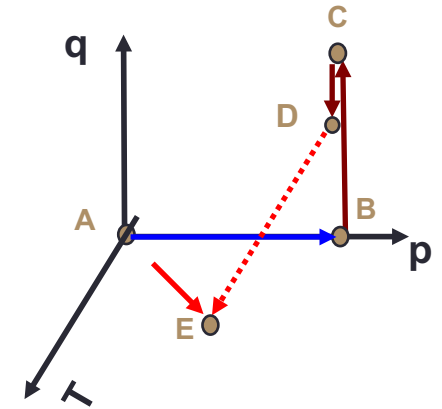
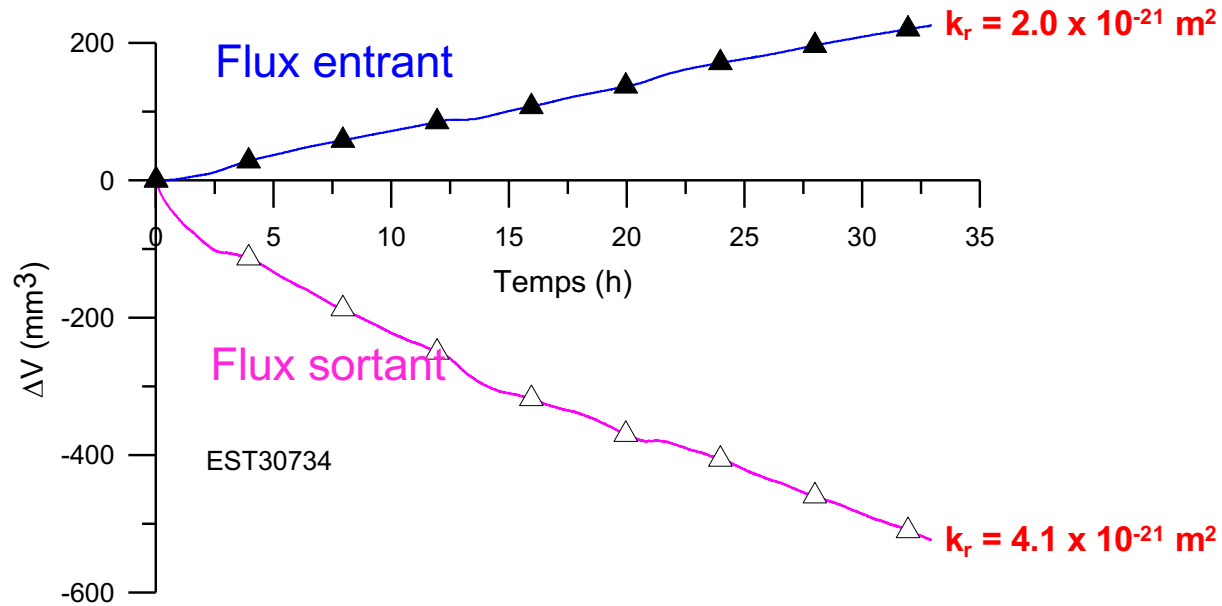


Essai de perméabilité radiale

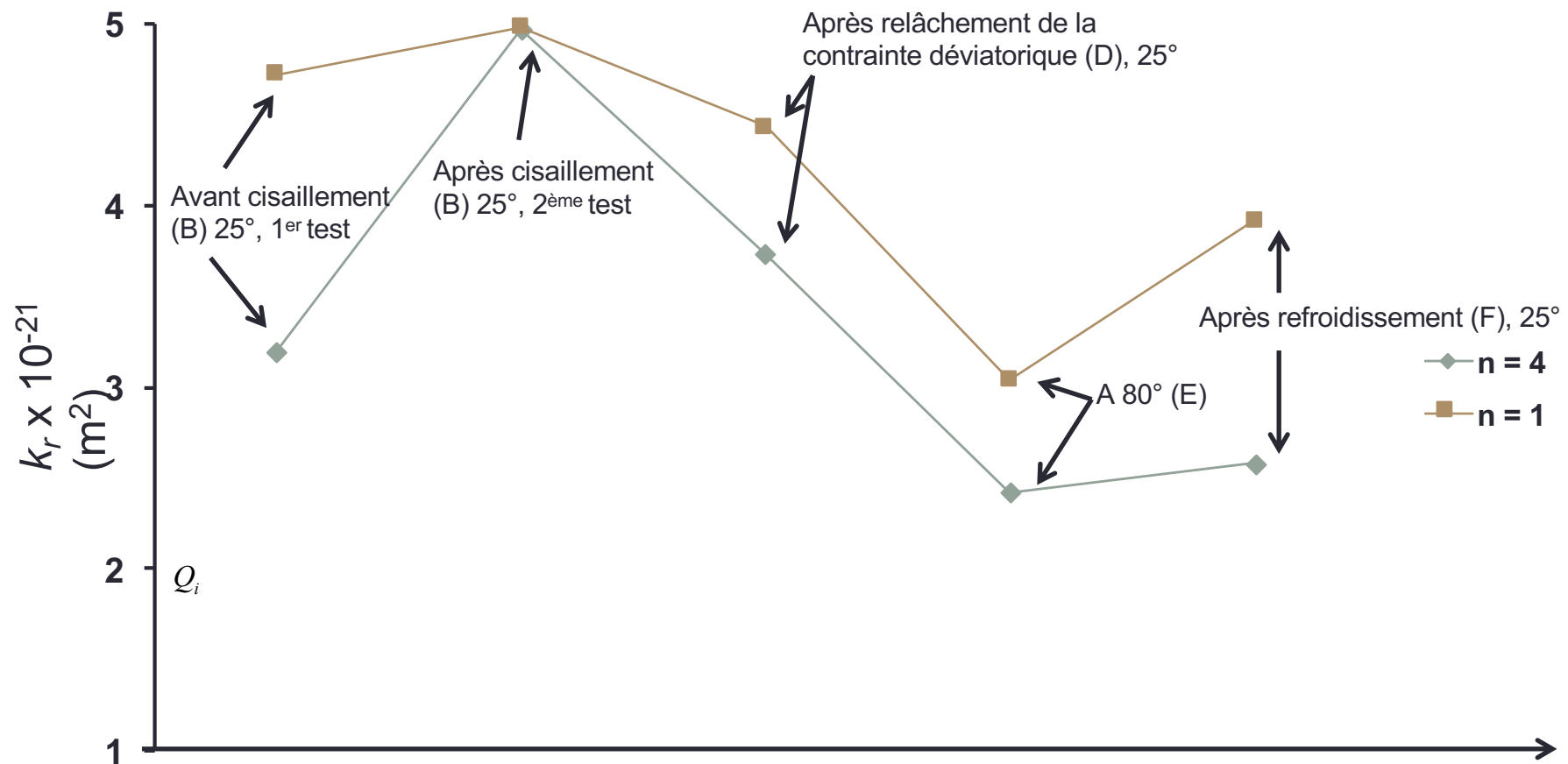
Capable de détecter les effets
des plans de cisaillement sur
la perméabilité



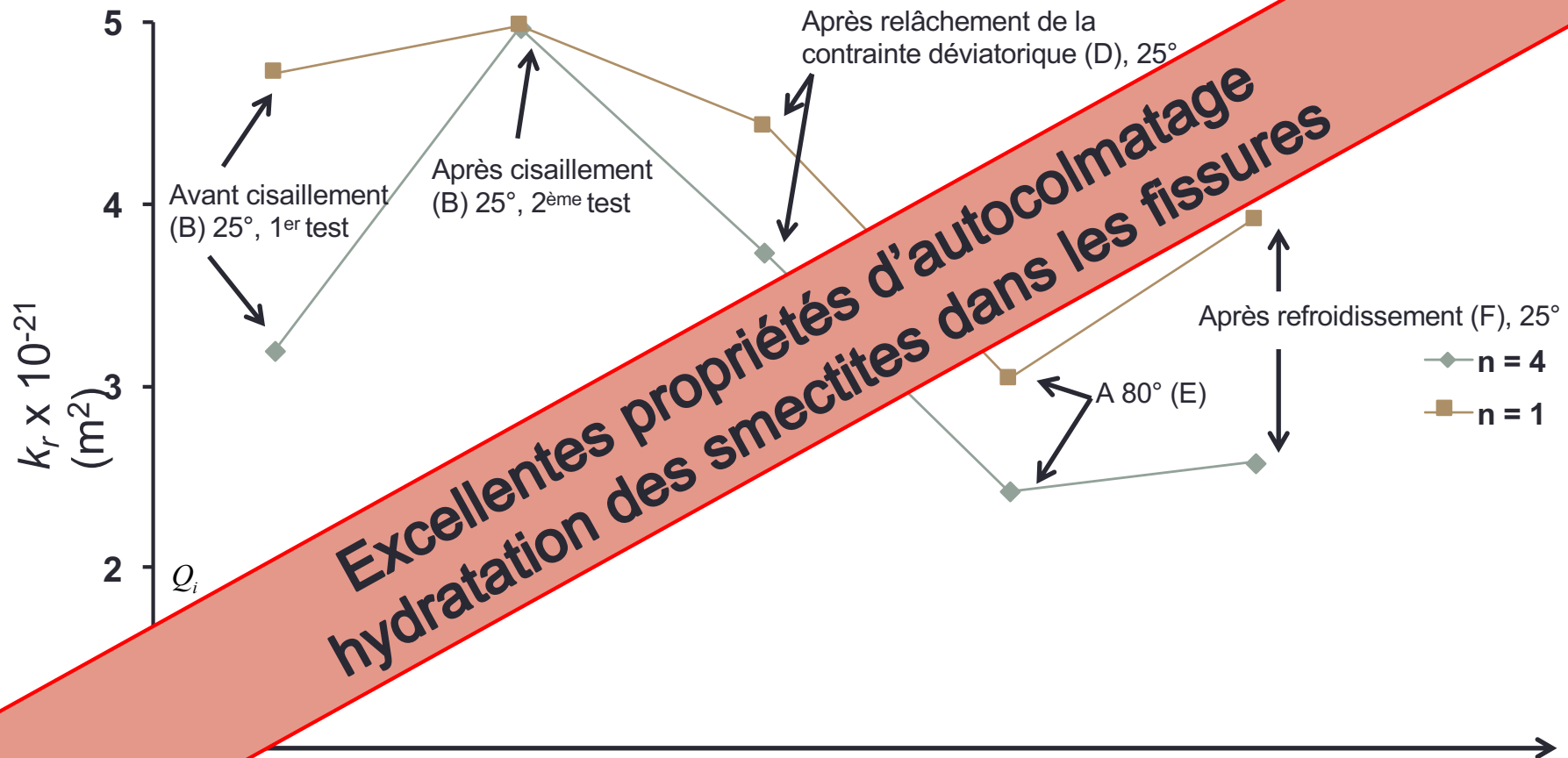
Essai de perméabilité radiale, après cisaillement



Variations de perméabilité, COx



Variations de perméabilité, COx



Conclusions

- Aspects sensibles THM dans le stockage dans les argiles et argilites
- Effet de la surconsolidation sur la réponse thermique volumique des argiles
- Essais en labo difficiles (très faible perméabilité)
 - Dispositifs spécifiques **avec courts chemins de drainage** saturation complète, bonnes conditions de drainage
- Pressurisation thermique
- Ecrouissage thermique
- Zone endommagée par l'excavation (EDZ)
 - **Pas d'effets des fissures sur la perméabilité** (25 et 80°C)
 - **Excellent auto-colmatage** (25 et 80°C)
 - Mobilisation thermique de plans de cisaillement existants
- Meilleure compréhension des phénomènes THM dans le champ proche