

---

# Structure Physique et variations dimensionnelles

---

Prof. Karen Scrivener  
Laboratoire des Materiaux de Construction

# Sommaire

---

1. Introduction
2. Système poreux dans le béton
3. Retraits, liés au changements d'humidité
  - 3.1. Retrait chimique
  - 3.2. Retrait endogène
  - 3.4. Retrait plastique
  - 3.5. Retrait de dessiccation
4. Retrait thermique
5. Le fluage: comportement sous charge constante
  - 5.1. Effet des paramètres
6. Interaction retrait et fluage
7. L'essentiel

# 1. Introduction

---

**Le béton peut être soumis à des changements de dimension**  
– les causes principales pour ces changements sont:

**VARIATION D'HUMIDITÉ: SECHAGE**

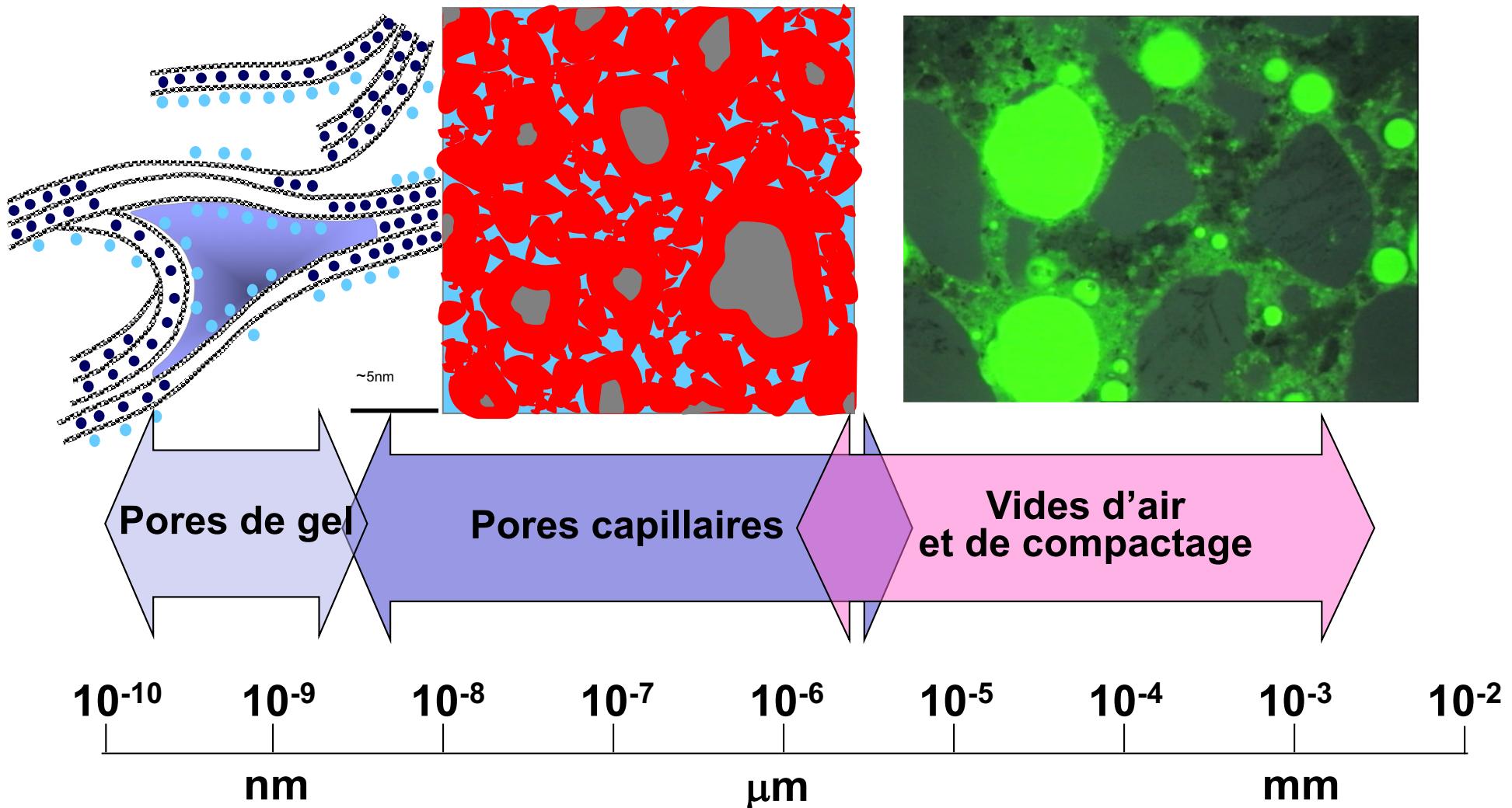
**VARIATION DE TEMPERATURE**

**CHARGE MÉCANIQUE**  **FLUAGE**

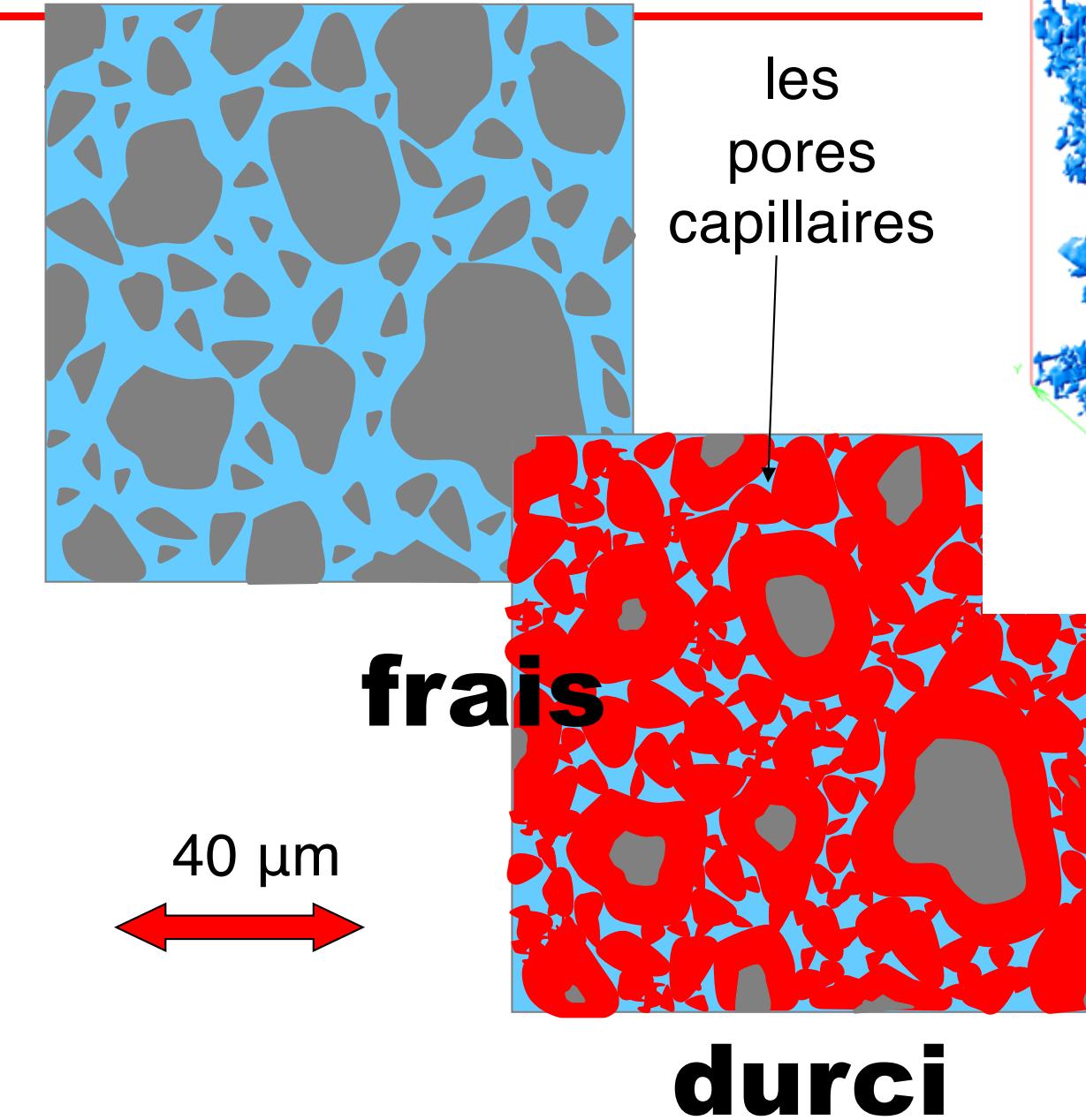
**Ces changements dimensionnels sont à l'origine de la  
fissuration**

**Souvent ces effets interagissent**

## 2. Système poreux dans le béton



# Pores capillaires



## 2. Système poreux dans le béton: Pores de gel

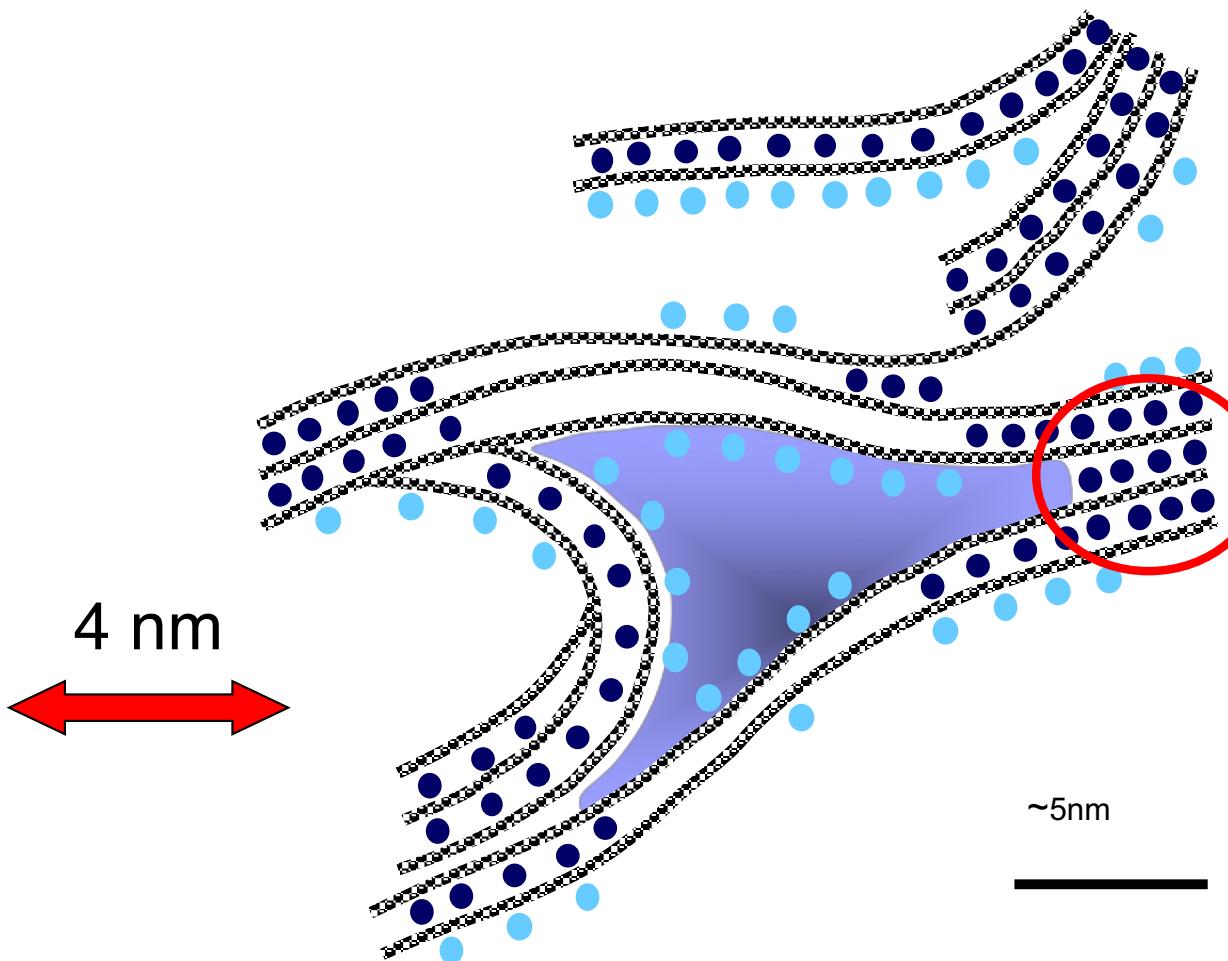
Particularité de la porosité d'une pâte de ciment:

**« Gel » du C-S-H**

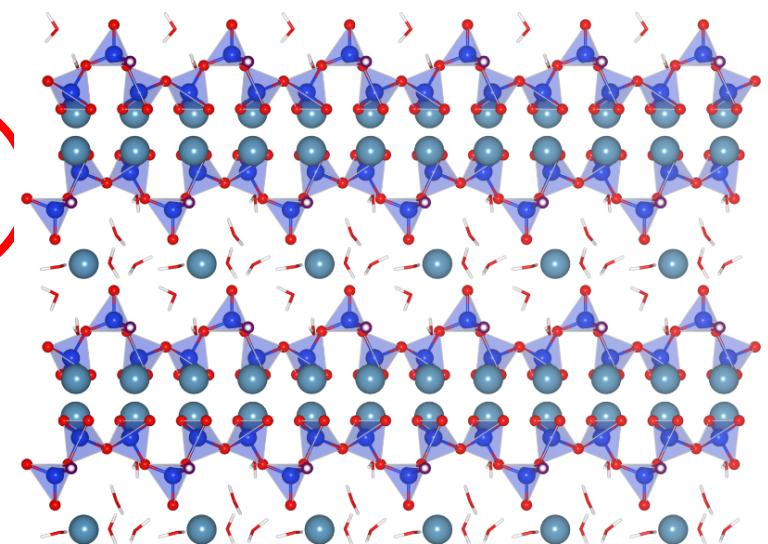
**Surface spécifique ~ 700 m<sup>2</sup>/g**

**porosité « intrinsèque » ~28%**

# Modèle – « gel C-S-H »



Structure crystallographique de C-S-H



FELDMAN and SERREDA, 1964

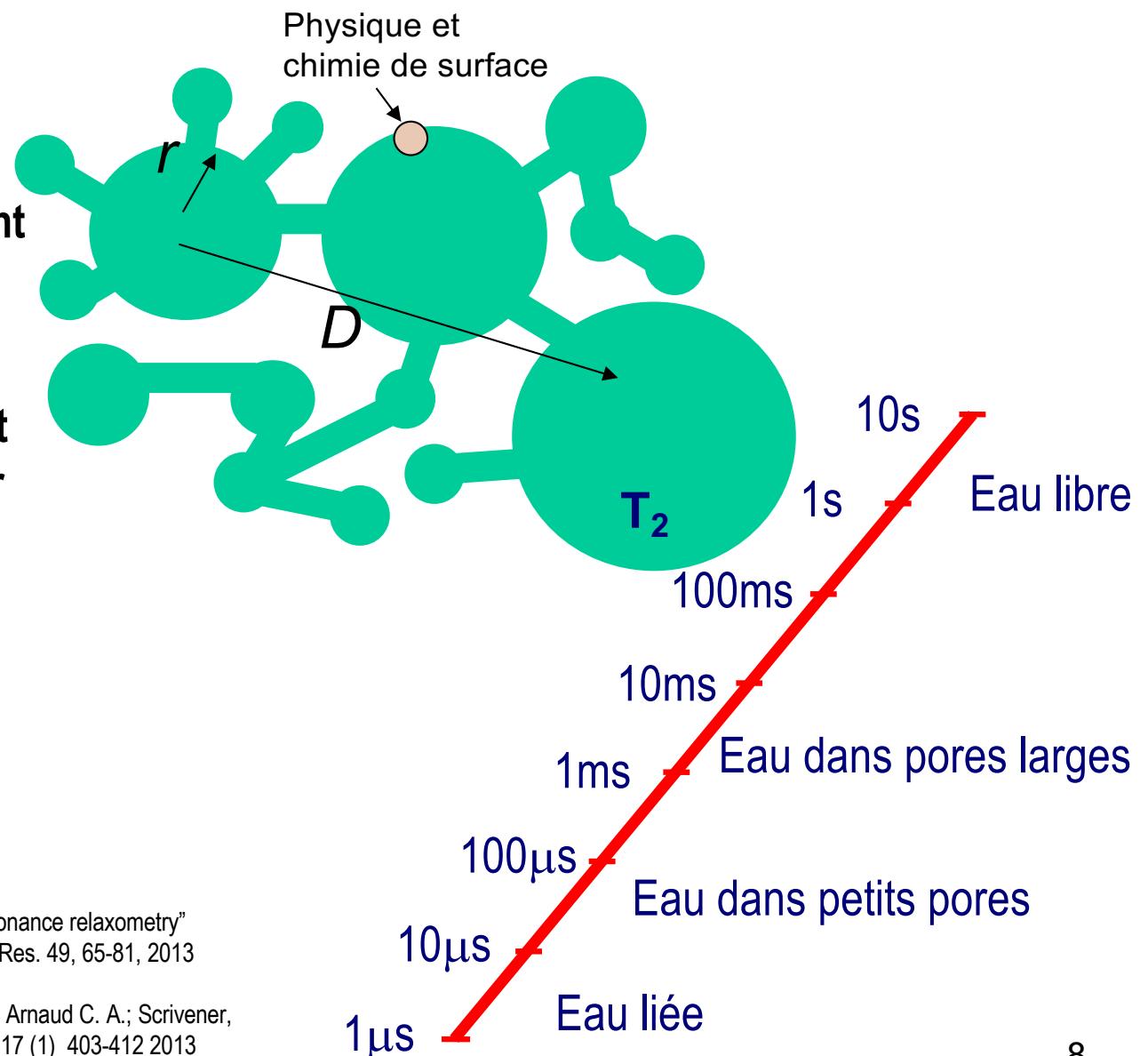
Dimension « caractéristique » des pores  $\sim 2\text{-}8\text{nm}$

# Résonance Magnétique Nucléaire du Proton ( $^1\text{H}$ RMN)

Technique unique qui permet d'analyser la porosité, utilisant l'eau comme sonde

Aucun séchage n'est nécessaire, au contraire les pores doivent contenir de l'eau pour donner un signal

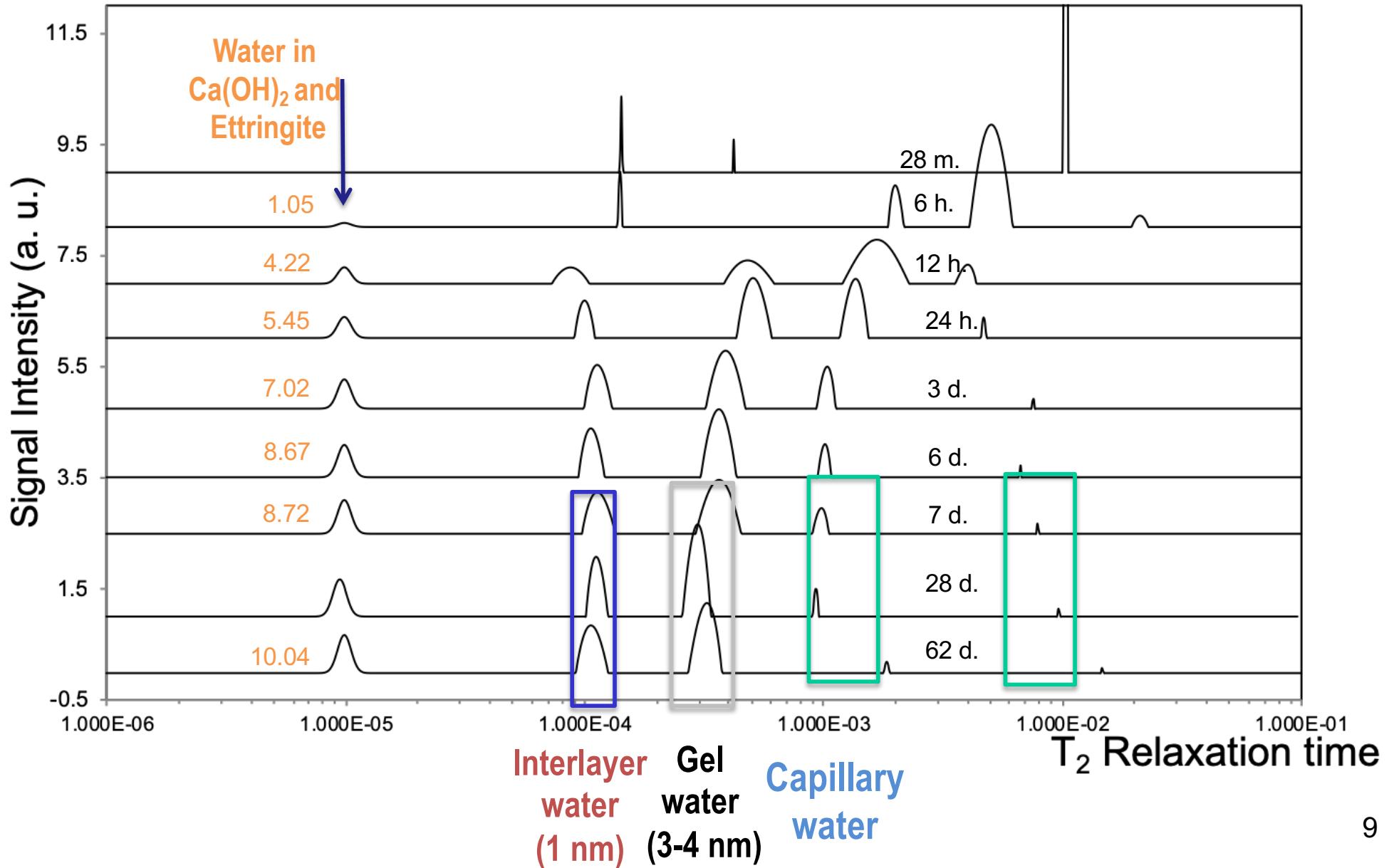
Mesures in-situ sur le même échantillon



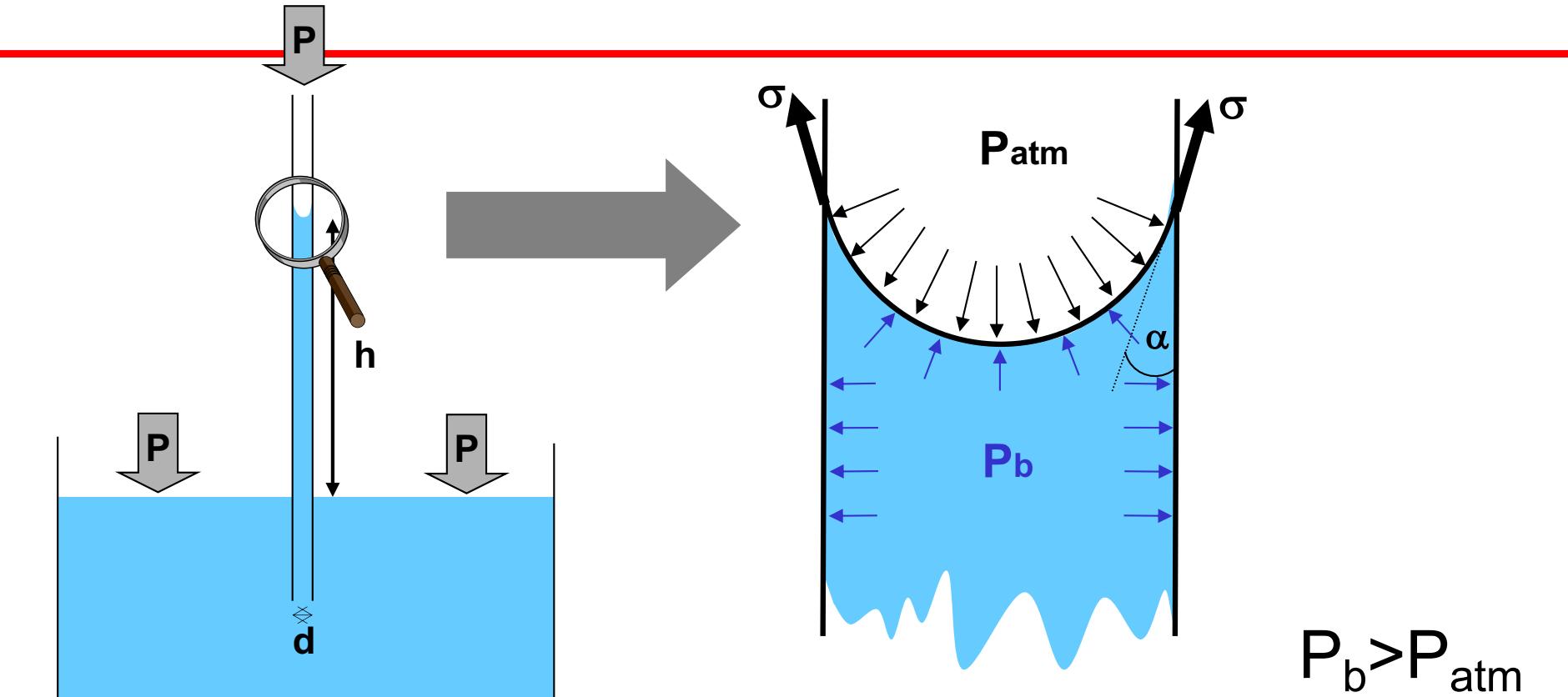
"The morphology of C-S-H: Lessons from  $^1\text{H}$  nuclear magnetic resonance relaxometry"  
Andrea Valori; Peter J. McDonald; Karen L Scrivener, Cem. Conc. Res. 49, 65-81, 2013

"Densification of C-S-H Measured by  $^1\text{H}$  NMR RelaxometryMuller, Arnaud C. A.; Scrivener, Karen L.; Gajewicz, Agata M.; McDonald, P.M" J Phys. Chem. C 117 (1) 403-412 2013

# Evolution des différentes populations d'eau au cours du temps



# Forces capillaires



$$\sigma \cos\alpha \cdot 2\pi r = (P_{atm} - P_b) \pi r^2$$

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos\alpha}{r}$$

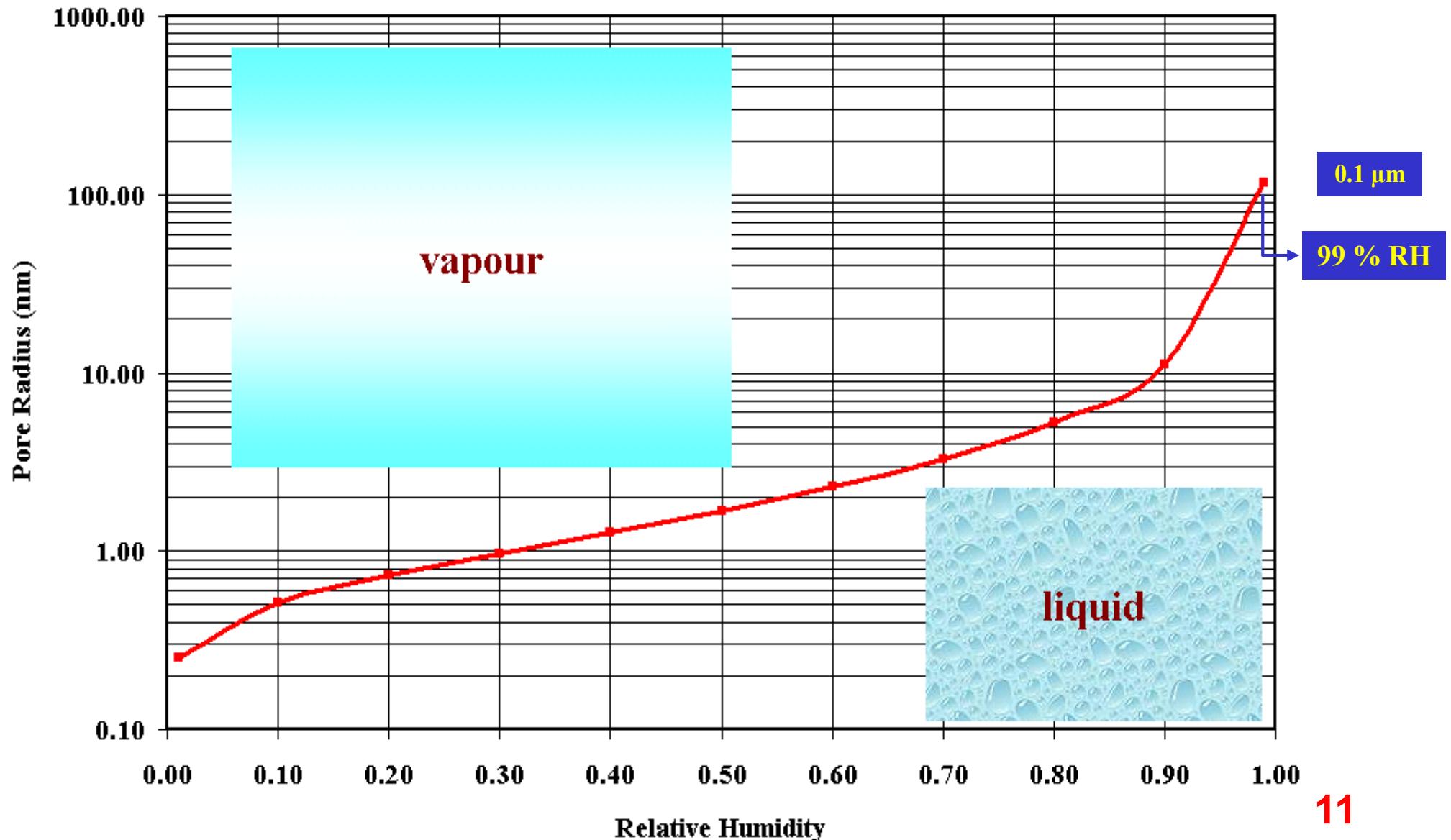
Éq. de Laplace

$$P_b > P_{atm}$$

Dépression du liquide

Tire les murs de capillaire ensemble

$$R_{pK} = -\rho_1 \cdot \frac{M}{RT} \cdot (2 \cdot \sigma(T) \cdot \cos \beta) \cdot \frac{1}{\ln(HR)}$$



# Pressions générées

---

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r}$$

$\sigma \sim 0,072 \text{ J/m}^2$  énergie de surface       $\alpha = \sim 0^\circ$

$\sim 0,072 \text{ N/m}$  tension superficielle

$r = 1 \mu\text{m}$        $\Delta P \sim 0,1 \text{ MPa}$

$r = 100 \text{ nm}$      $\Delta P \sim 1 \text{ MPa}$

$r = 50 \text{ nm}$      $\Delta P \sim 2 \text{ MPa}$

$r = 10 \text{ nm}$      $\Delta P = 10 \text{ MPa}$

Résistance à la rupture en traction  $\sim 2 \text{ MPa}$

### 3. Retrait (de séchage)

---

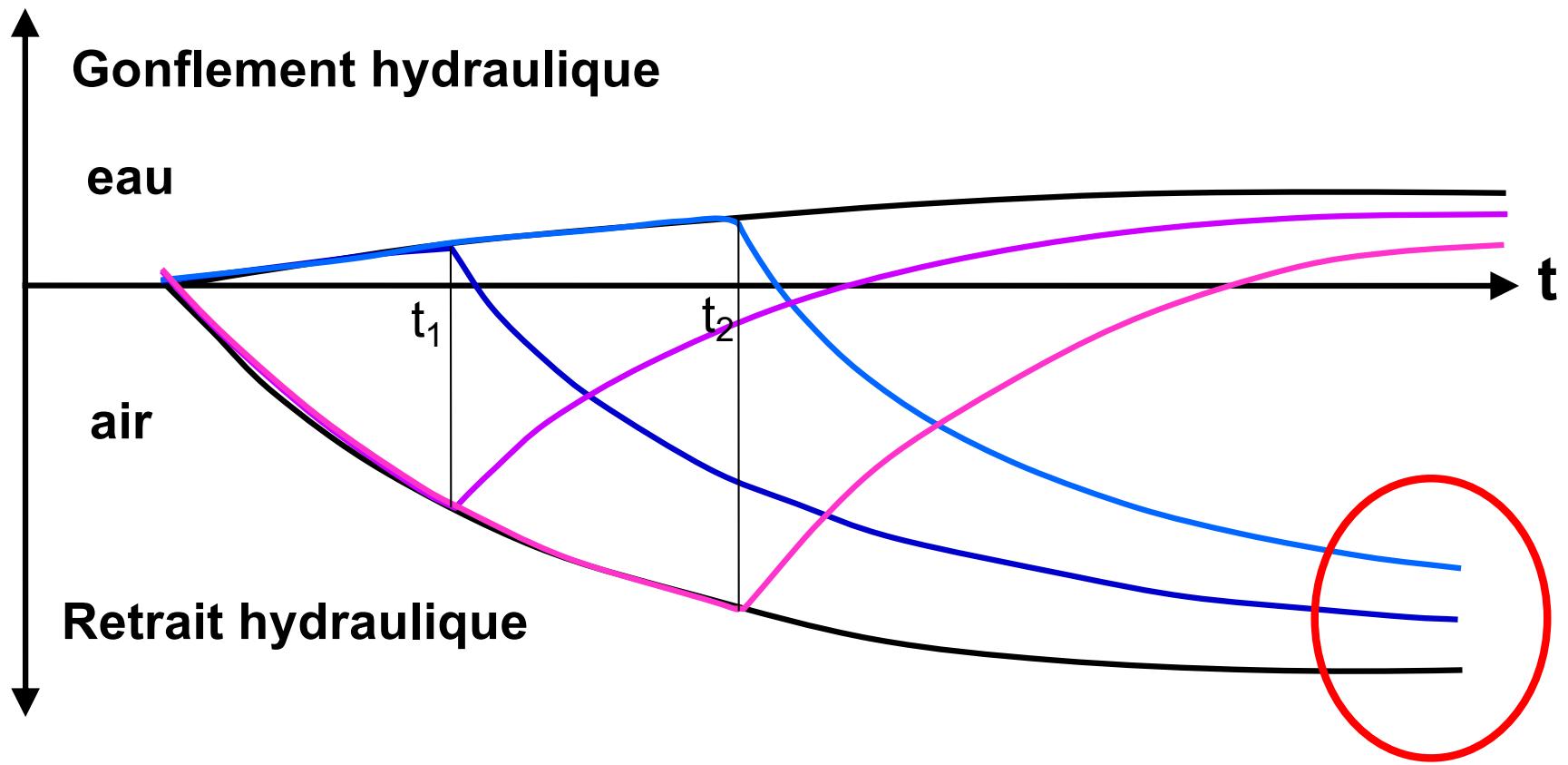
Définition:

Le Retrait = diminution de volume du béton induite par une perte d'eau dans les pores, au moment de la mise en oeuvre puis au cours de son vieillissement.

L'augmentation de volume provoquée par une absorption d'eau est désignée comme gonflement.

Ce changement de volume crée des contraintes de traction dans le matériau.

Si ces contraintes sont plus importantes que la limite de rupture du béton, il y a rupture du matériau, ce qui se traduit par des fissures.



### Retrait de dessiccation

Les changements de dimension  
sont seulement en partie réversibles

Moins de retrait  
après cure plus  
prolongée

---

Retrait endogène: sans échanges d'eau avec l'environnement  
l'eau consommé par hydratation

Retrait plastique: avant prise

Retrait de dessiccation / séchage: après prise, à long terme

## 3.2. Retrait endogène

---

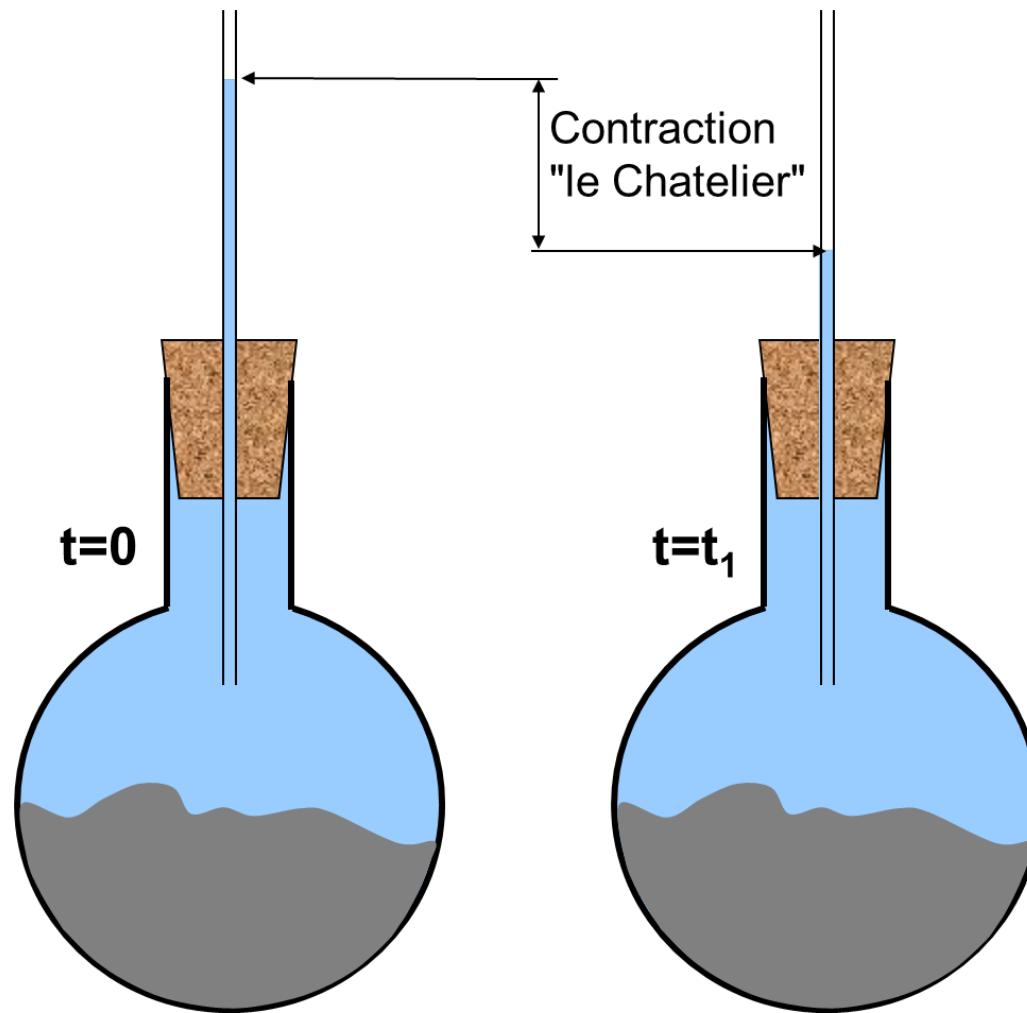
Endogène: Système isolé, pas d'exchange d'eau ni de chaleur avec l'environnement

Le retrait endogène = retrait chimique absolu moins le volume de vide contenu dans les pores à l'intérieur du matériau.

Le retrait endogène constitue le retrait apparent depuis l'extérieur du matériau .

## 3.1. Retrait chimique (rappel)

---



### 3.1. Changement de volume

---

$$V_{C_3S} + 1,32V_{H_2O} \Rightarrow 1,57V_{C-S-H} + 0,60V_{CH}$$

2,32

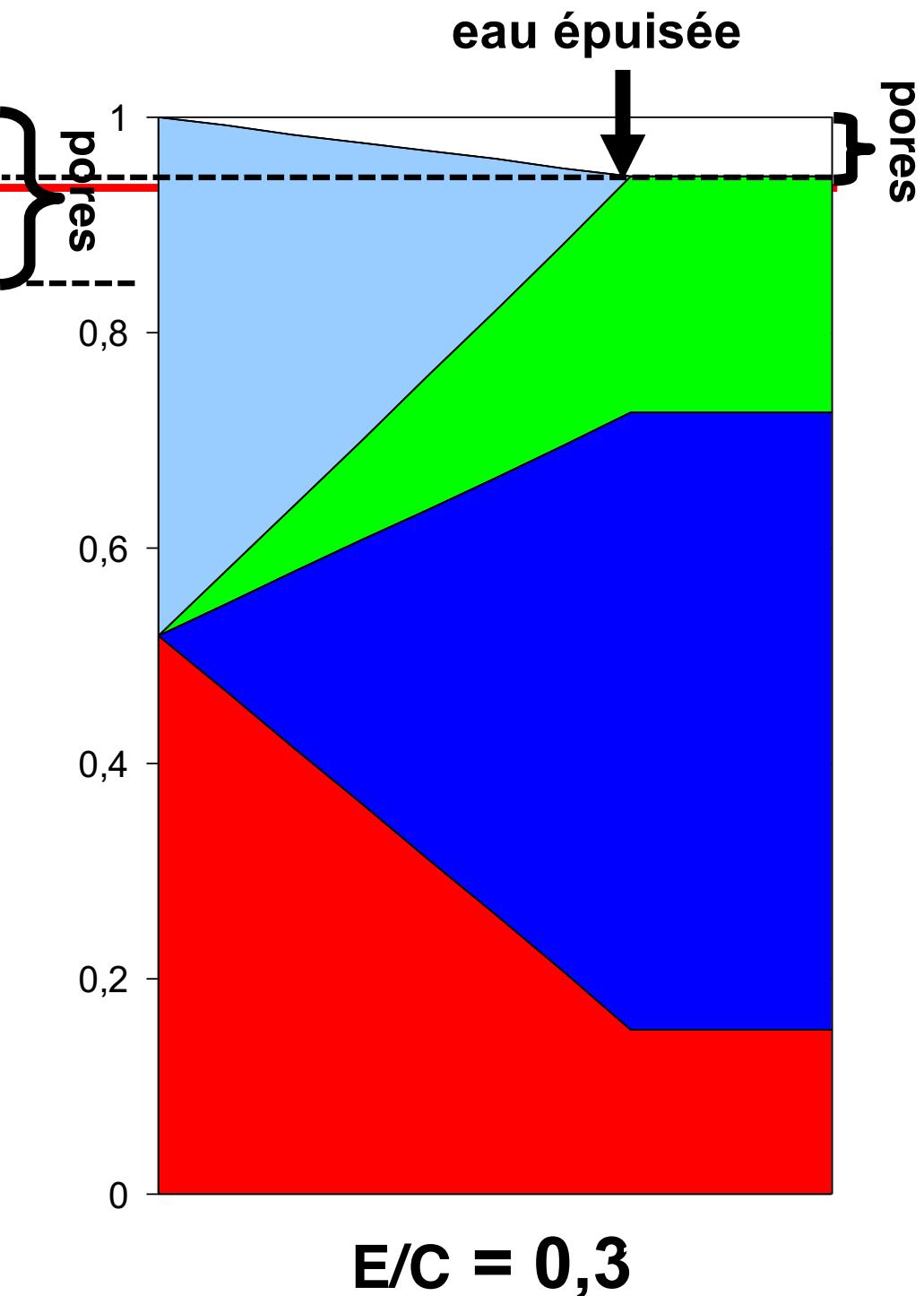
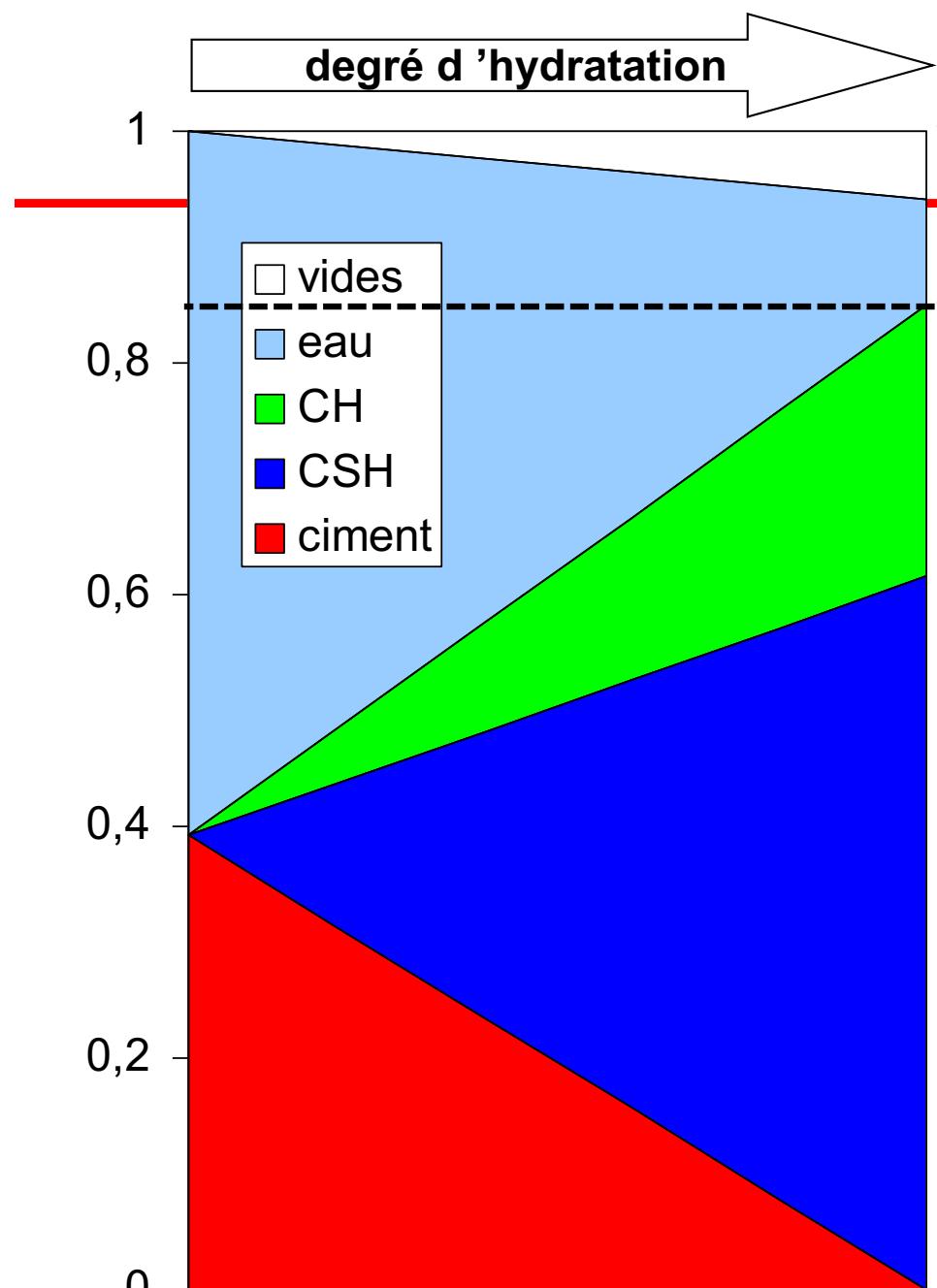
2,16

**Le volume du solide augmente, mais le volume total diminue:**

**Contraction Le Chatelier:**

$$\Delta V = \frac{0,16}{2,32} = \sim 7\%$$

**Valeurs entre  
5 et 10%  
en fonction des  
hypothèses**



## 3.2. Retrait endogène

---

Endogène: Système isolé, pas d'exchange d'eau ni de chaleur avec l'environnement

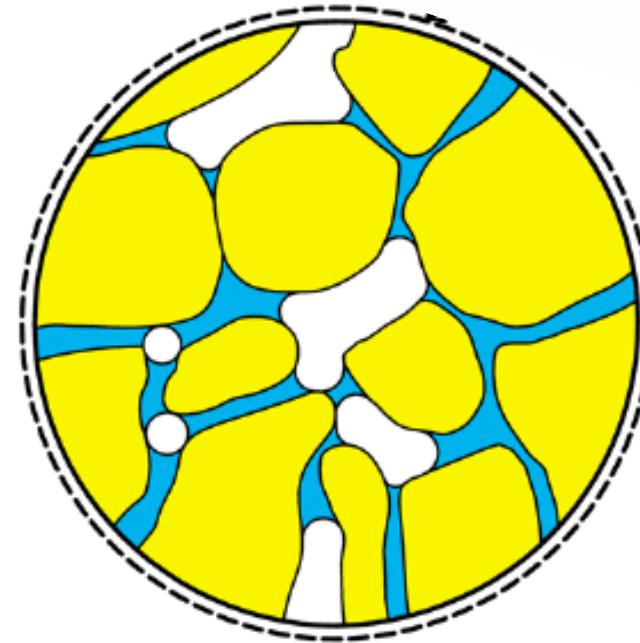
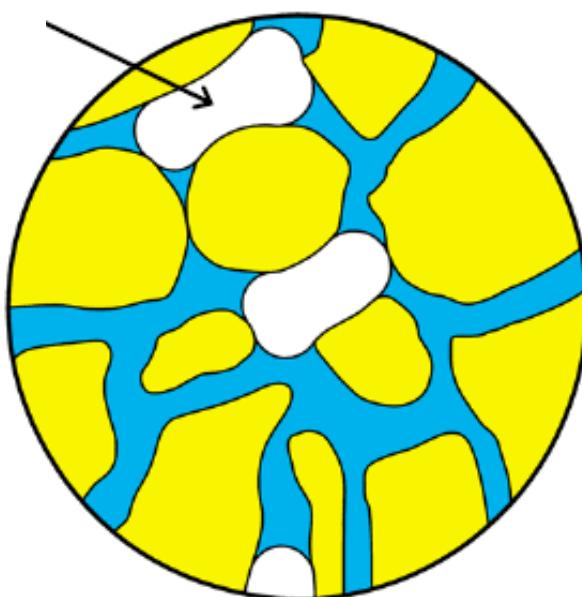
Le retrait endogène = retrait chimique absolu moins le volume de vide contenu dans les pores à l'intérieur du matériau.

Le retrait endogène constitue le retrait apparent depuis l'extérieur du matériau .

## 3.2. Retrait endogène

---

Retrait  
chimique

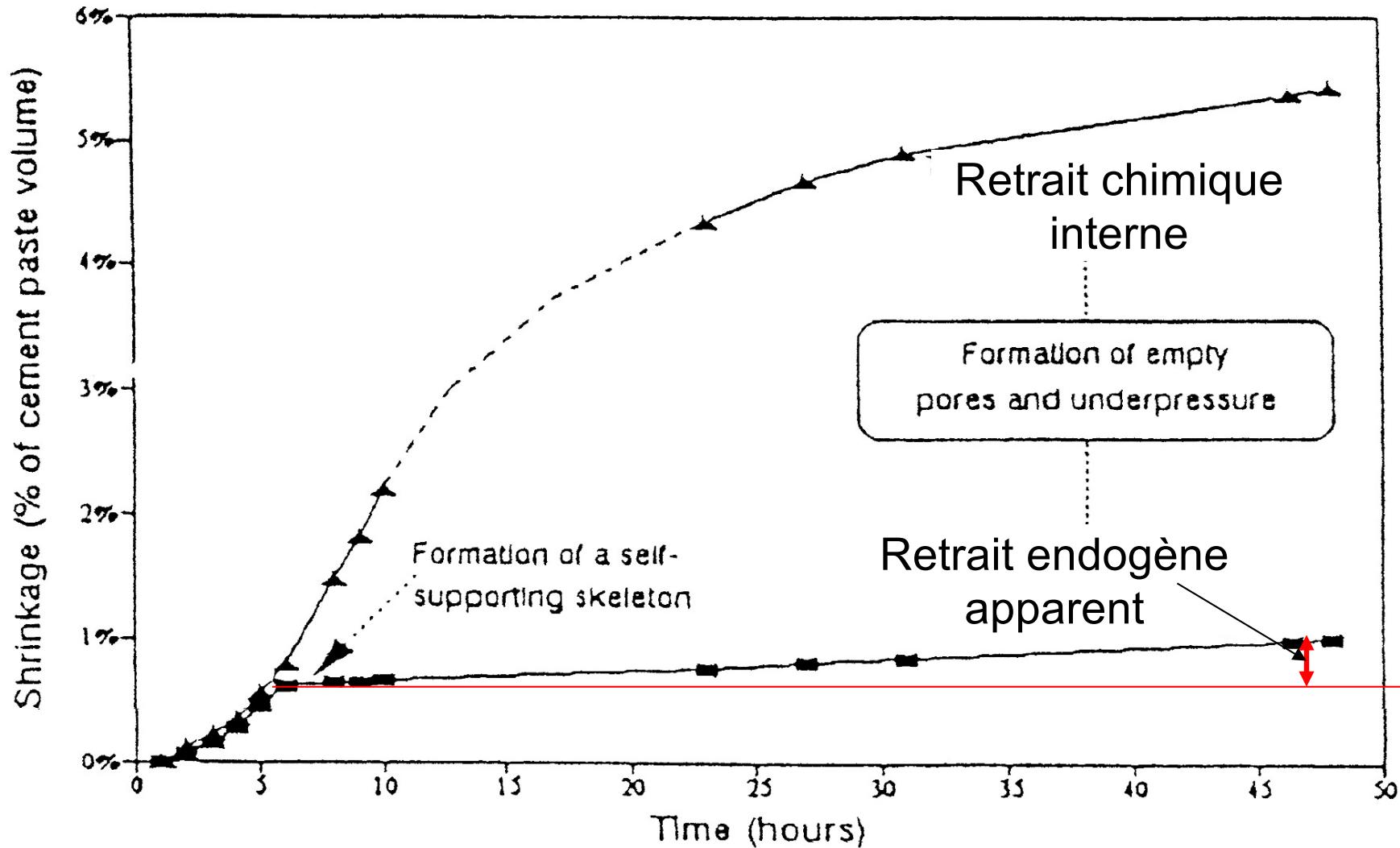


## 3.2. Retrait endogène

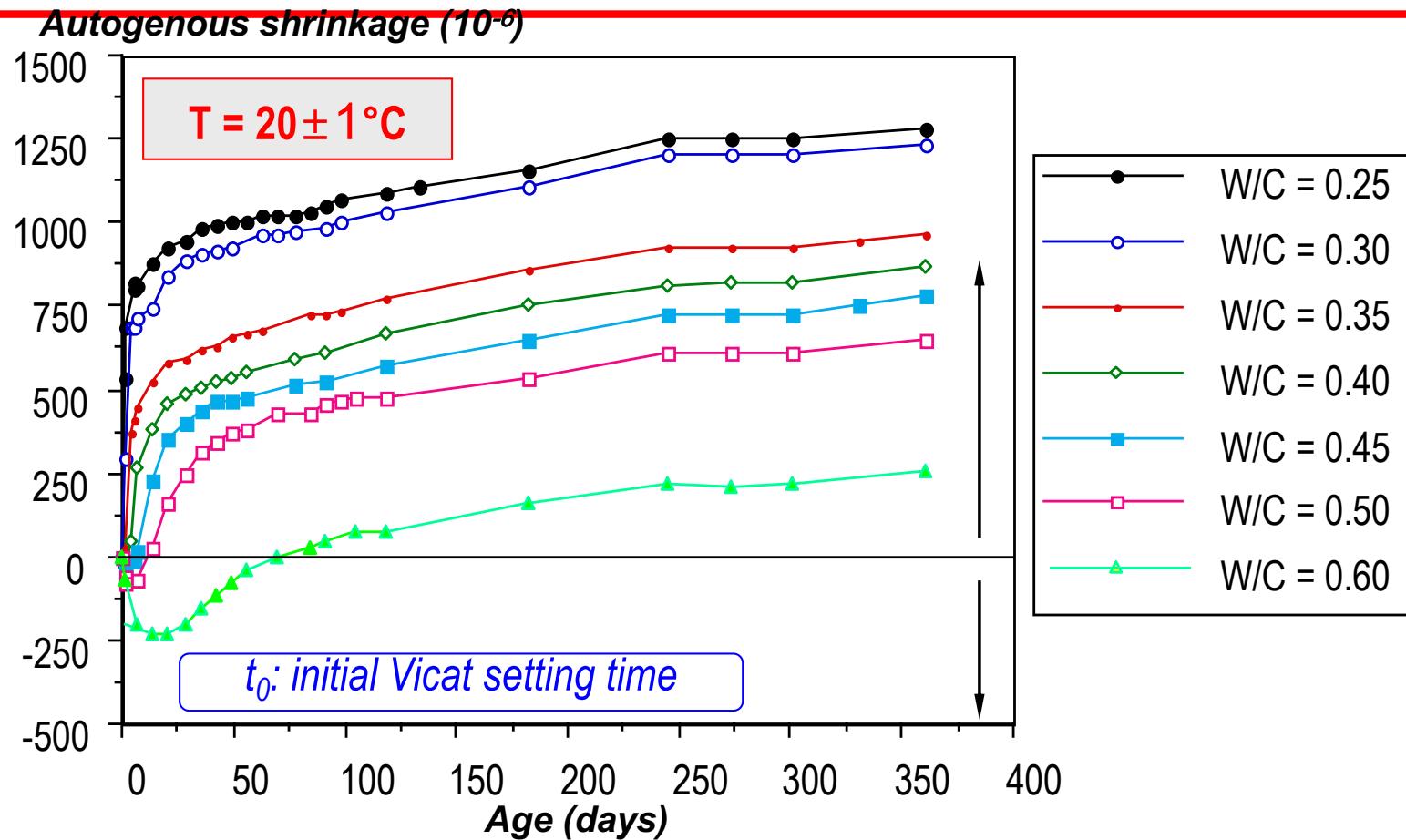
---

Après la prise, le ciment continue à s'hydrater, ce qui assèche le réseau poreux et crée une dépression et donc un retrait dit **d'auto-dessiccation**.

Pour des compositions de béton courantes, ce retrait est assez limité. En revanche, il devient non négligeable pour des bétons avec un rapport E/C faible (typiquement les BHP).



# Résultats expérimentaux

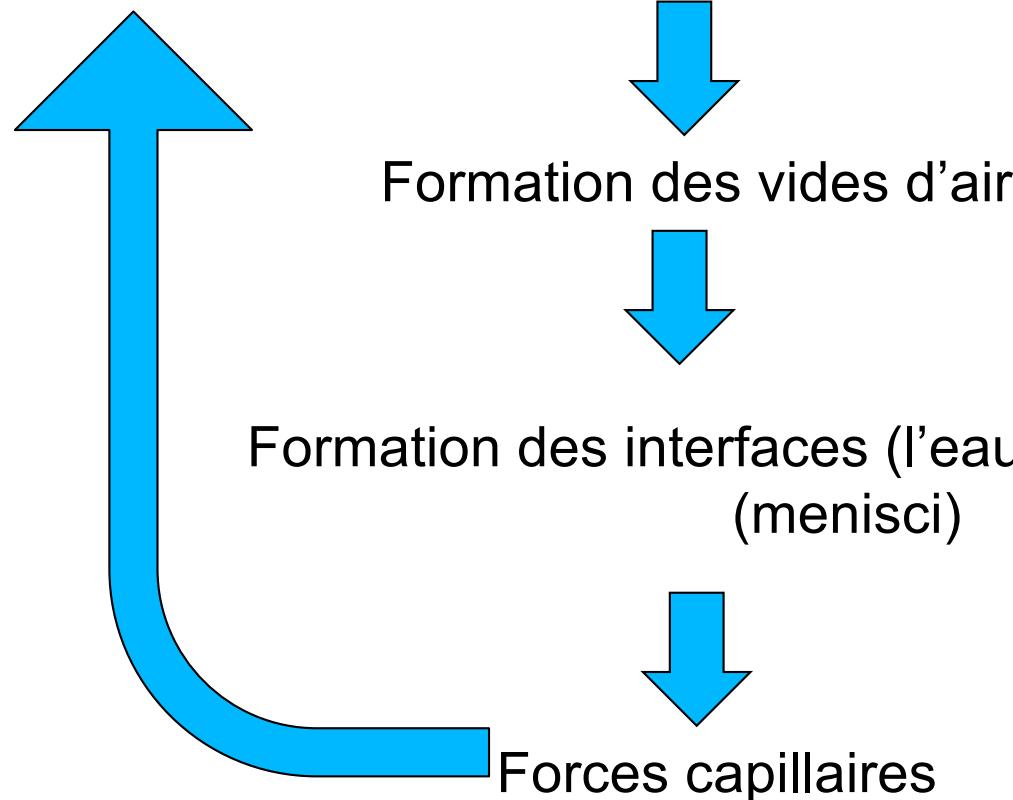


- eau/ciment < 0.40 → strong shrinkage  
↳  $540 \times 10^{-6}$  at  $t = 1$  day with  $W/C = 0.25$       42% of the  $1$ -year value)
- eau/ciment  $\geq 0.40$  → swelling  
↳  $-230 \times 10^{-6}$      $t = 21$  days with  $W/C = 0.60$

---

Retrait chimique (le Chatelier):  $V_{anh} + V_{eau} > V_{hyd}$

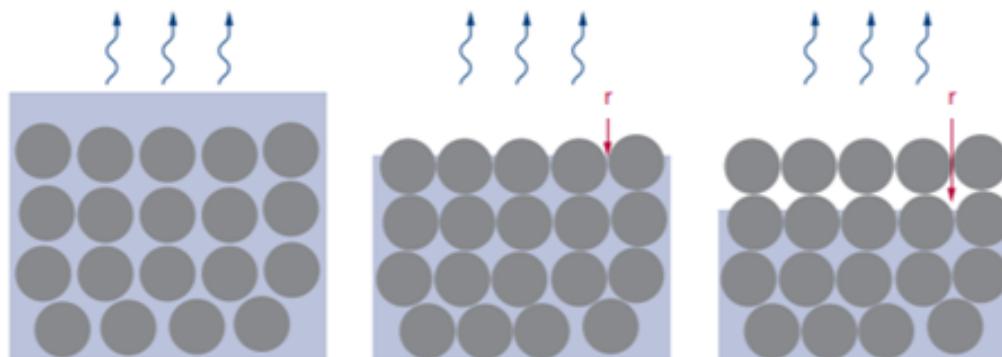
Après prise:      Retrait macroscopique  
ou apparent                  <<              Retrait chimique



## 3.4. Retrait plastique

Il dû à l'évaporation de l'eau de la surface libre du béton frais après sa mise en place.

Il peut conduire à la formation de fissures superficielles qui n'atteignent que quelques millimètres ou centimètres de profondeur.



Phase 1

L'eau de ressuage s'évapore à la surface du béton frais. La quantité d'eau évaporée est comparable à celle issue d'une évaporation d'eau libre, mais plus petite que la quantité d'eau ressuée.

Phase 2

Si l'évaporation dépasse la quantité d'eau ressuée à la surface, le niveau d'eau s'abaisse jusqu'au niveau des particules solides. Les particules solides se rapprochent jusqu'à ce qu'elles se touchent. Les tensions capillaires ( $r$ ) se développent en bordure.

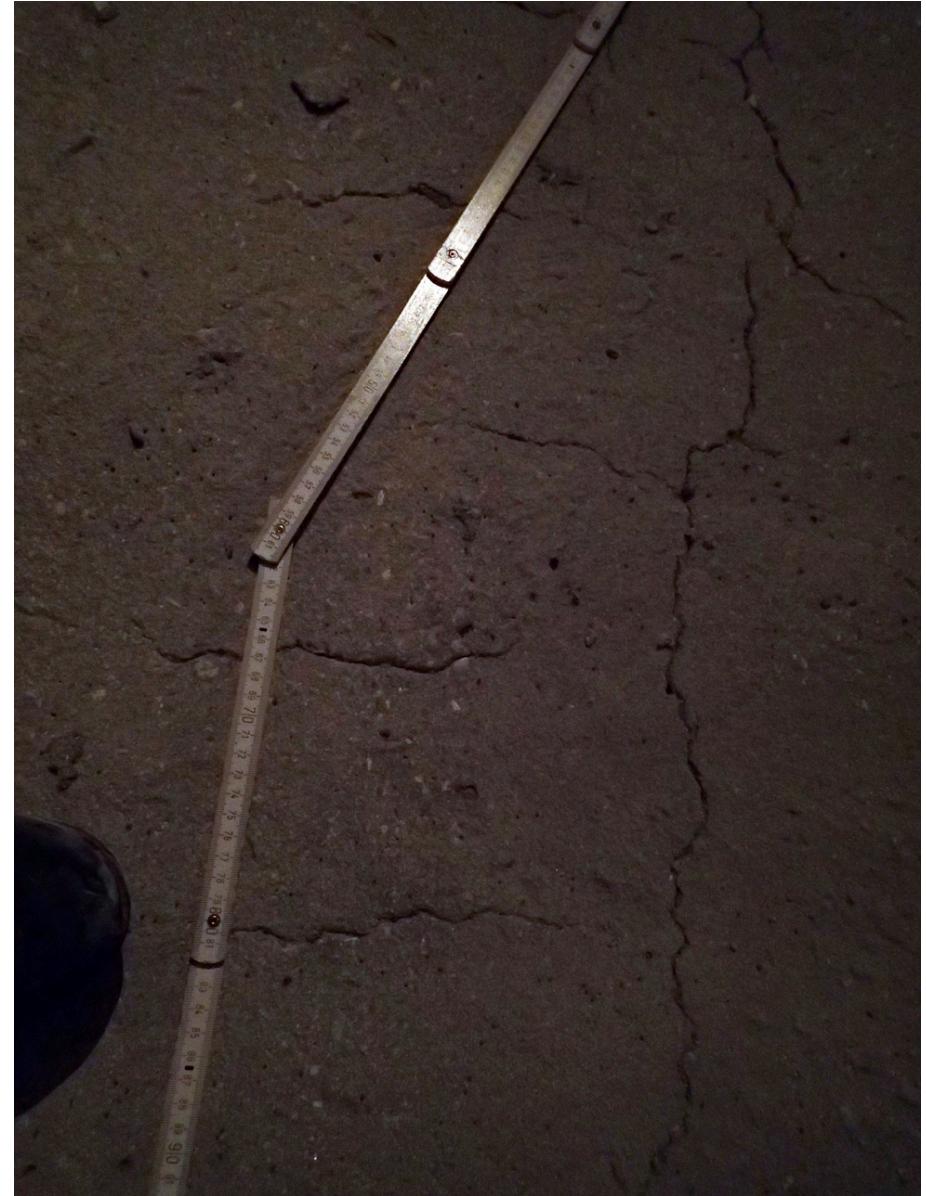
Phase 3

Au fur et à mesure de l'évaporation, le niveau d'eau s'enfonce dans le béton et atteint d'autres particules qui ne peuvent plus s'approcher les unes des autres. Les tensions capillaires augmentent et peuvent conduire à la formation de fissures (voir chapitre 8.4).

Fig. 3.9.1: Les trois phases du retrait plastique. Les particules solides sont représentées de manière simplifiée par des billes.

## Dalle de garage: retrait plastique couplé à un tassement du béton frais

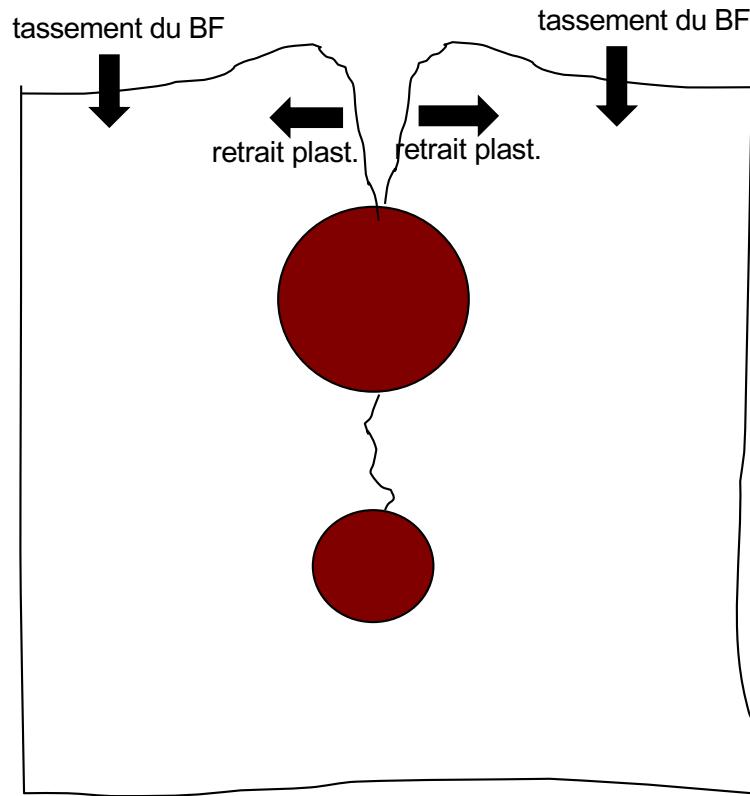
---



## Dalle de garage: retrait plastique couplé à un tassement du béton frais

### Cause de la fissuration:

- réduction de la section de béton par la superposition des barres d'armatures (contrainte locale supérieure)
- forte section de barre (22 mm) et faible enrobage 24mm
- évtl. vibrage excessif du béton



## 3.5. Retrait de dessication

---

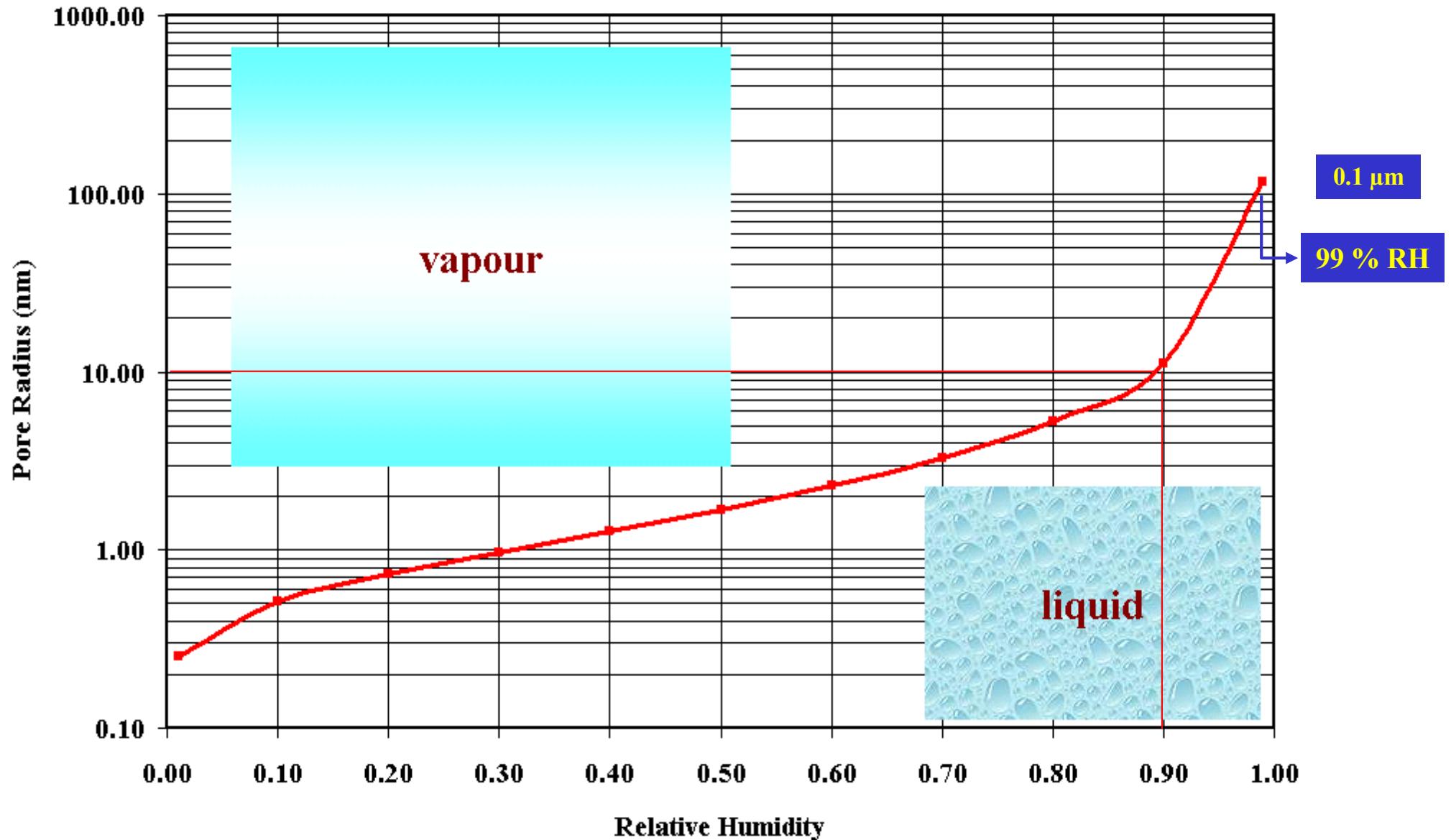
Il se produit par diffusion de l'eau vers les surfaces en présence d'un gradient d'eau entre le béton et l'air ambiant.

Ce retrait est lent et dure plusieurs années.

Il peut avoir des conséquences importantes sur le comportement statique de la structure.

$$R_{pK} = -\rho_1 \cdot \frac{M}{RT} \cdot (2 \cdot \sigma(T) \cdot \cos \beta) \cdot \frac{1}{\ln(HR)}$$

---



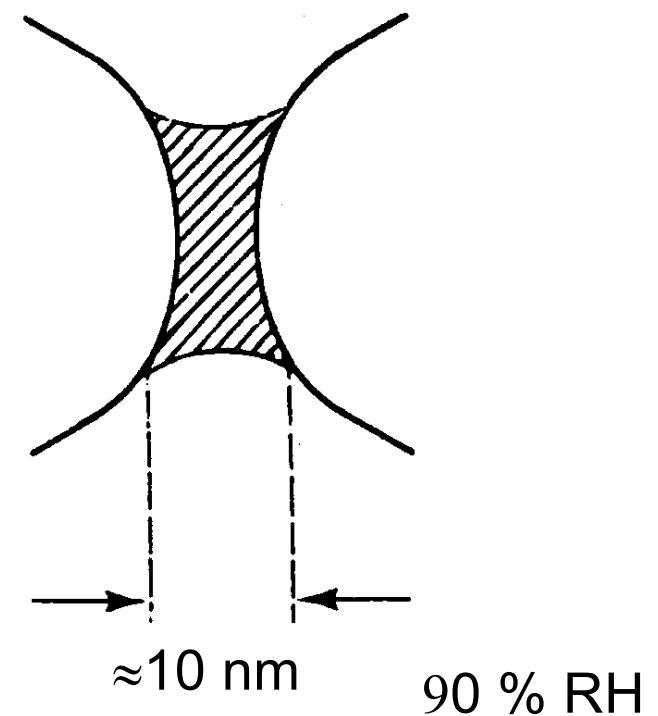
# L'origine du retrait de dessiccation

---

$$\Delta P = \frac{2\sigma \cos \alpha}{r}$$

$$r = 10 \text{ nm} \quad \Delta P = 10 \text{ MPa}$$

sechage



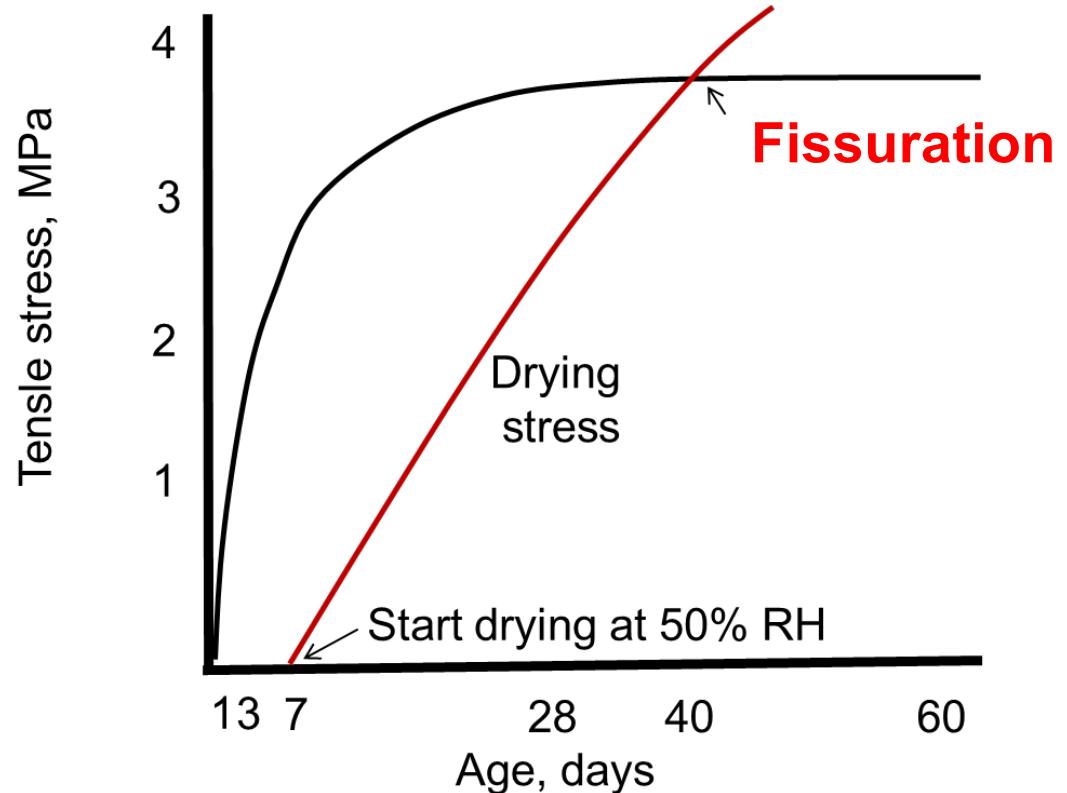
Les forces de ménisque dans les pores capillaires

## 4. Fissurations dues au retrait

---

Les changements de volume vu précédemment créent des contraintes de traction dans le matériau.

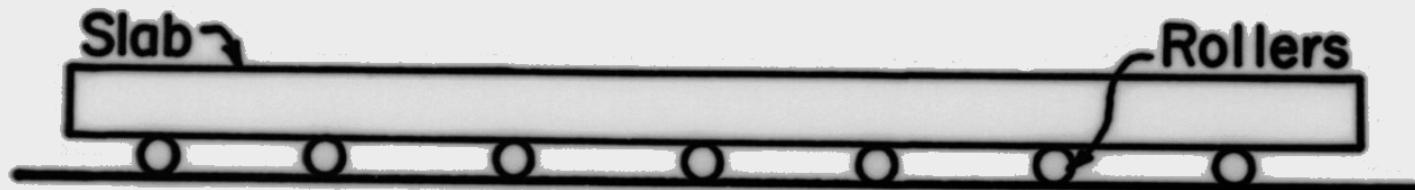
Si ces contraintes sont plus importantes que la limite de rupture du béton, il y a rupture du matériau, ce qui se traduit par des fissures.



## 4. Fissurations dues au retrait

---

### SHRINKAGE AND CRACKING



**Shrinkage + Freedom to move = No cracks**



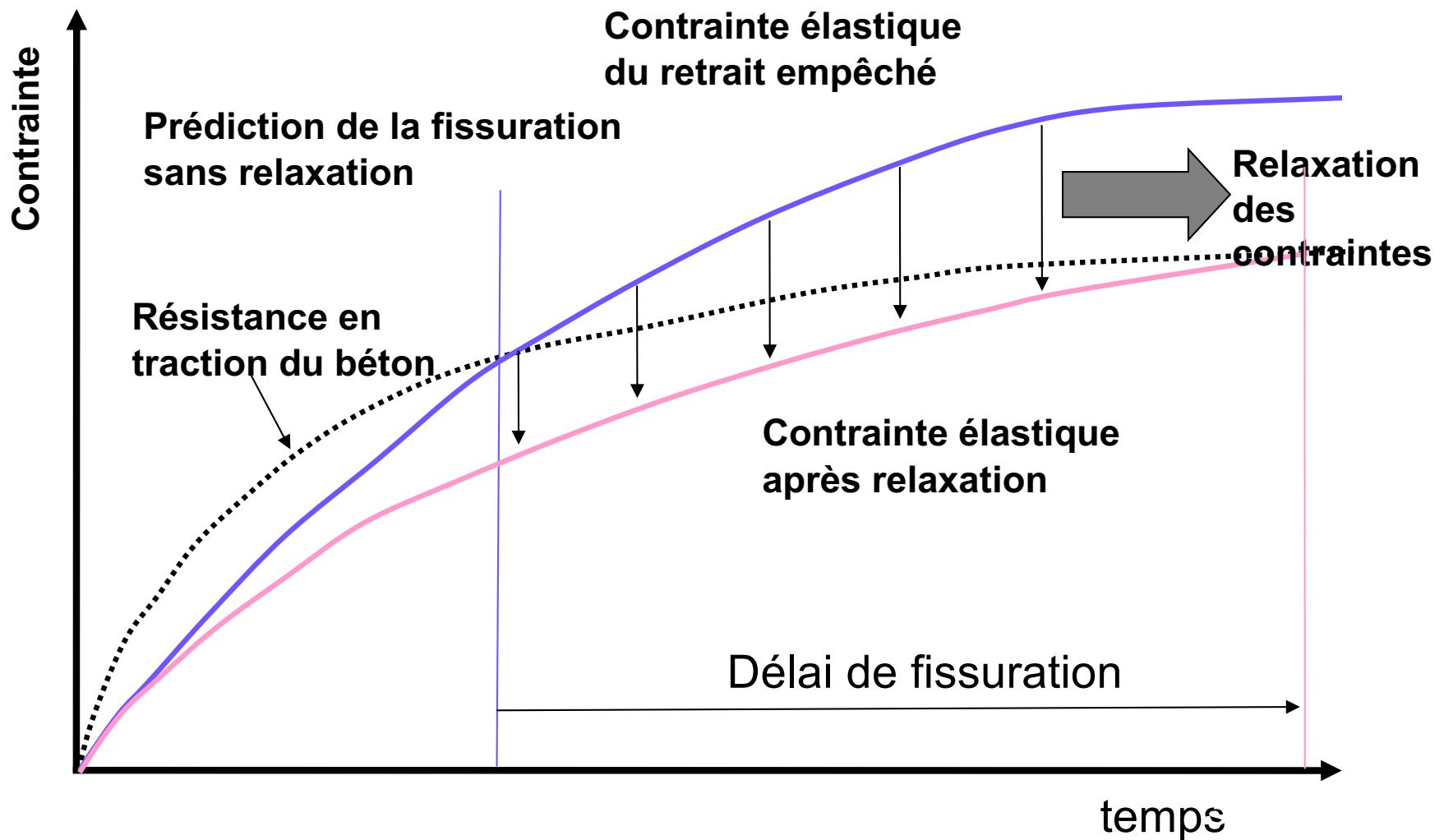
**Shrinkage + Subbase restraint = Cracks**

**Les changements de volume sans restrictions ne provoqueraient pas de rupture !**



# 4. Fissurations

La *relaxation* peut mitiger les effets de retrait



# 4. Fissurations

---

Le retrait est la première cause de fissurations non-structurales

4.1. Influence des paramètres externes

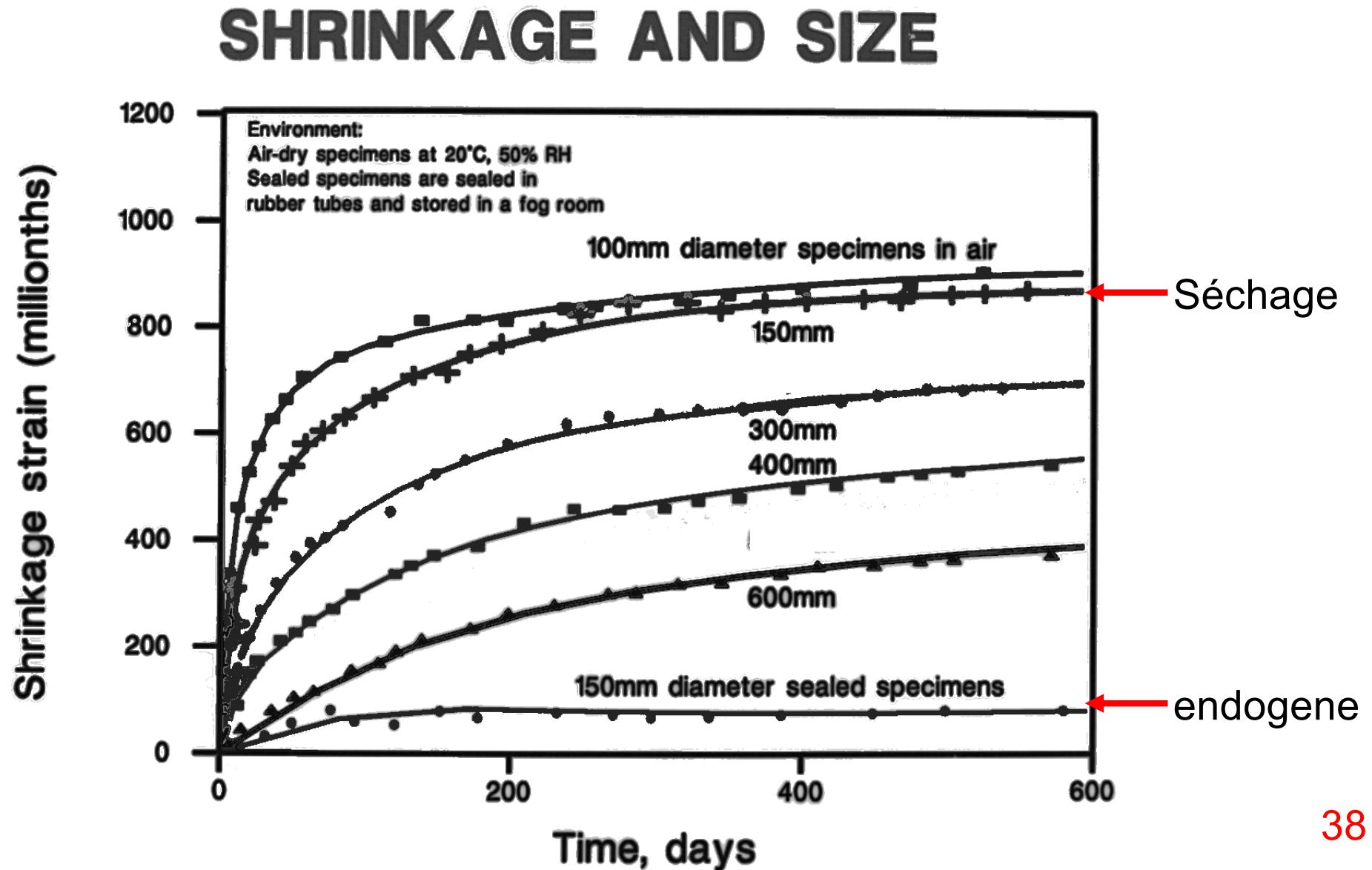
4.2. Influence des paramètres internes

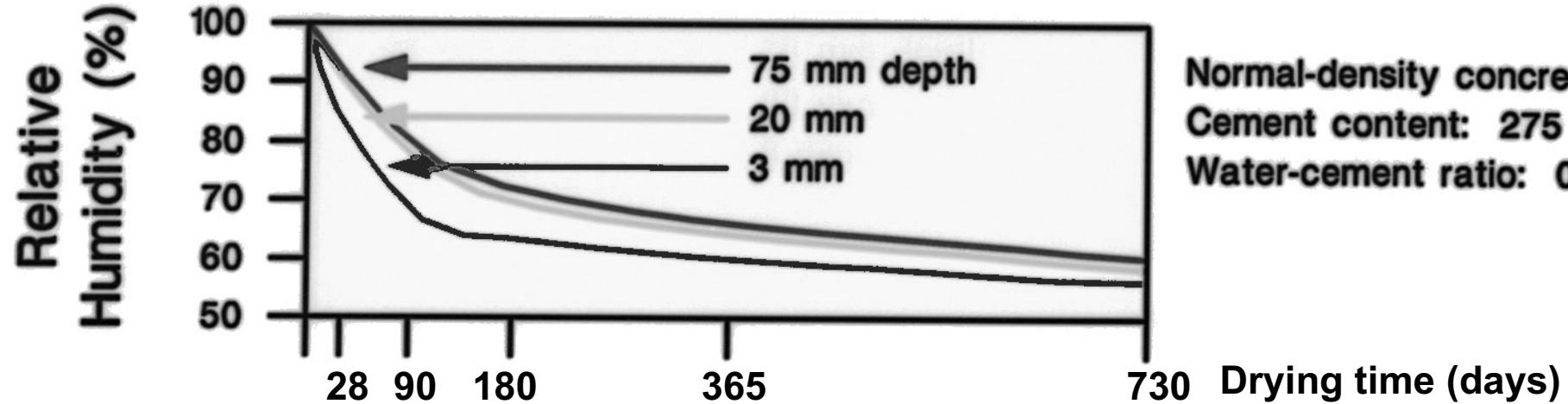
## 4. Influence des paramètres externes

---

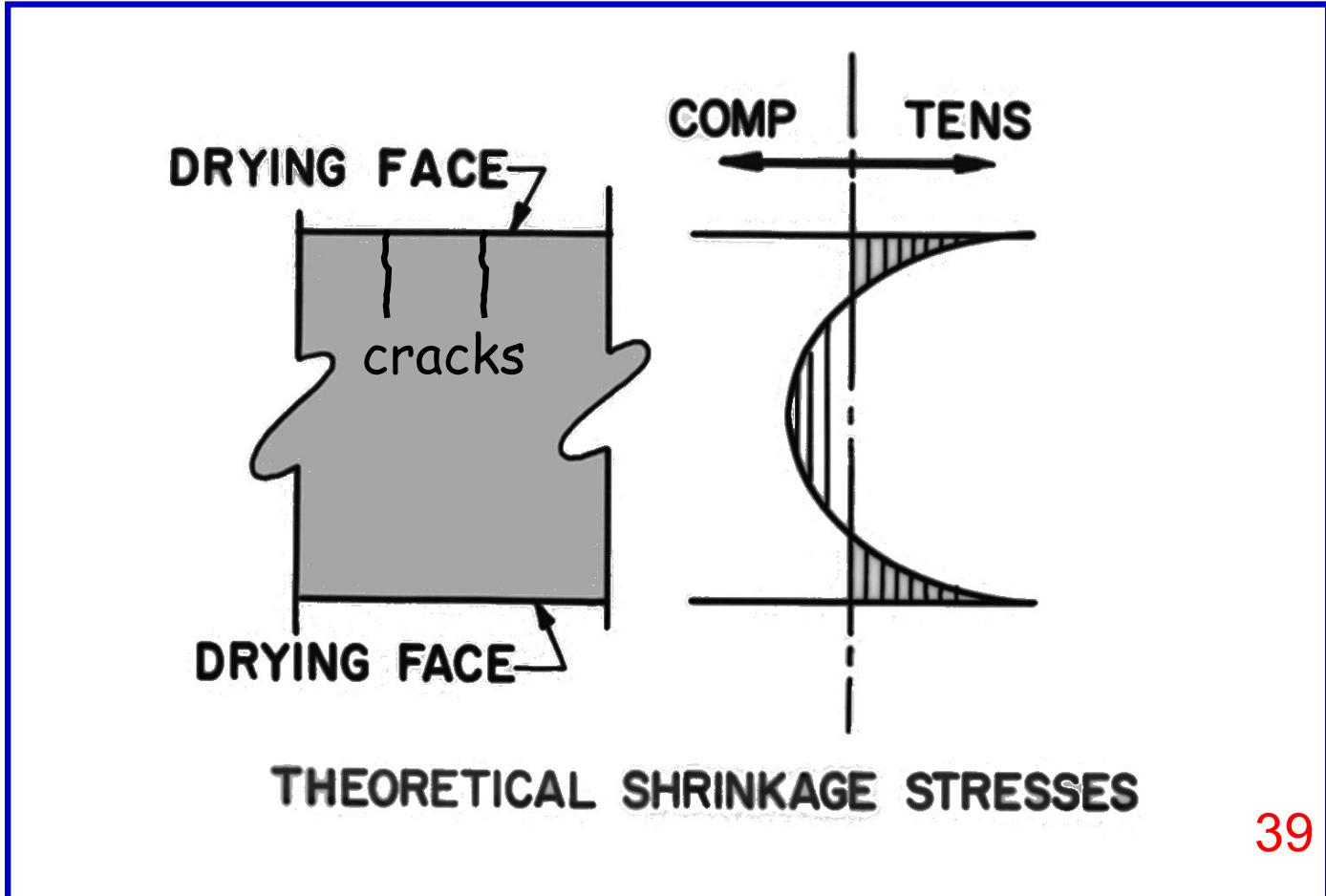
- Température ambiante
- Humidité relative
- Vitesse du vent
- Taille de la structure/ spécimen

## 4. Influence des paramètres externes





Le béton ne sèche pas uniformément, l'eau s'évapore d'abord à la surface. Le retrait de la surface est empêché par le béton du cœur et il en résulte des tractions à la surface



## 4.2. Influence des paramètres internes

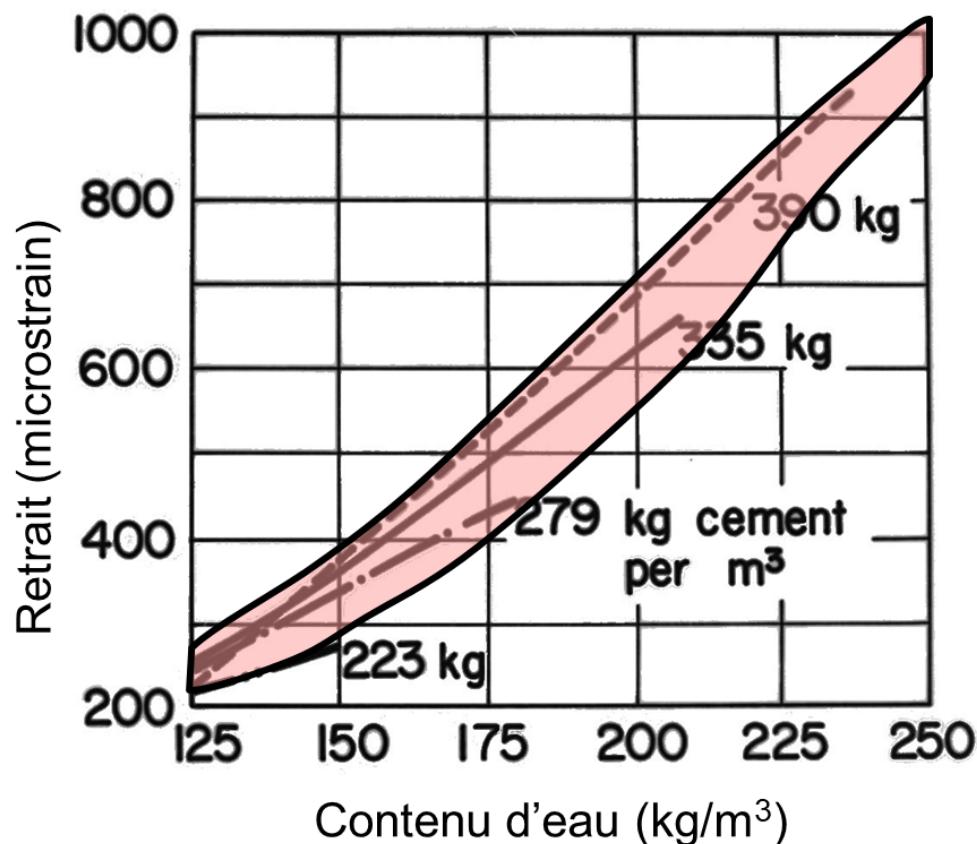
---

- Composition du ciment

## 4.2. Influence des paramètres internes

---

- Rapport eau/ciment



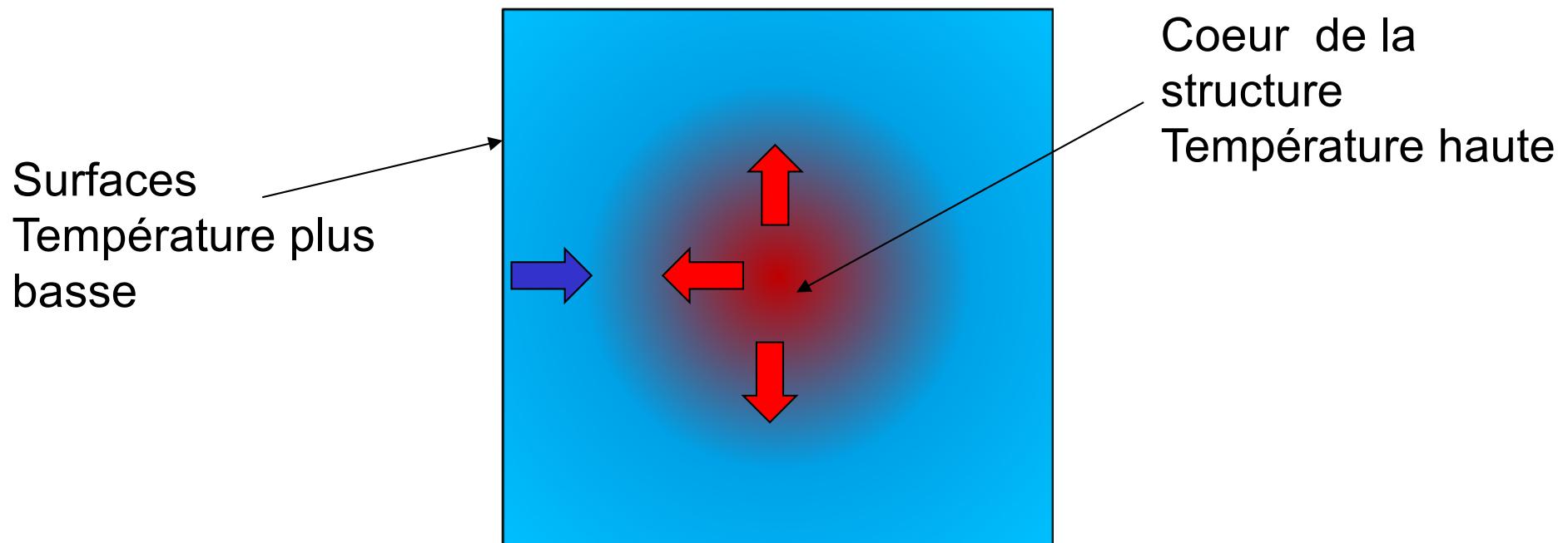
Pour réduire cet effet:

- adjonction de produits chimiques (ex. réducteurs d'eaux ou super-fluidifiants)
- Courbe granulométrique appropriée
- L'utilisation de granulats bien arrondis avec une gamme granulométrique étendue au maximum permet de réduire la teneur en eau.

# 4. Retrait thermique

---

- L'hydratation du ciment génère de la chaleur
- Le béton (comme la plupart des matériaux) gonfle quand la température augmente et diminue en volume quand elle diminue.

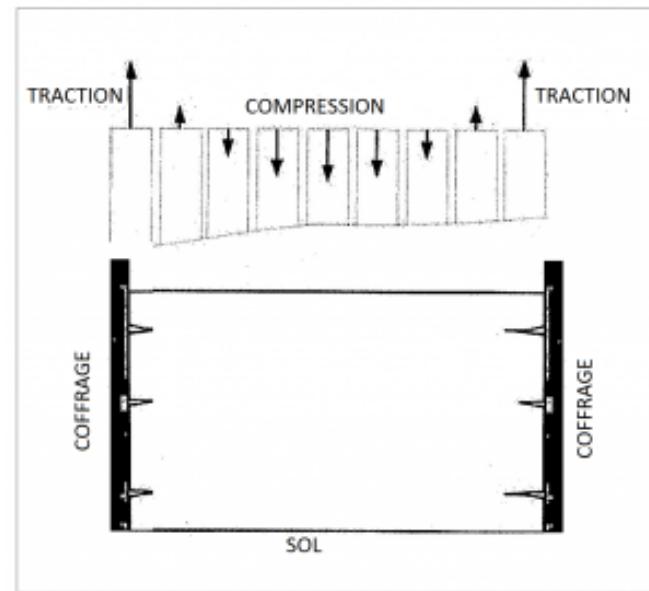
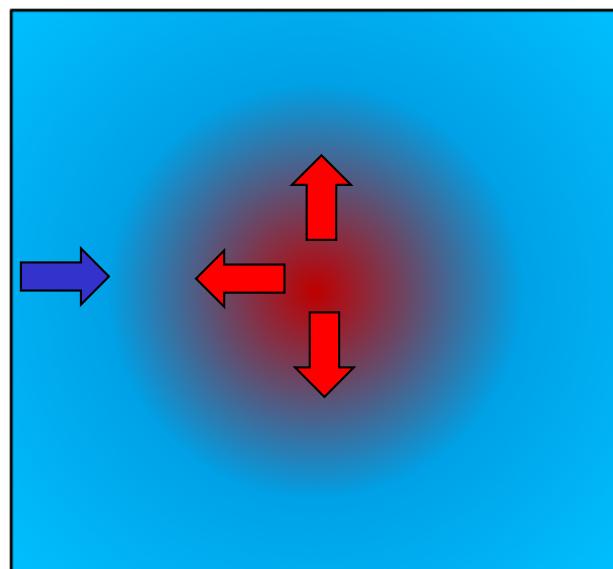


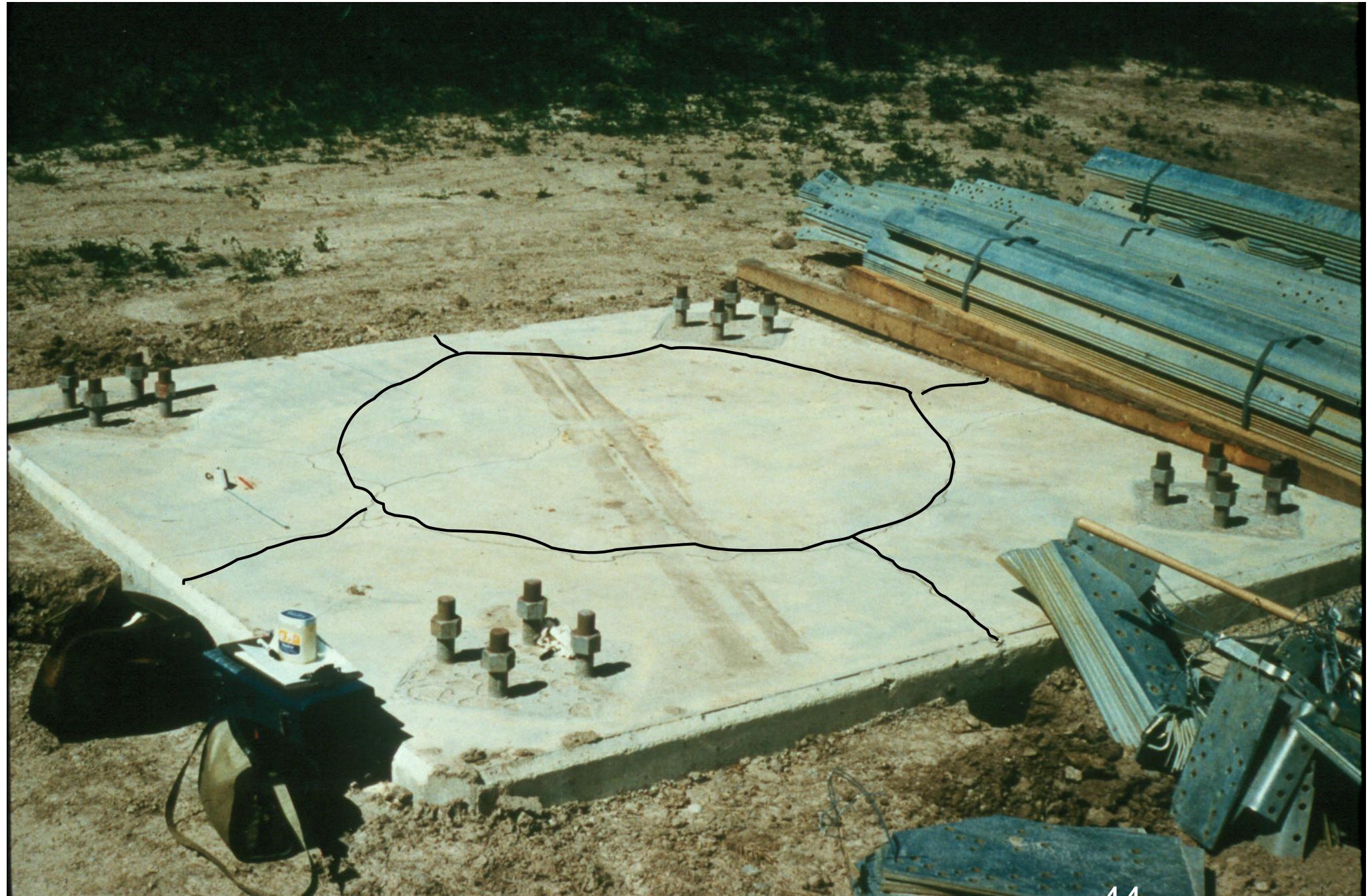
### 3.3. Retrait thermique

---

- Les effets de température peuvent poser problème dans les structures massives (au cœur desquelles les hausses de température sont significatives).
- Les régions proches de la **surface refroidissent plus vite**, sont soumises au **retrait** qui est empêché par le cœur, et par conséquent sont vulnérables à la fissuration.

retrait





44

### 3.3. Retrait thermique

---

- Les fissures dues au gradient de température apparaissent dans les premiers jours après la mise en place du béton frais.
- On les trouve dans les structures massives



### 3.3. Retrait thermique

---

#### Exemple

Coefficient thermique d'expansion,  $\alpha = 10^{-5}$  par °C

$\Delta T$ (du à l'hydratation) = 15 °C

$$\varepsilon = \alpha \Delta T = 1.5 \times 10^{-4}$$

$$E = 20 \text{ GPa}$$

$$\sigma = E \varepsilon = 3 \text{ MPa} > f_t$$

Mais il y a relaxation\* – il faut éviter que  $\Delta T > 20^\circ\text{C}$

\* nous y reviendrons

### 3.3. Retrait thermique

---

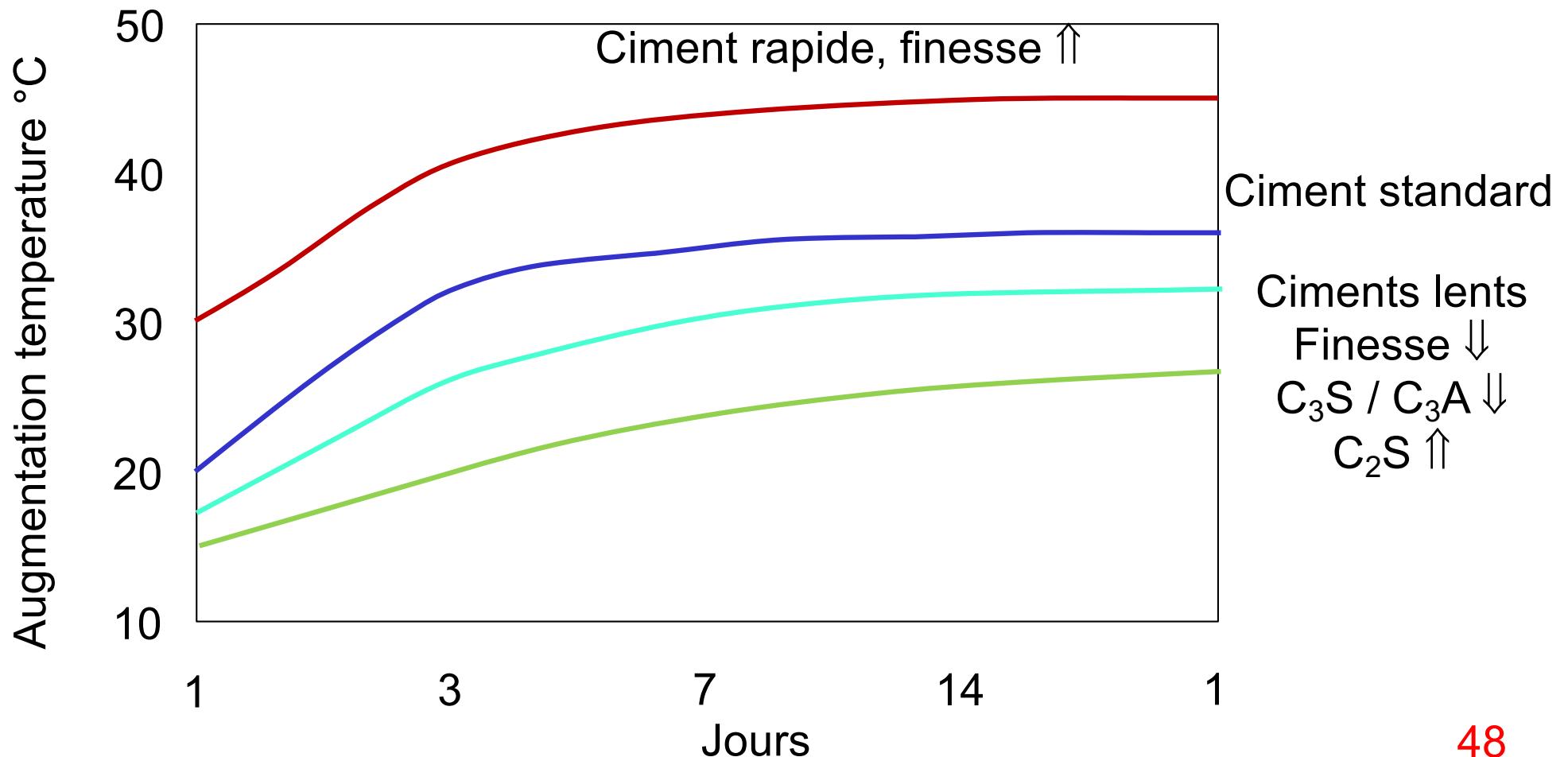
Il y a plusieurs façons de réduire le gradient thermique:

#### **1/ A l'étape du mélange**

- Réduire le contenu du ciment – bonne granulométrie des granulats
- Utiliser les pouzzolanes ou des fillers
- Utilisation d'un ciment à basse chaleur d'hydratation
- )

### 3.3. Retrait thermique

---



# 3.3. Retrait thermique

---

## 2/ A l'étape de la mise en place

- Réduire la température du béton frais (ex. eau glacée)
- Réduire la masse du béton de chaque gâchée
- Installer des tuyaux pour refroidir les membres
- Isolation du coffrage (réduire le gradient de grands éléments)
- Coffrage métallique (évacuation de la chaleur pour les petits éléments)





# 4. Fluage

---

Fluage:

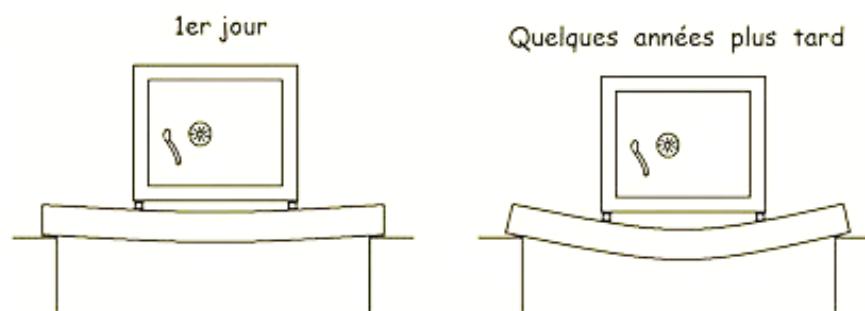
Déformation à contrainte constante

Relaxation:

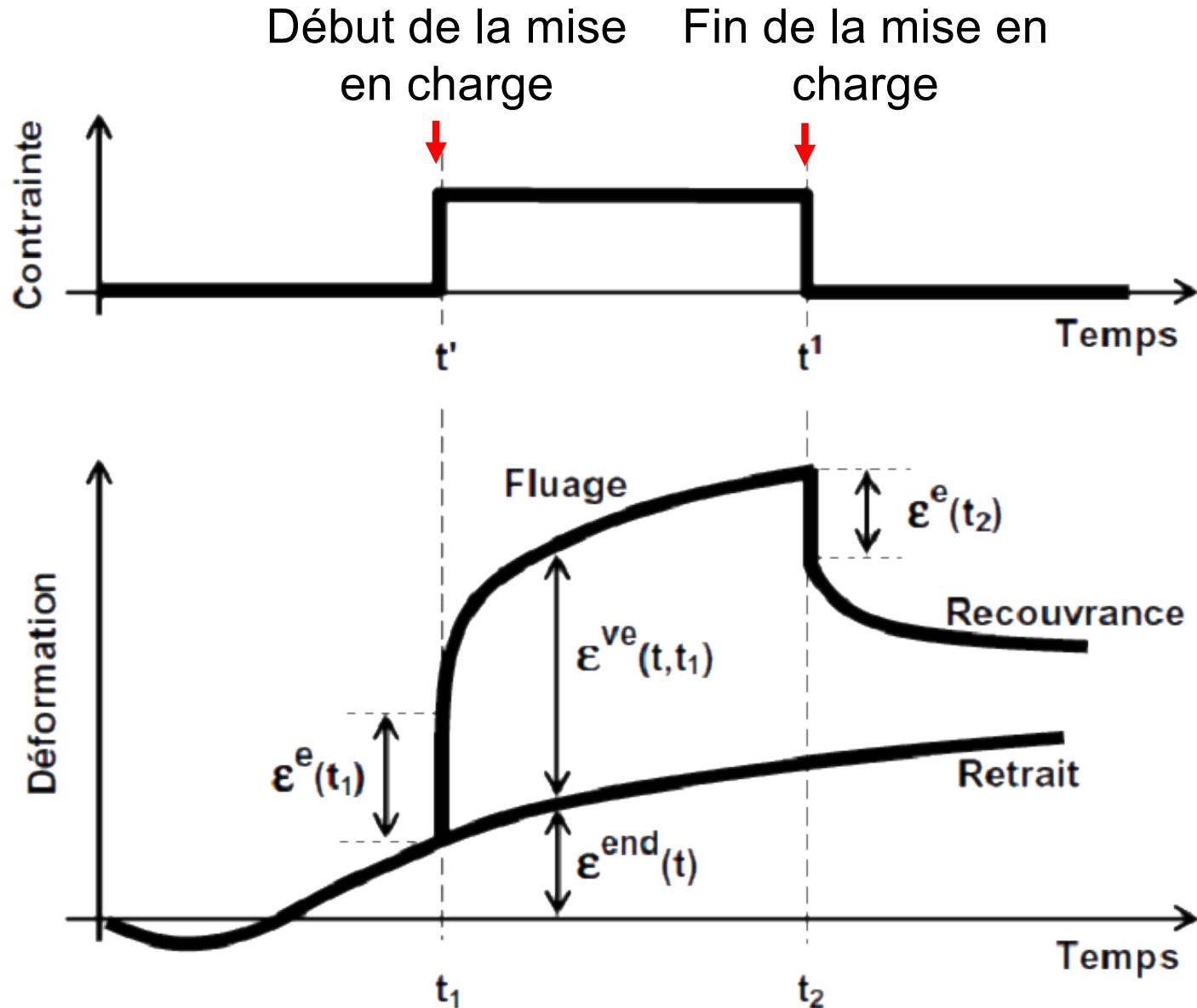
Diminution de contrainte à déformation constante (restraint)

Fluage de base (basic creep):

Sans échange d'eau avec l'environnement (sans séchage)



## 4. Fluage



## 4. Fluage

---

Pourquoi tenir compte du fluage ?

- Le fluage peut provoquer des déformations considérables des ouvrages (2 à 3 fois la déformation instantanée en 3 ans).
- Il est la cause principale des pertes de précontrainte dans les éléments structuraux (relaxation).
- Il est à l'origine de l'atténuation des contraintes maximales (relaxation) d'où l'économie de matière.

## 4. Fluage: Mécanismes

---

Hypothèses:

- L'origine du fluage est dans la pâte de ciment.
- Le mécanisme exact n'est pas connu
- Le rôle de l'eau est très important
- On pense que l'eau "lubrifie" les contacts entre les hydrates

# 4. Fluage: Mécanismes

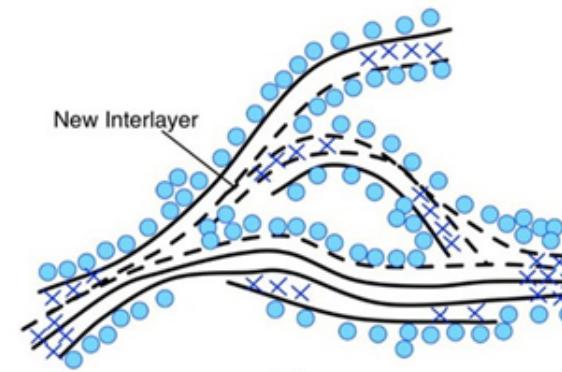
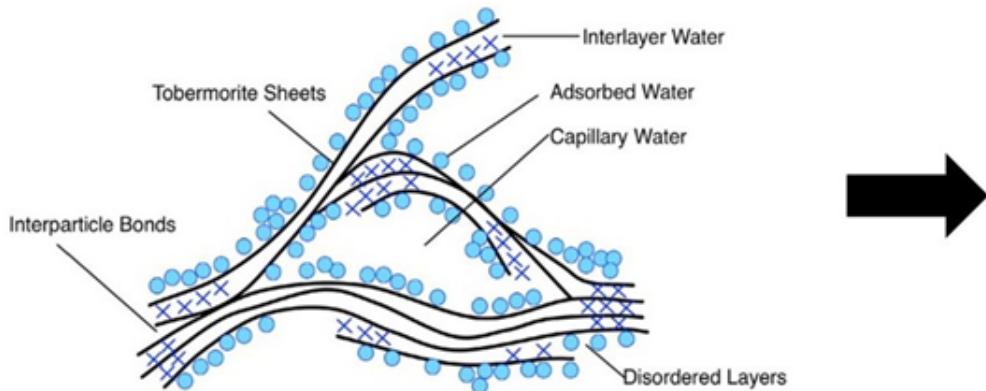
## HYPOTHESE

C-S-H Avant fluage

Après fluage

## Charge

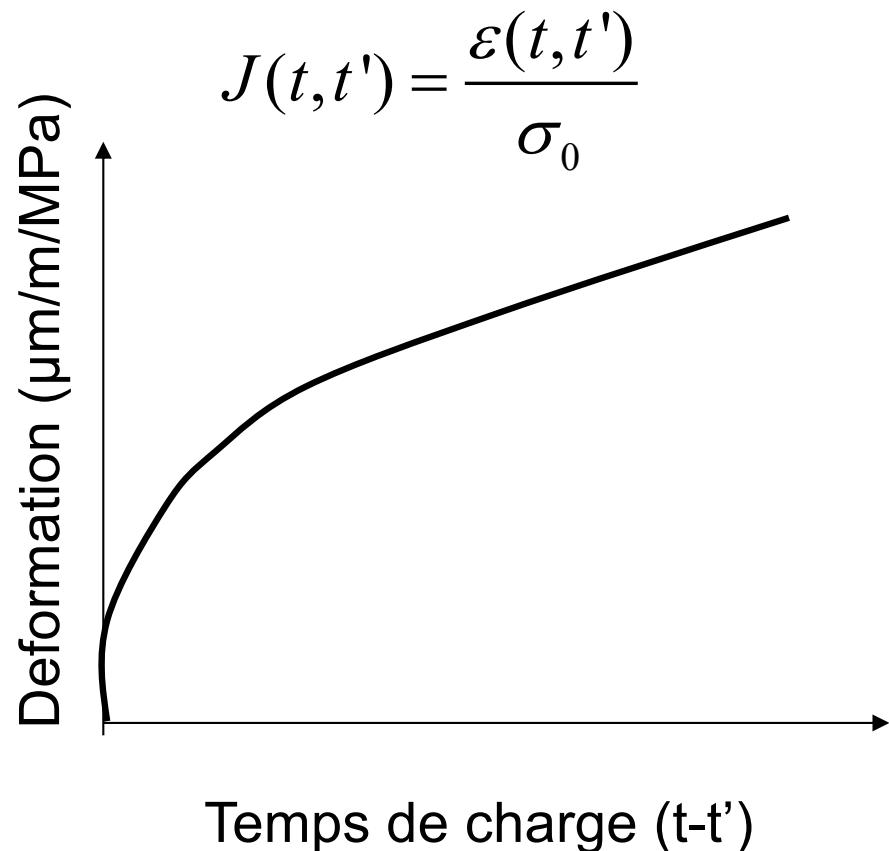
Feldmann  
model of  
C-S-H



# 4. Fluage

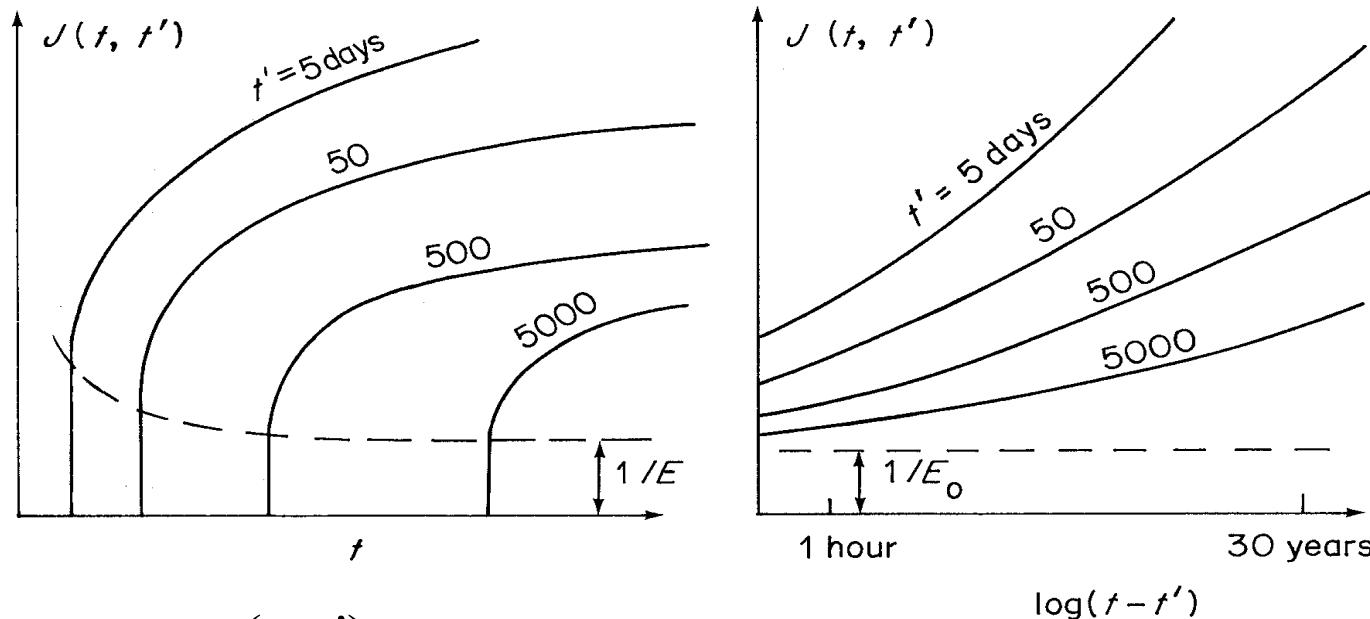
---

Comment le mesurer?



# 4. Fluage

## L'importance de l'âge à la mise en charge



$$J(t, t') = \frac{\varepsilon(t, t')}{\sigma_0} : \text{fonction fluage} = \text{déformation par unité de charge}$$

$t'$  : l'âge à la mise en charge

$\sigma_0$  : charge constante

# Observations importantes :

---

- La partie instantanée dépend de l'âge à la mise en charge: vieillissement;
- La vitesse de fluage diminue avec le temps;
- Mais le fluage de base n'est pas asymptotique, il est illimité;
- Dans la pratique on prend une asymptote fictive, ex: après 1 ou 3 ans

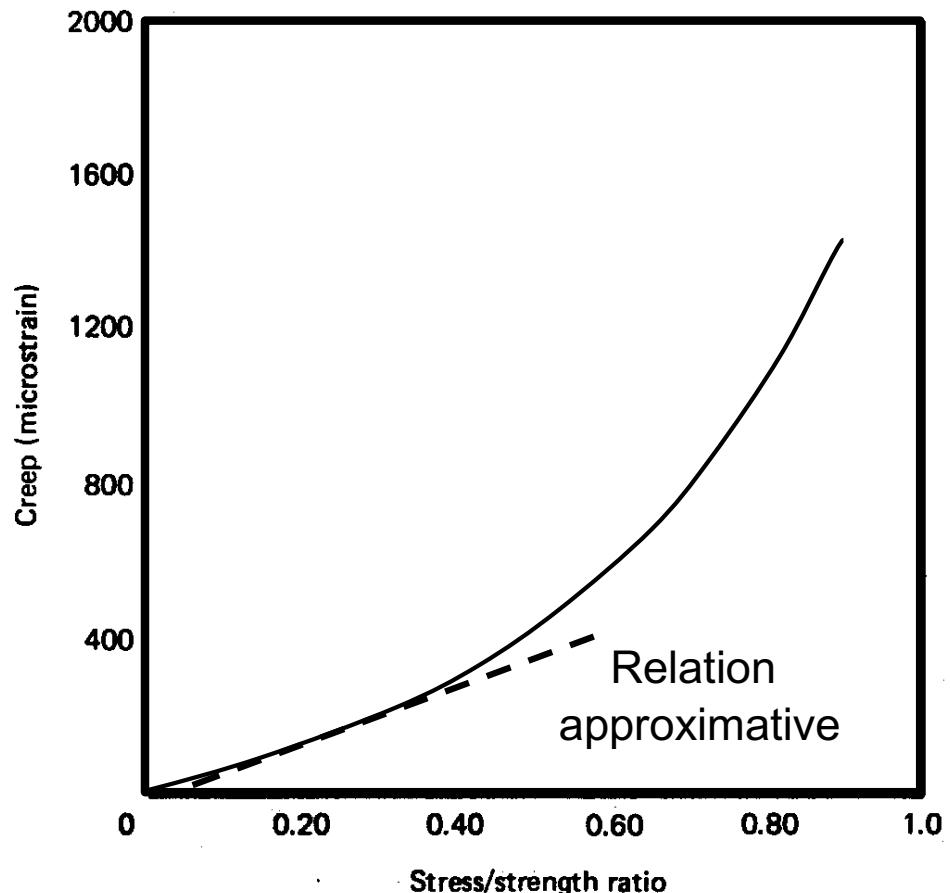
# 4. Fluage

---

Pour la gamme de contrainte normale d'utilisation

-  $\sim 0,4R_c$

La relation entre la déformation en fluage ( $\varepsilon_{fl}$ ) et la contrainte relative ( $\sigma / f'_c$ ) est presque linéaire



## 4. Fluage

---

Coefficient de fluage

$$\varepsilon_{\text{él}} + \varepsilon_{\text{fl}} = \varepsilon_{\text{él}}(1 + \varphi)$$

Coefficient de fluage

$$\varphi = \frac{\varepsilon_{\text{fl}}}{\varepsilon_{\text{él}}}$$

# Valeurs typiques:

---

«  $\varphi_\infty$  » coefficient de fluage final

Age lors de l'application de la charge	à l'air humide	à l'air sec
7 jours	2,8	3,5
14 jours	2,4	3,0
28 jours	2,0	2,5
90 jours	1,5	2,0

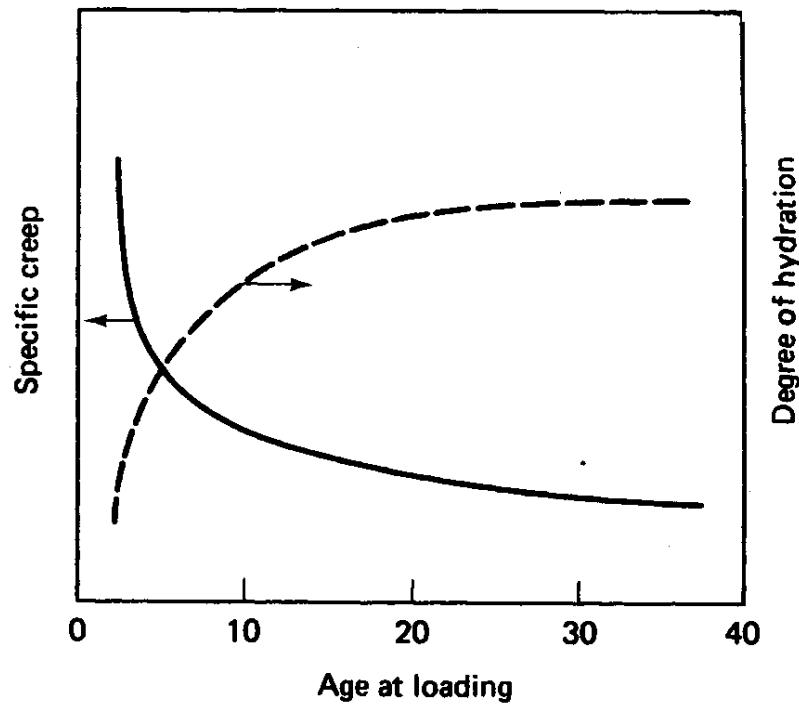
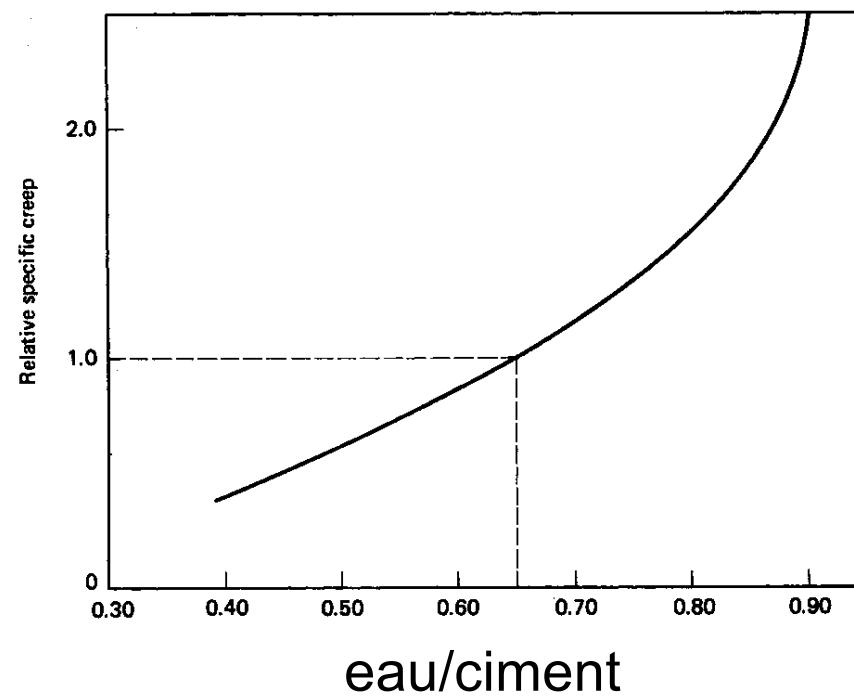
$$\varphi_{28j} = 0,4 \varphi_\infty$$

$$\varphi_{90j} = 0,6 \varphi_\infty$$

$$\varphi_{365j} = 0,8 \varphi_\infty$$

## 5.1. Effet des paramètres

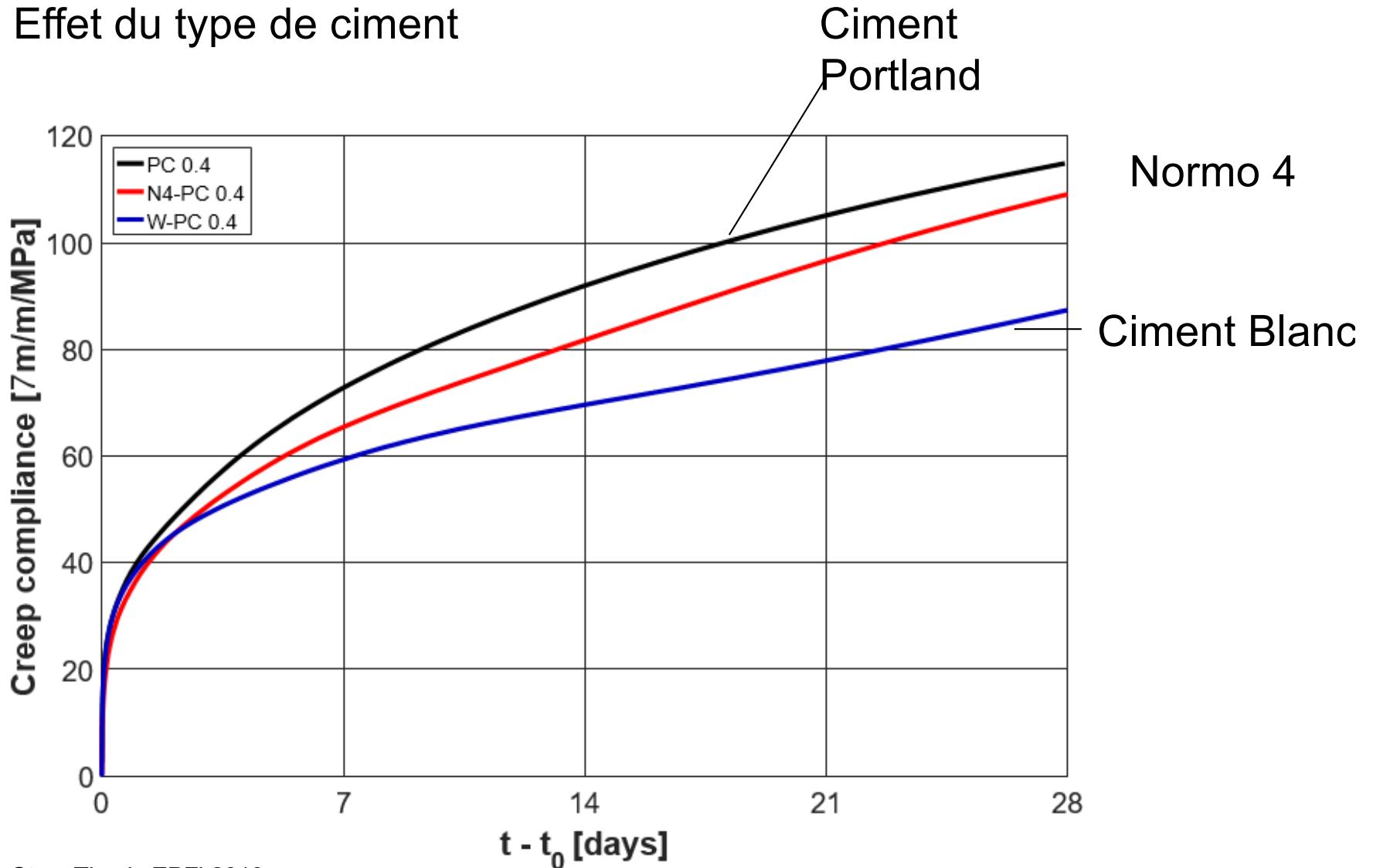
---



# 5.1. Effet des paramètres

---

Effet du type de ciment



Source: Julien Ston, Thesis EPFL 2019

## 5.1. Effet des paramètres

Ciment avec argile calcinée → moins de fluage!

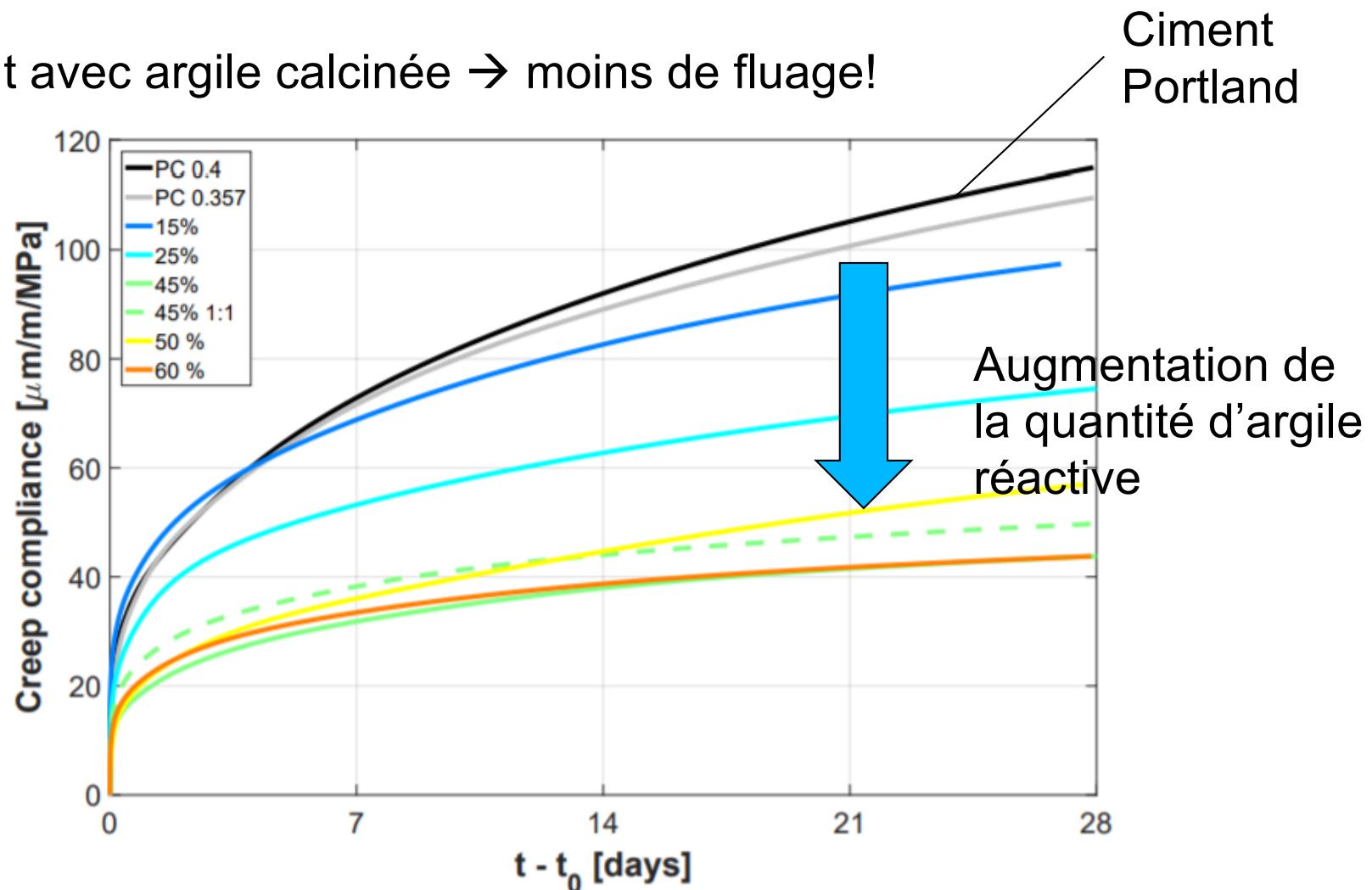


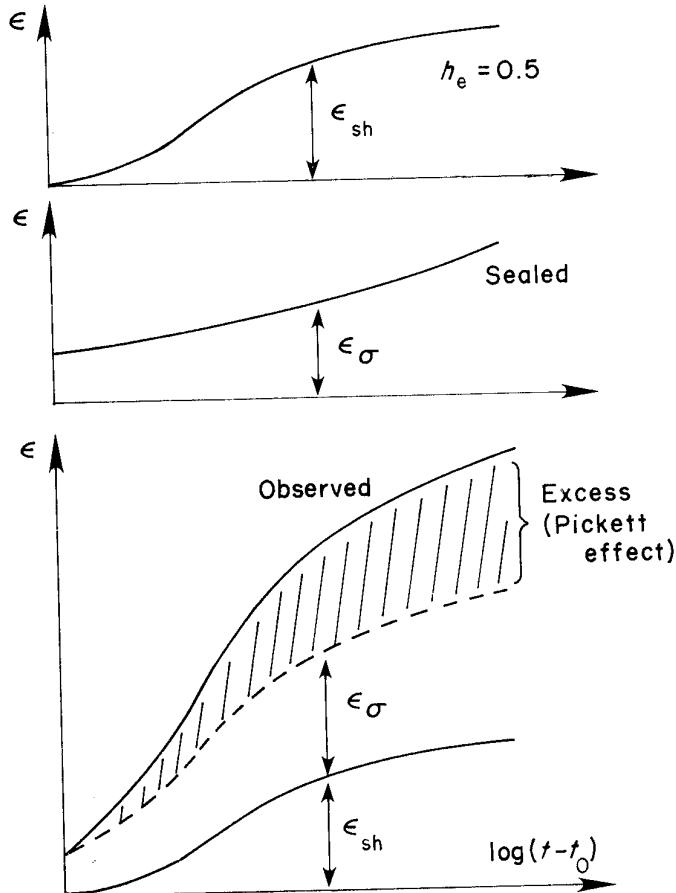
Figure 1.11 – Compressive creep compliance of the LC<sup>3</sup>-50 mixes, starting 28 days after casting.

## 6. Intéractions retrait - fluage

---

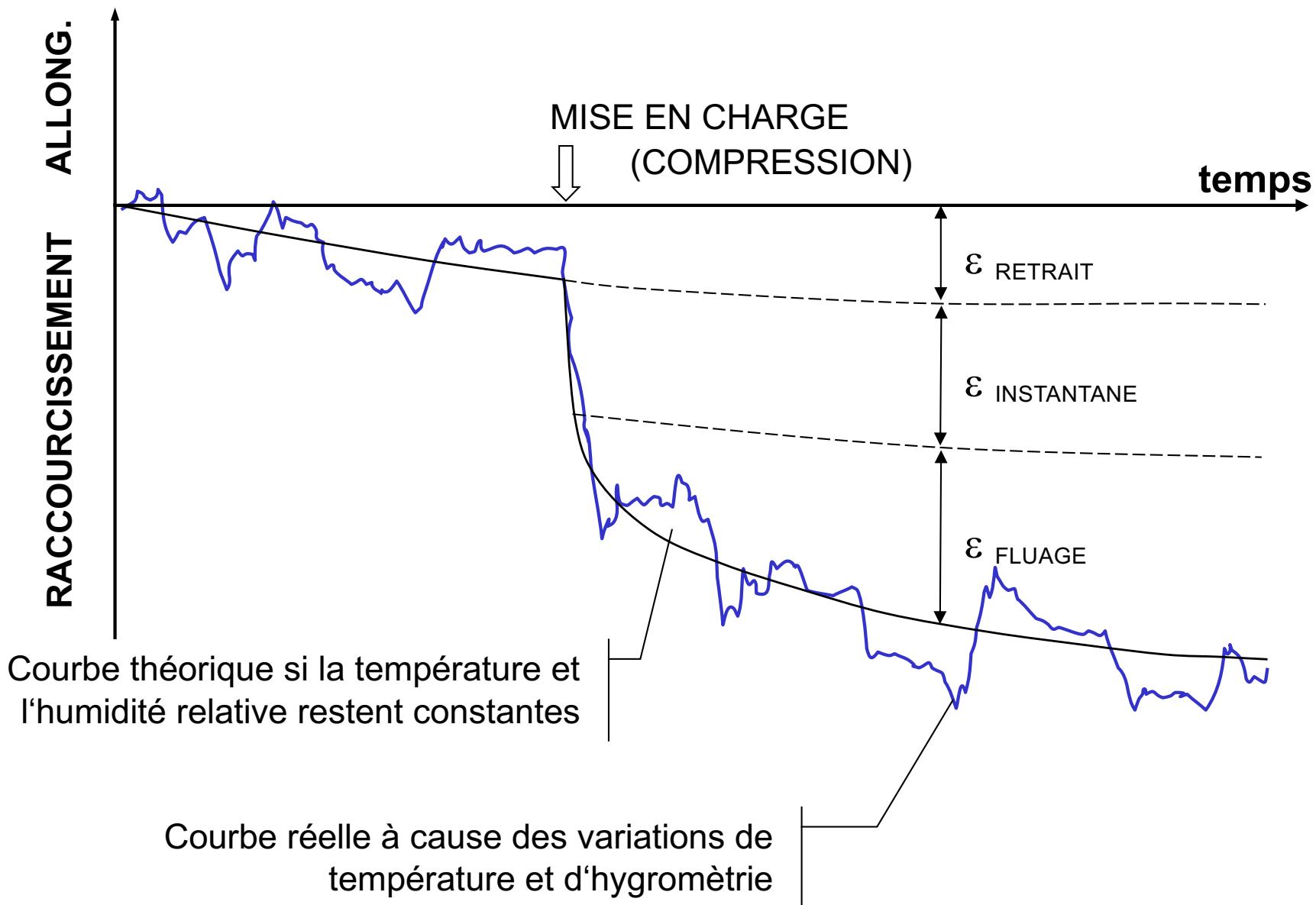
Le retrait de dessiccation et le fluage ne s'additionnent pas simplement

# Mais l'effet de retrait avec le fluage (en compression) est plus grand que la somme des deux séparés



- La charge du fluage peut accélérer le séchage; donc le retrait.
- Les contraintes induites par le séchage comme charges supplémentaires peuvent accélérer le fluage.
- A distinguer :
  - fluage total
  - fluage de base

# Interaction des effets du séchage, des charges mécaniques, et de la température



# 7. L'essentiel

---

Retrait

<http://www.geniecvl.com/le-retrait-aspect-theorique/>