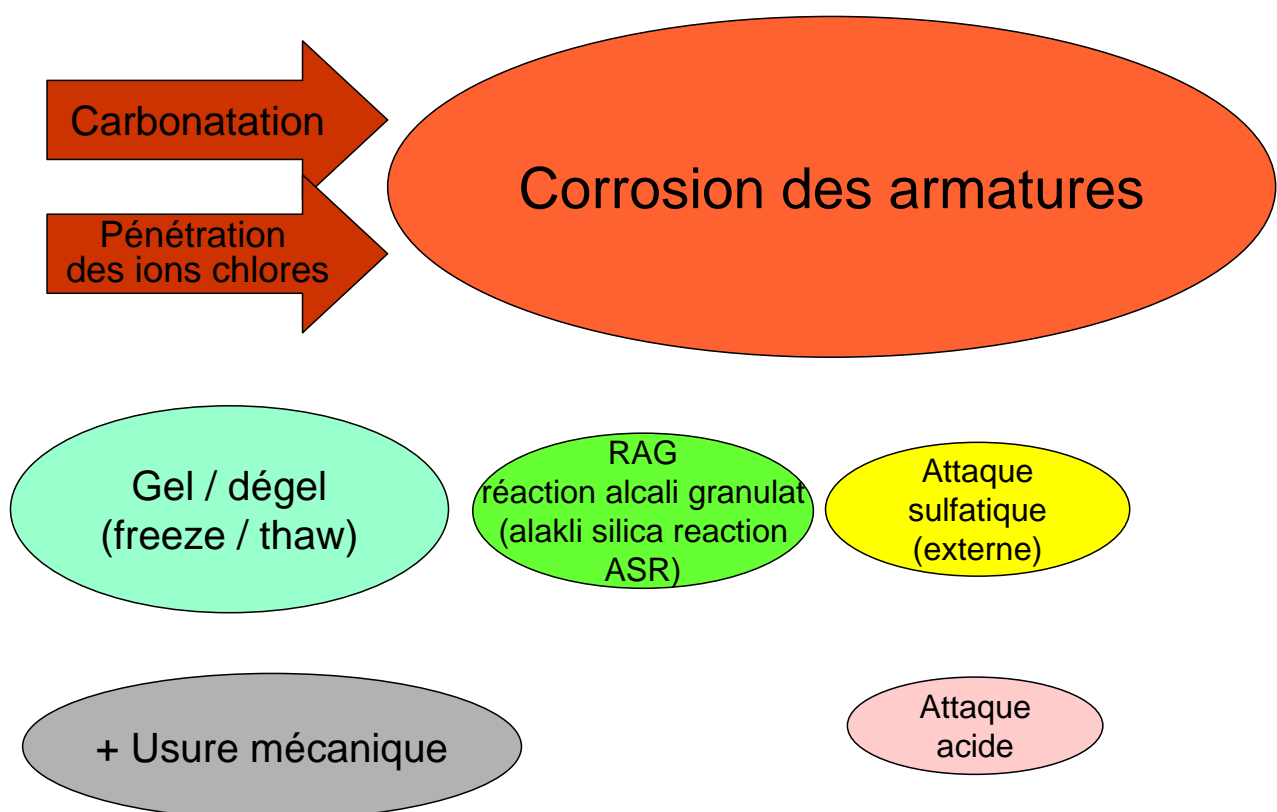
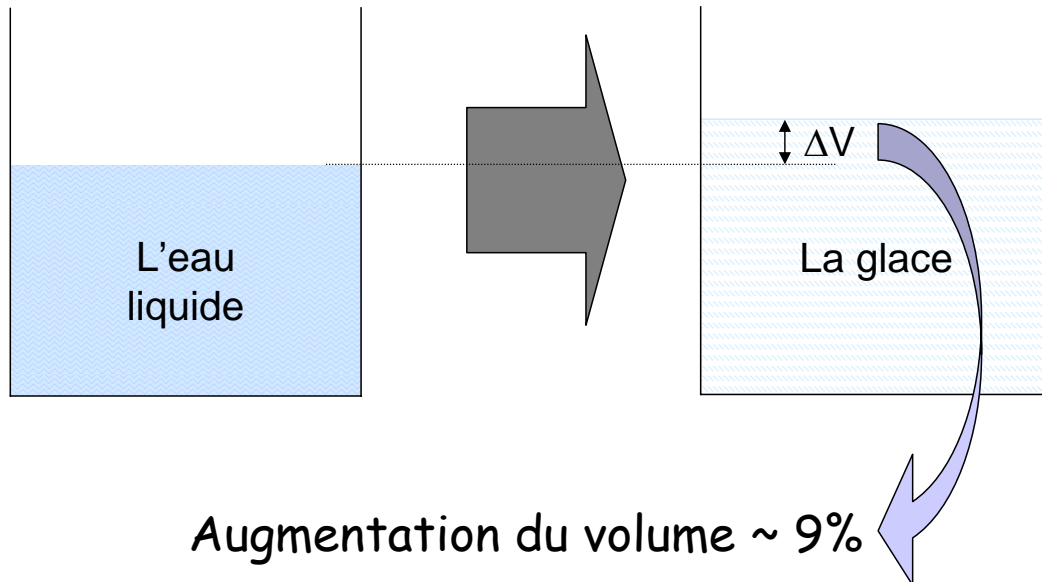


Durabilité

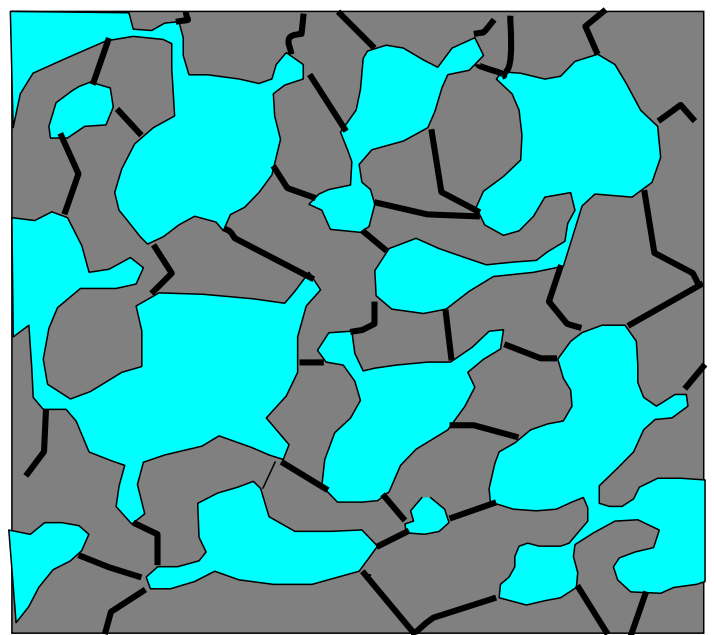
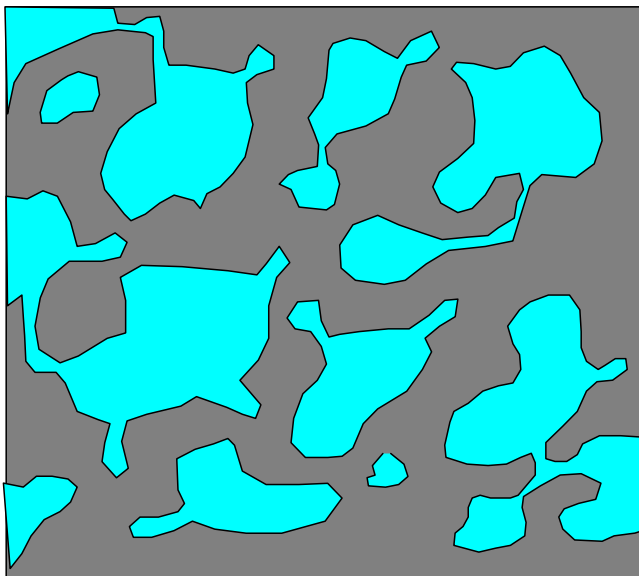
Causes de dégradation des bétons



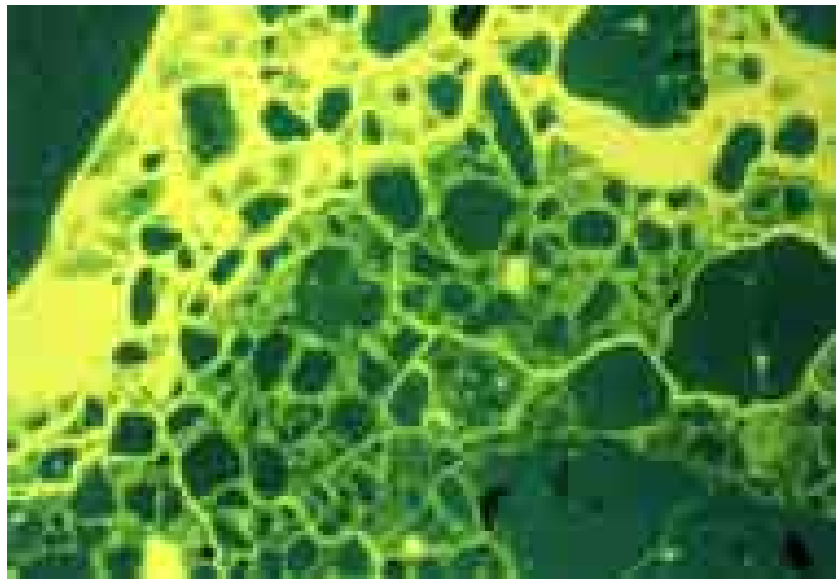
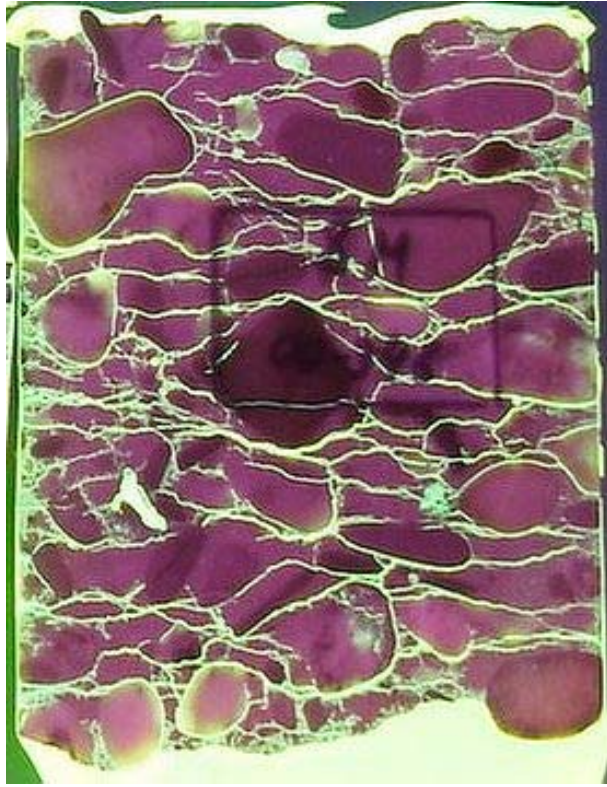
Gel Dégel



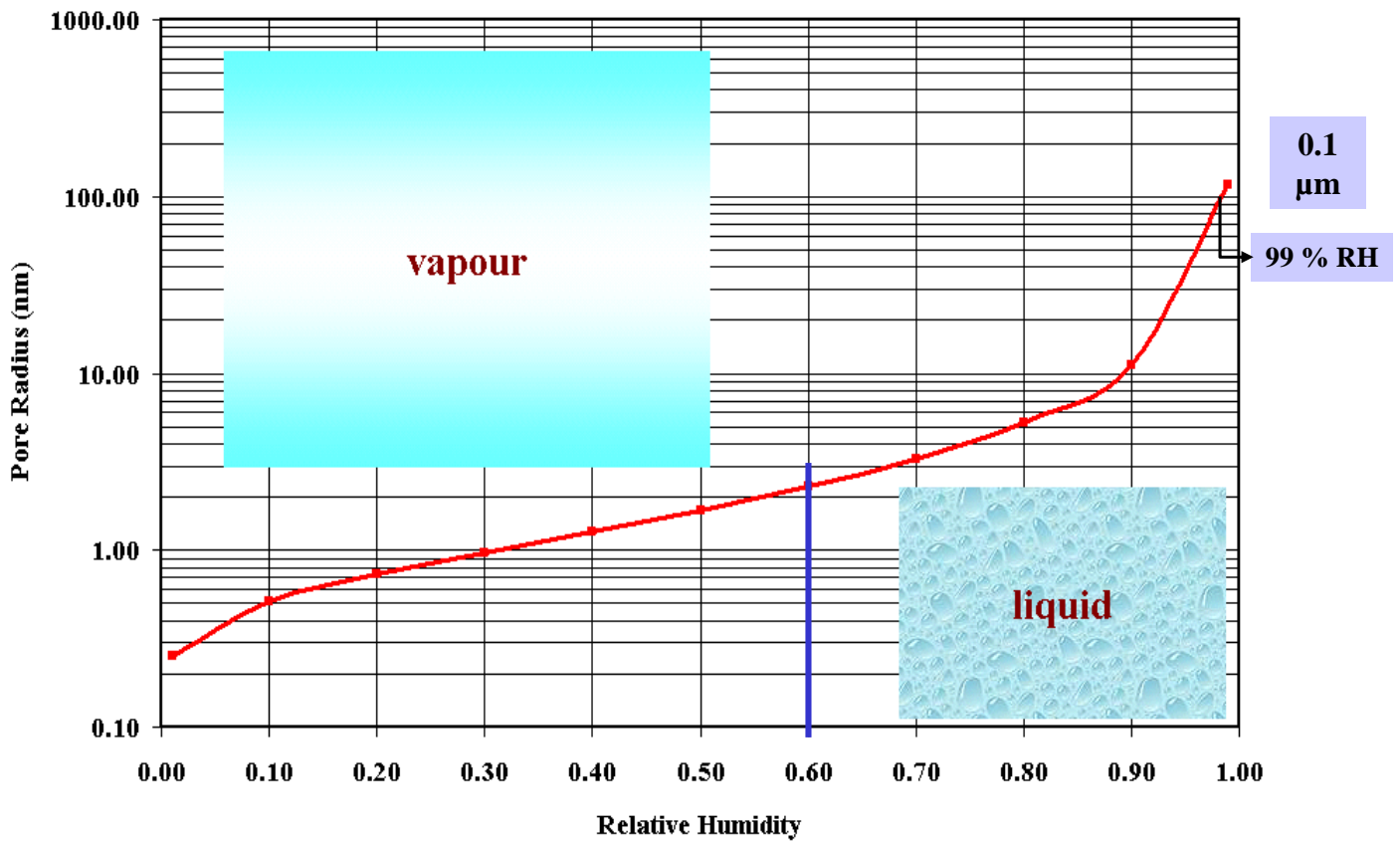
Pâte avec des pores saturés



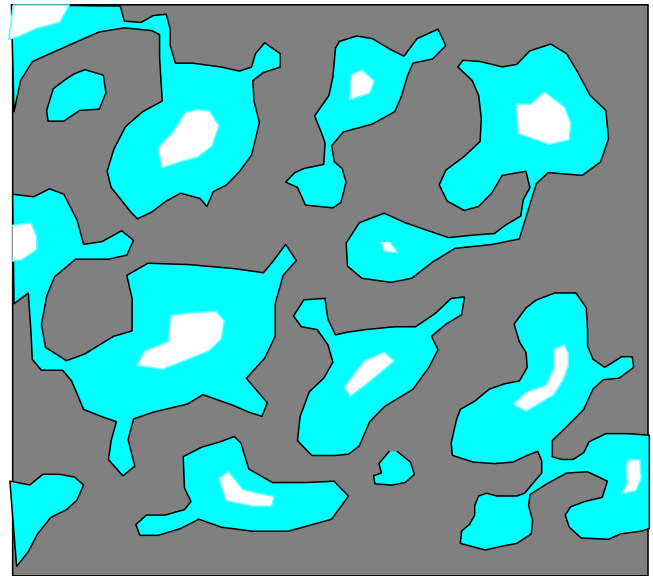
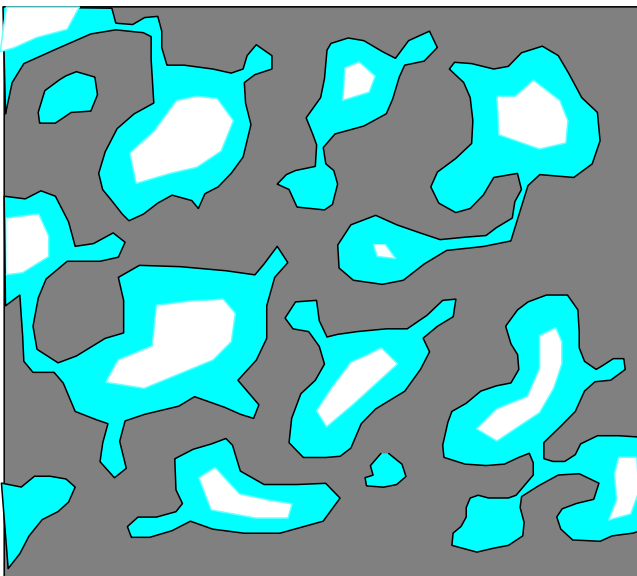
Gel = Rupture de la pâte



Loi Kelvin-Laplace

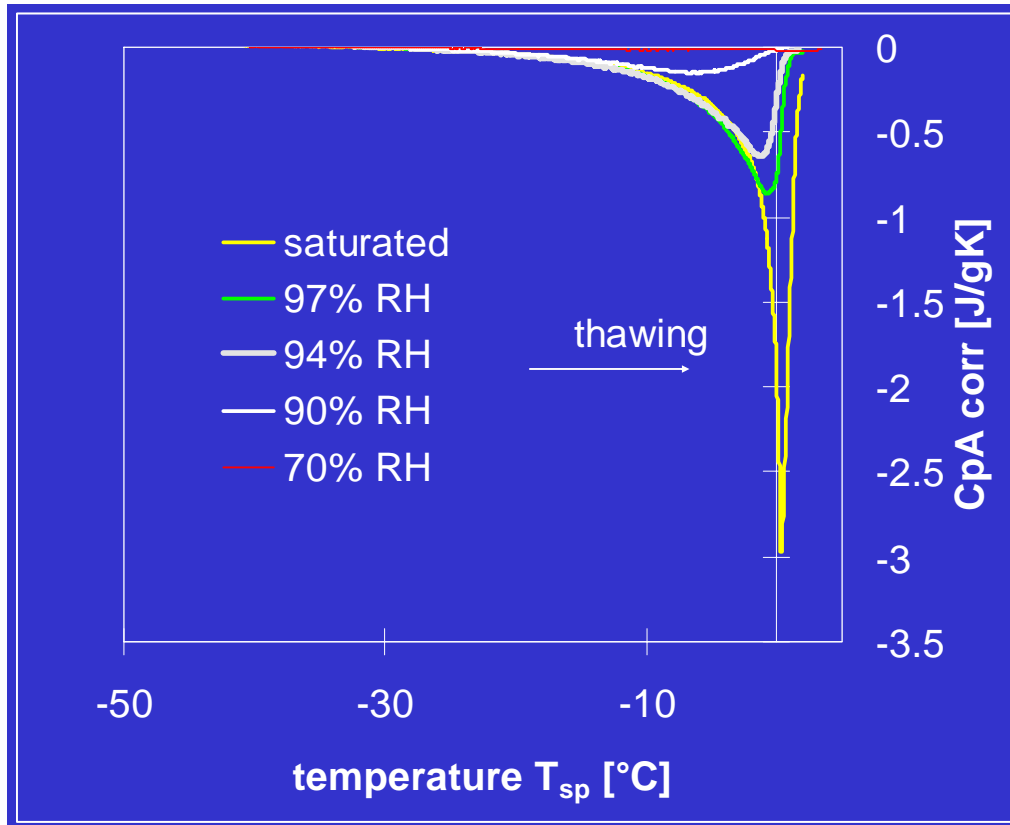


Pâte avec des pores partiellement saturés



Gel = pas d'endommagement

Effet de l'humidité relative sur la quantité d'eau en fusion



Joseph Kaufmann
EMPA

Pour les dalles

l'eau en surface peut saturer la couche près de la surface



→ l'écaillage

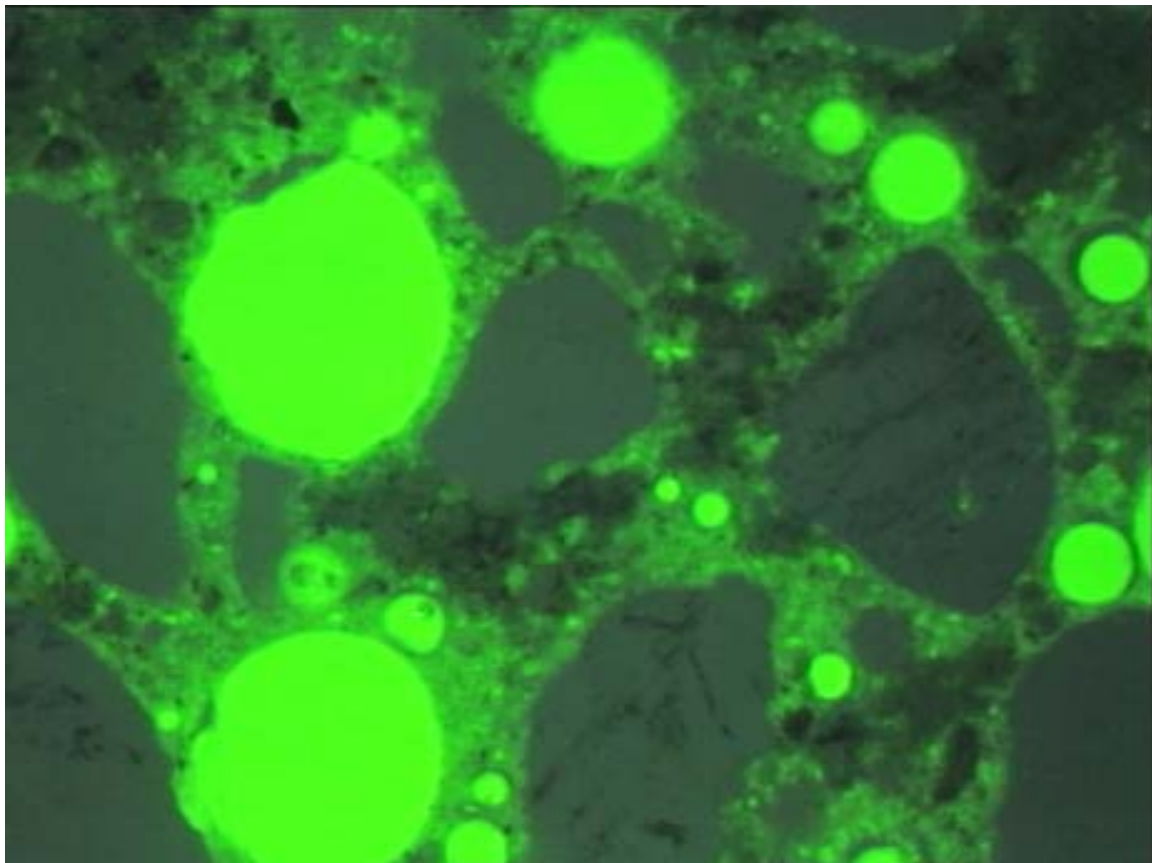
Pour éviter l'endommagement

Introduction de vides d'air - ~ 6 - 8 %
Par utilisation des entraîneurs d'air, adjuvants liquides.

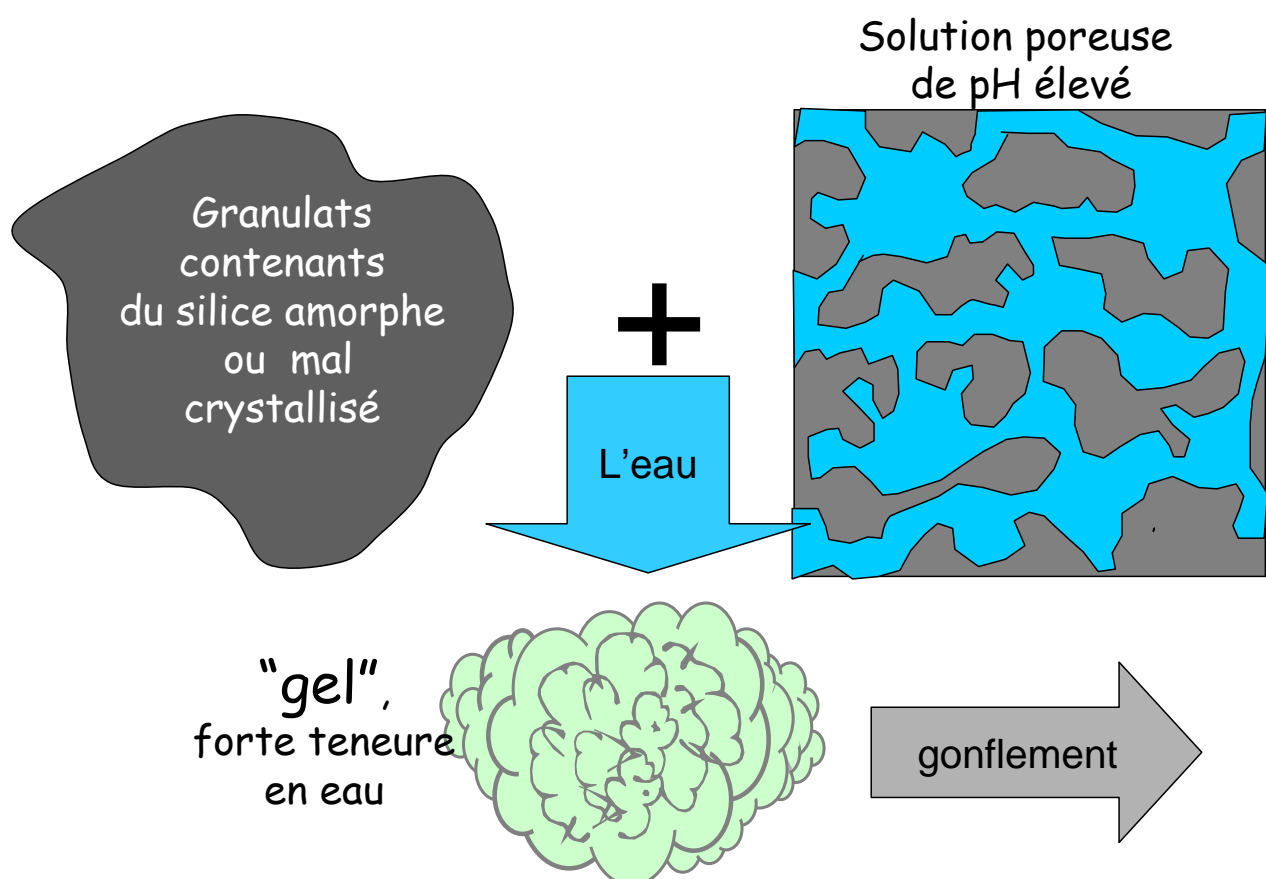
Taille ~50 μm (difficile à saturer).

L'eau dans les pores de la pâte peut «s'échapper» dans ces vides, s'il y a un gel.

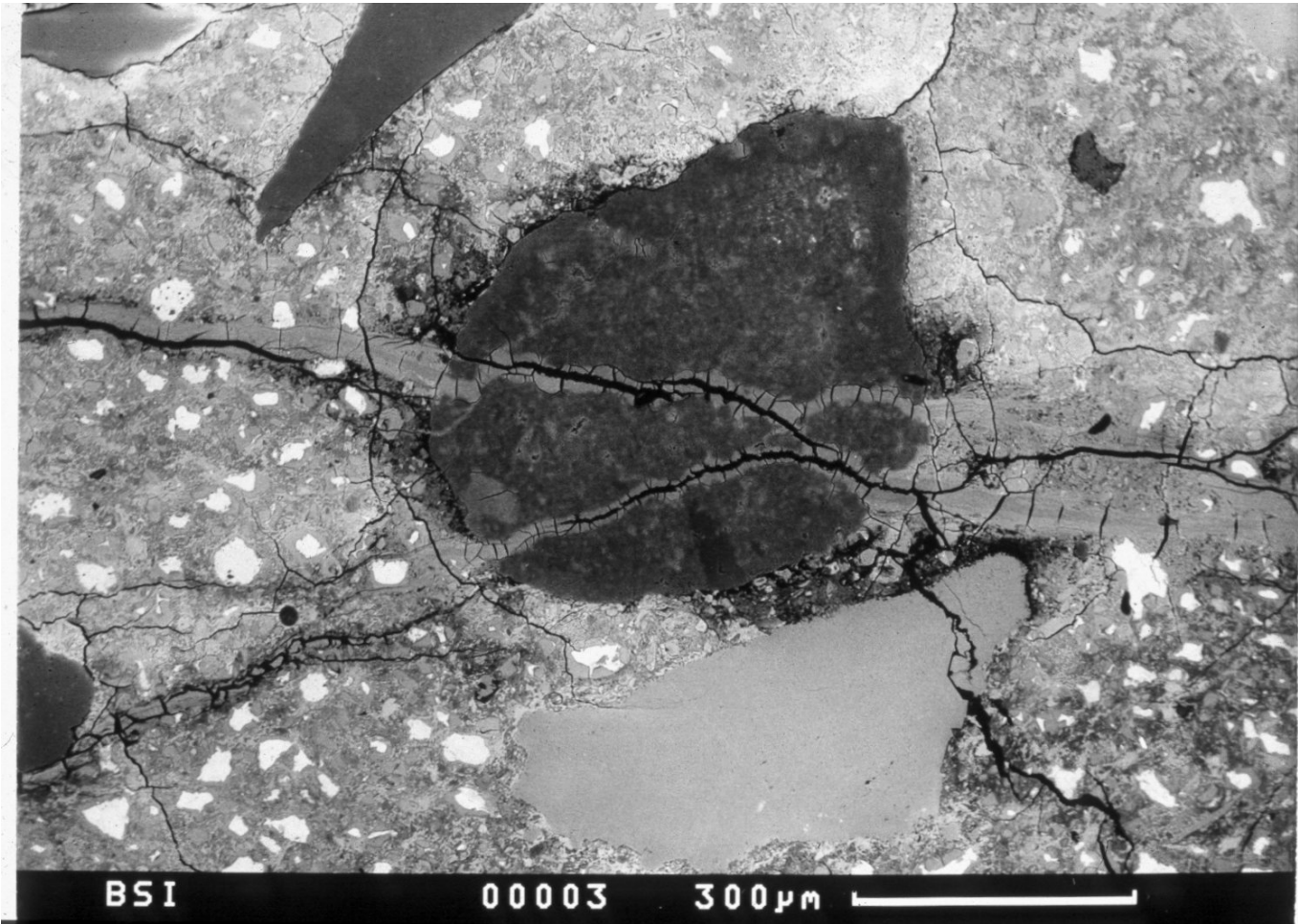
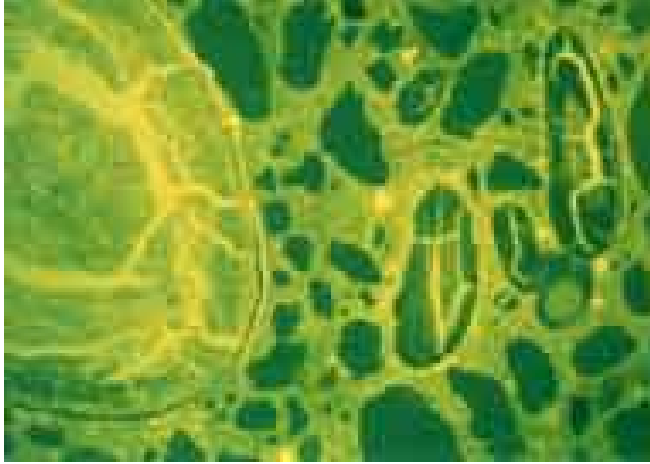
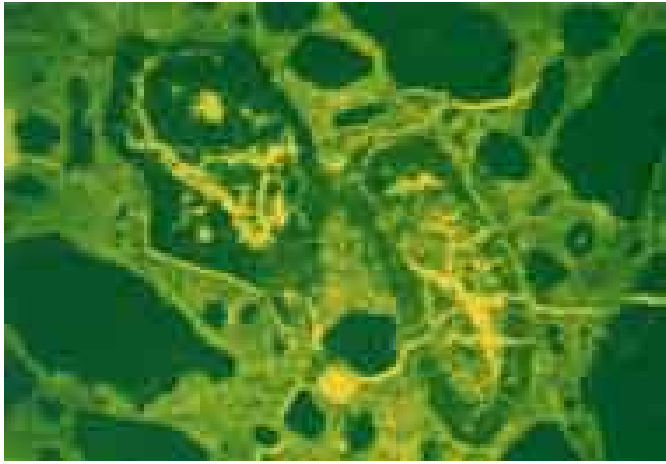
Espacement des vides <0.2 mm

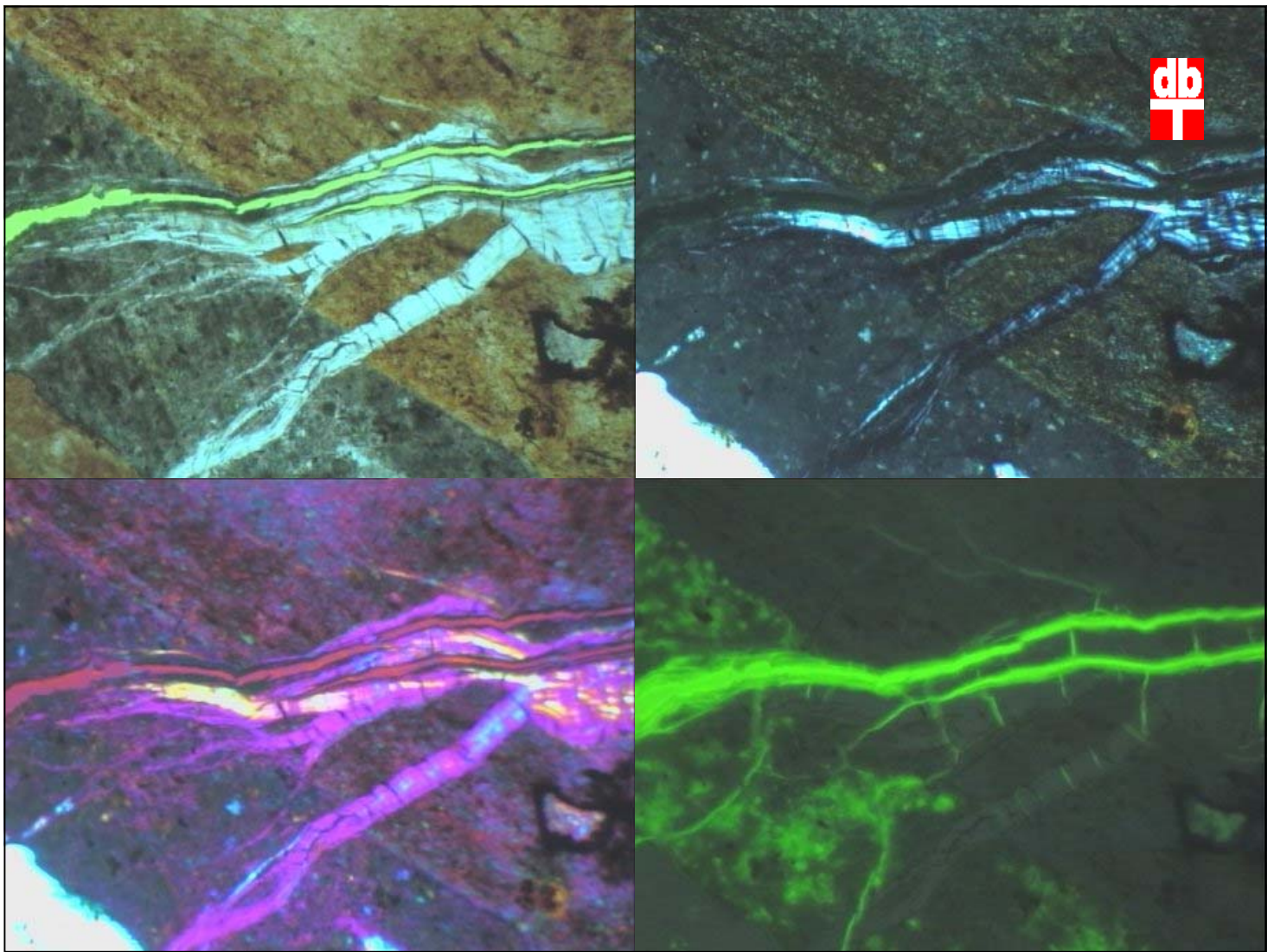


Réaction alcali granulat	RAG
Alkali aggregate reaction	AAR
Alkali silica reaction	ASR



Manifestation microscopique:

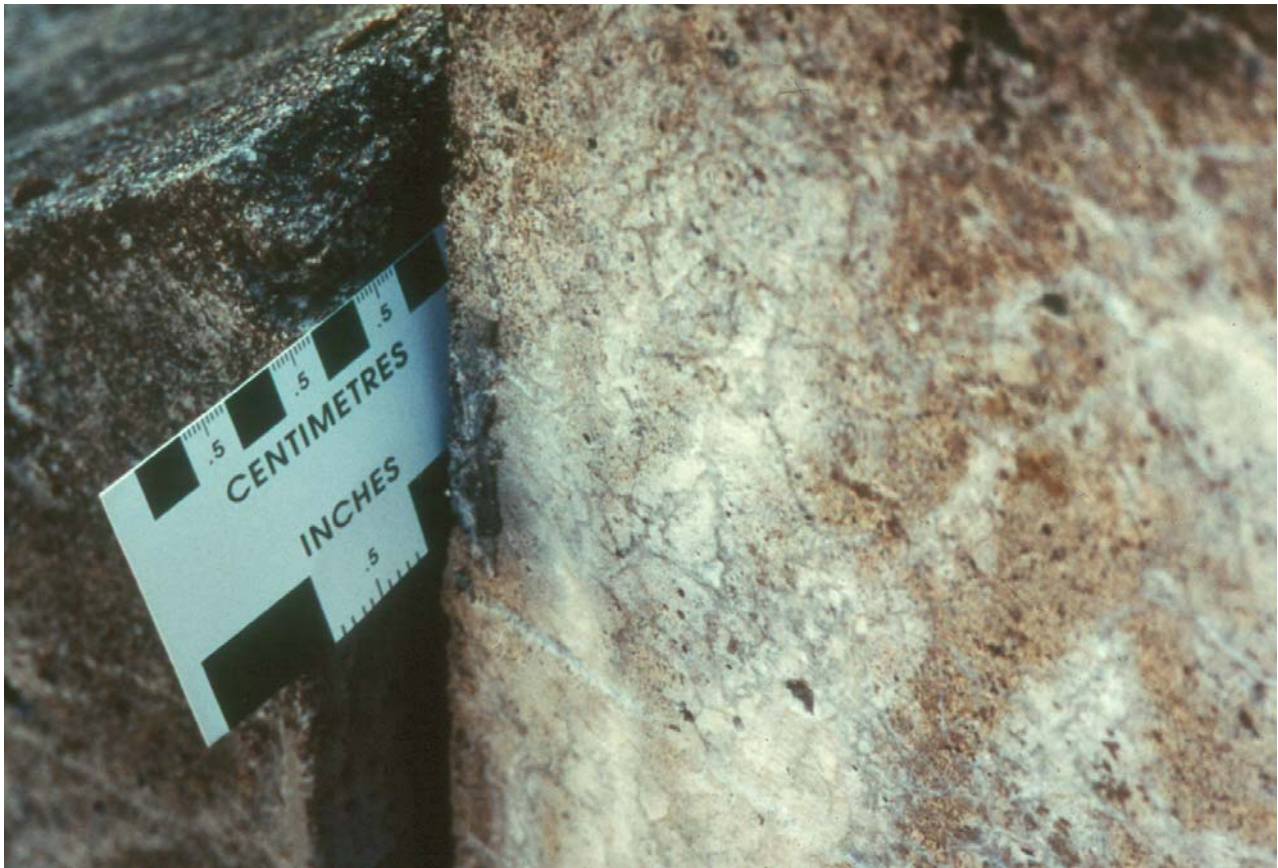




Manifestation macroscopique:



Misalignment (Distorsion)

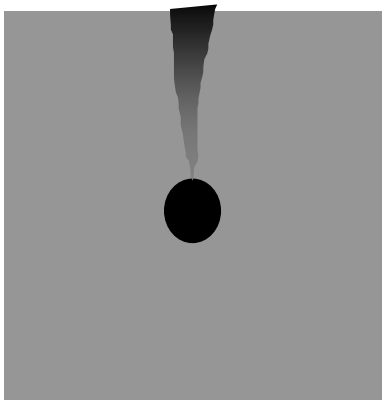


Distribution des Fissures – “Map Cracking”

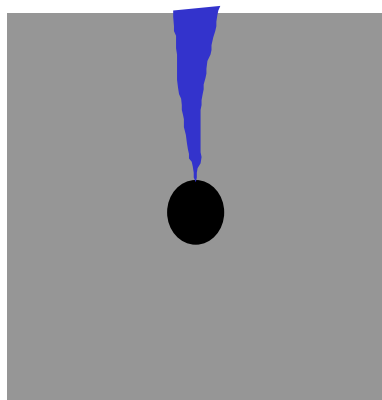


La fissuration peut augmenter les autres formes de dégradations

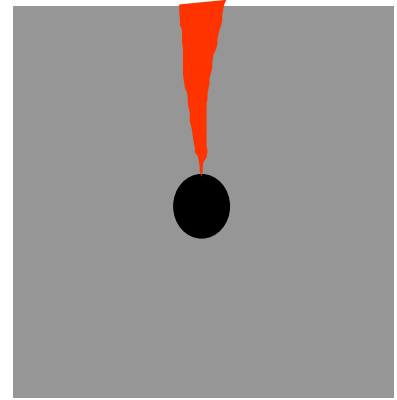
Cl^-



Gel

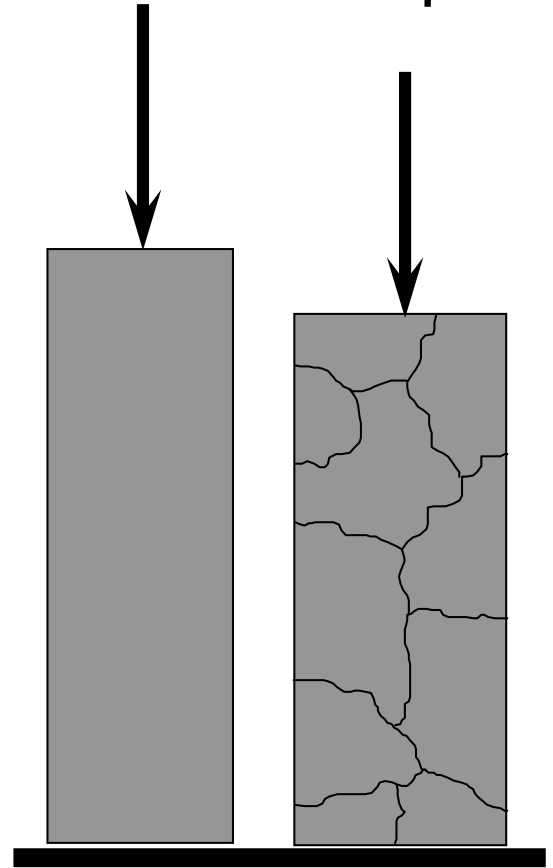


CO_2

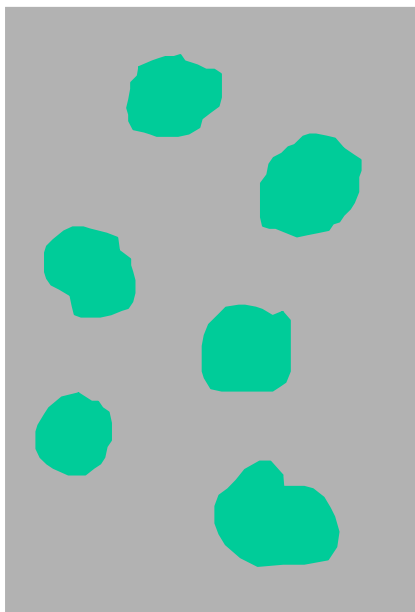


Effet d'ASR sur les propriétés mécaniques

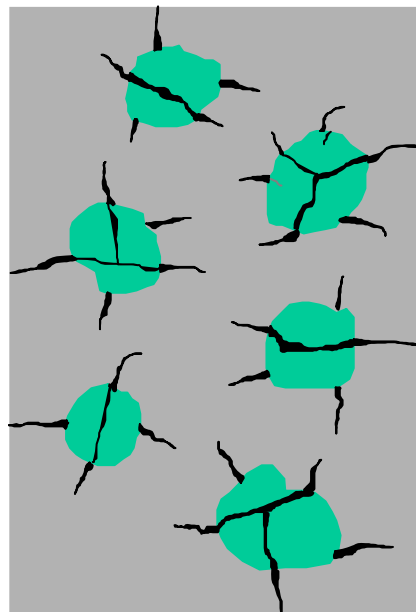
- Réduction de la résistance en compression.
- Baisse du module (de Young)
- Augmentation du fluage



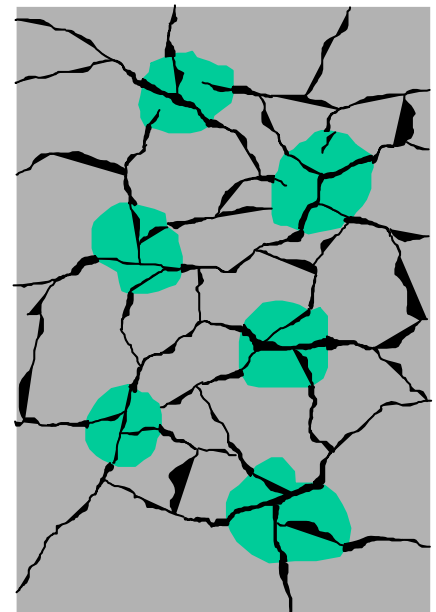
Développement de la fissuration



Pas endommagé



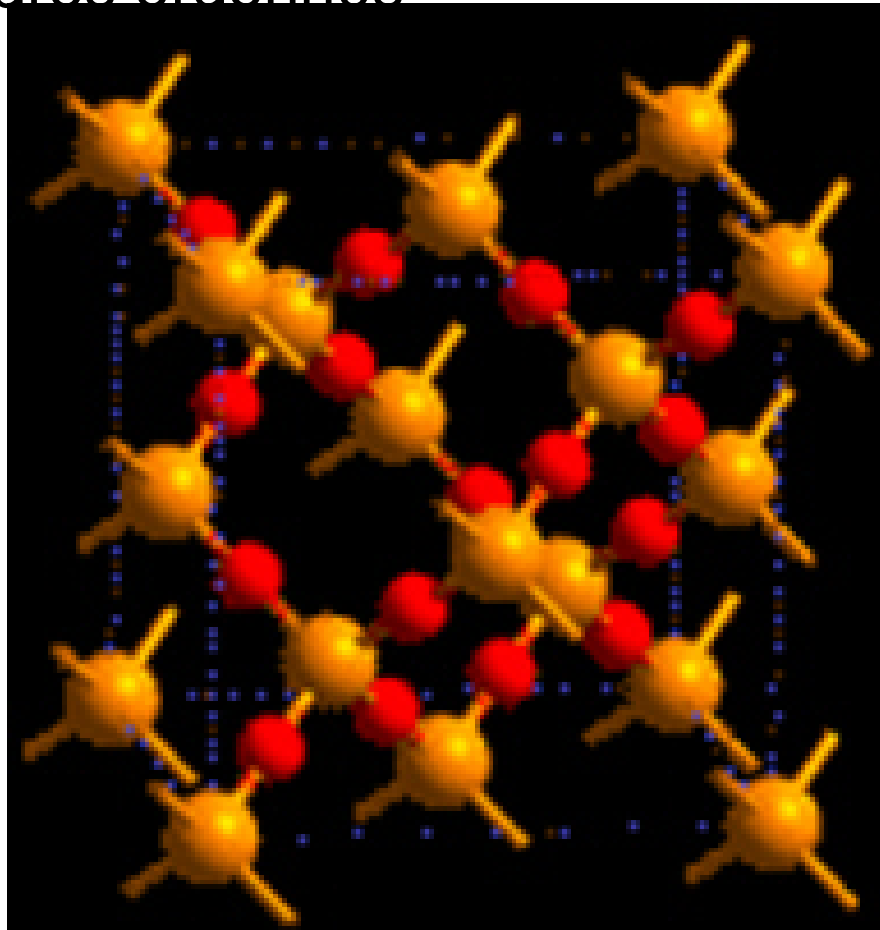
*Expansion faible
(0.04 - 0.06%)*



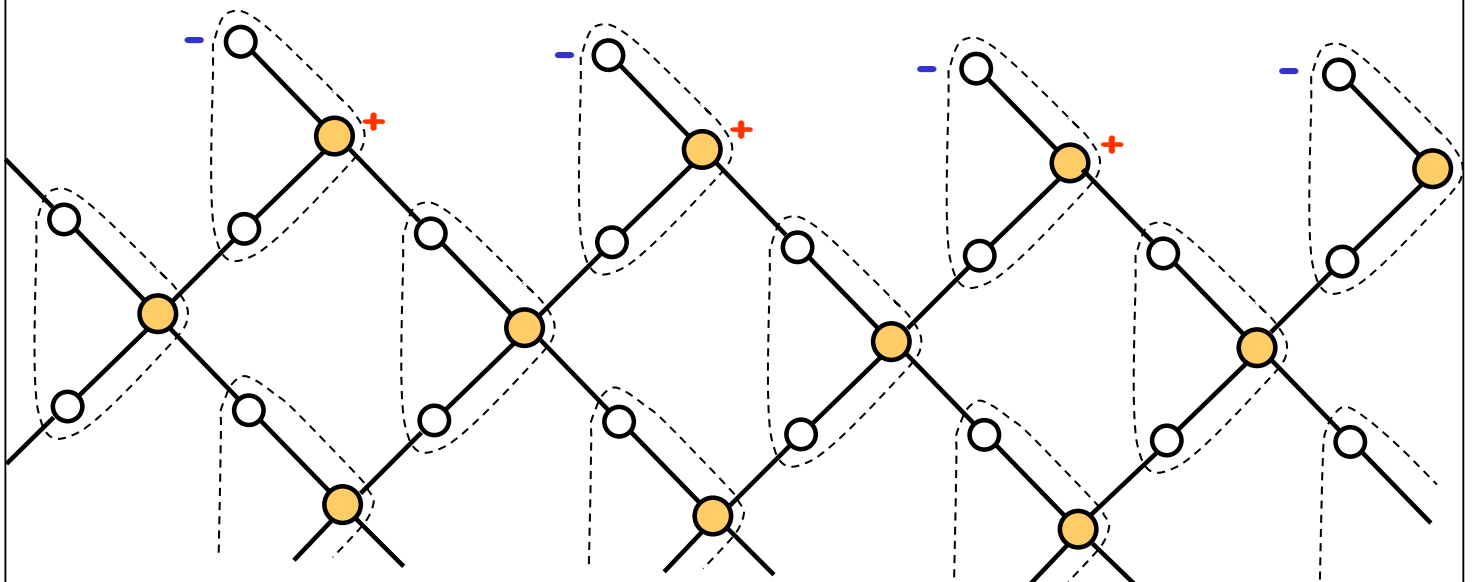
*forte expansion
(> 0.10%)*

Les mécanismes de la réaction

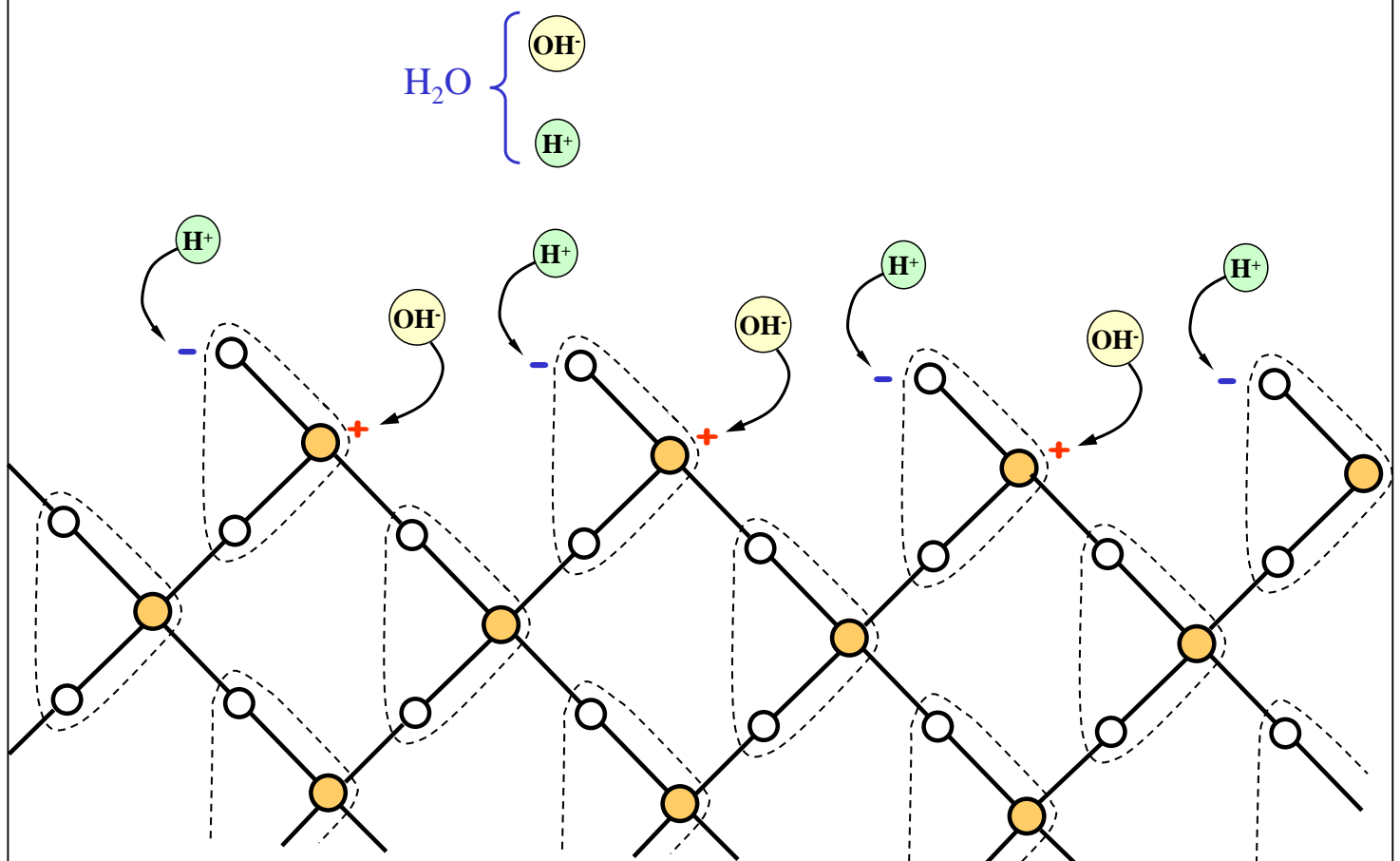
La silice cristallisée est composée de tétraèdres ordonnés

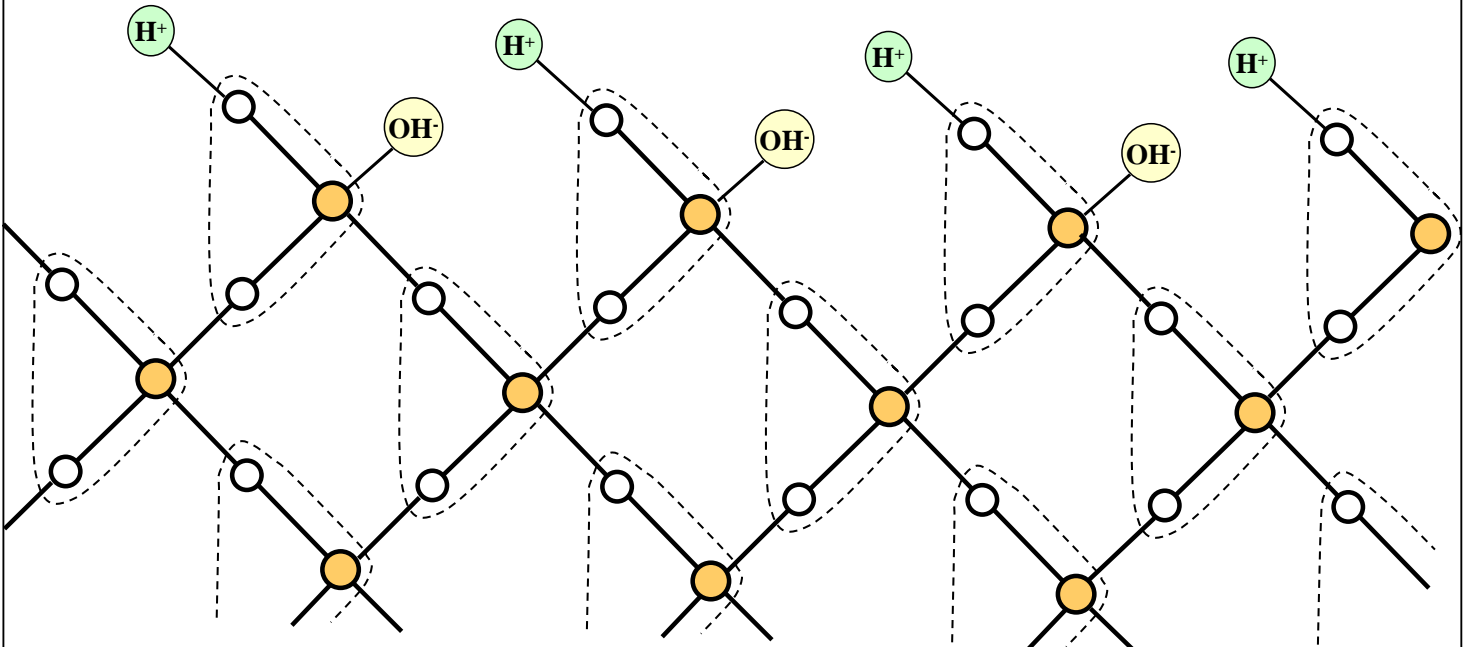
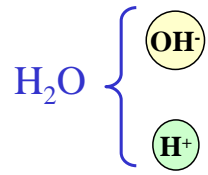


Les tétraèdres incomplets à la surface
sont chargés

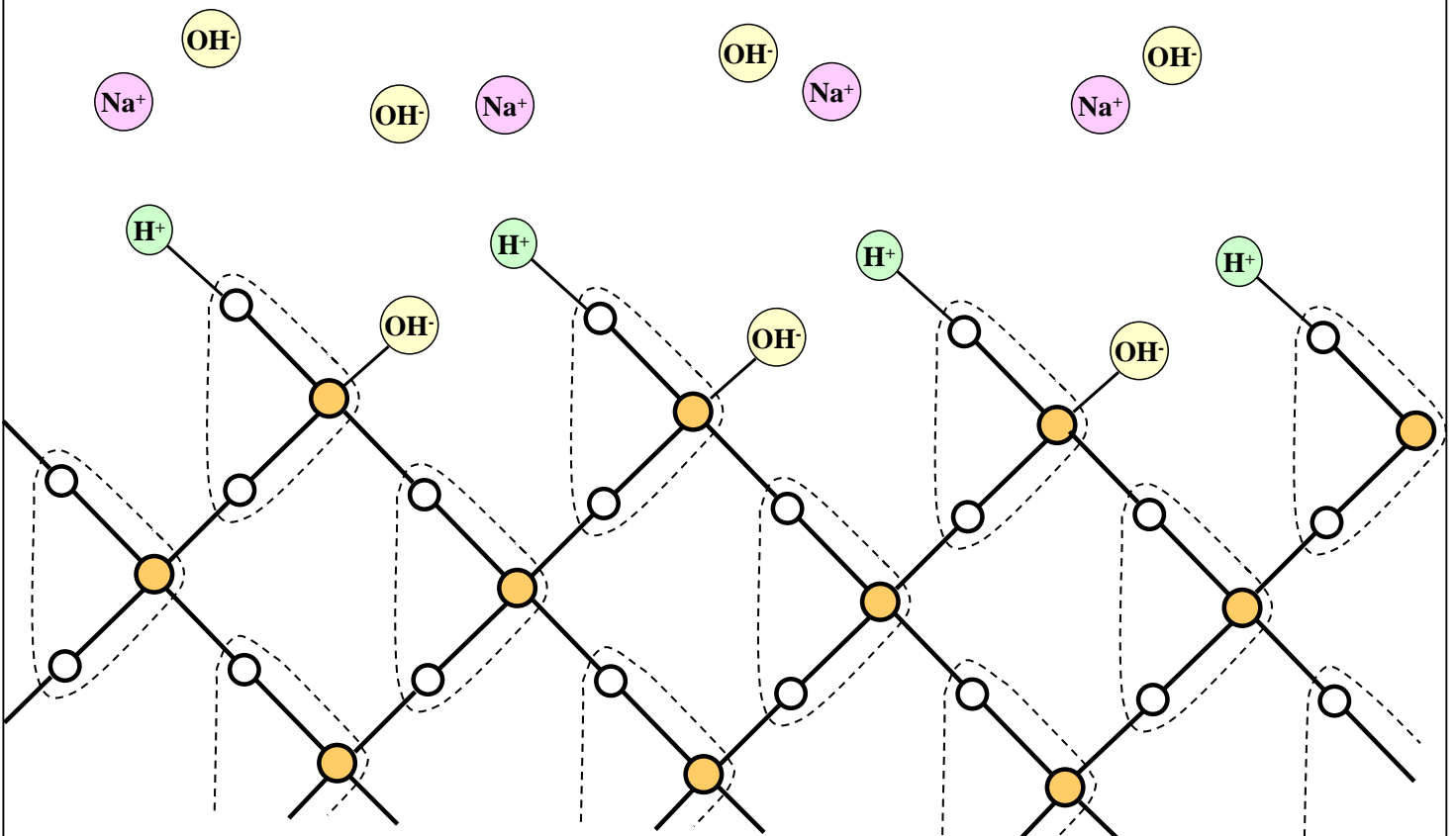


En présence d'eau,
les ions sont adsorbés à la surface

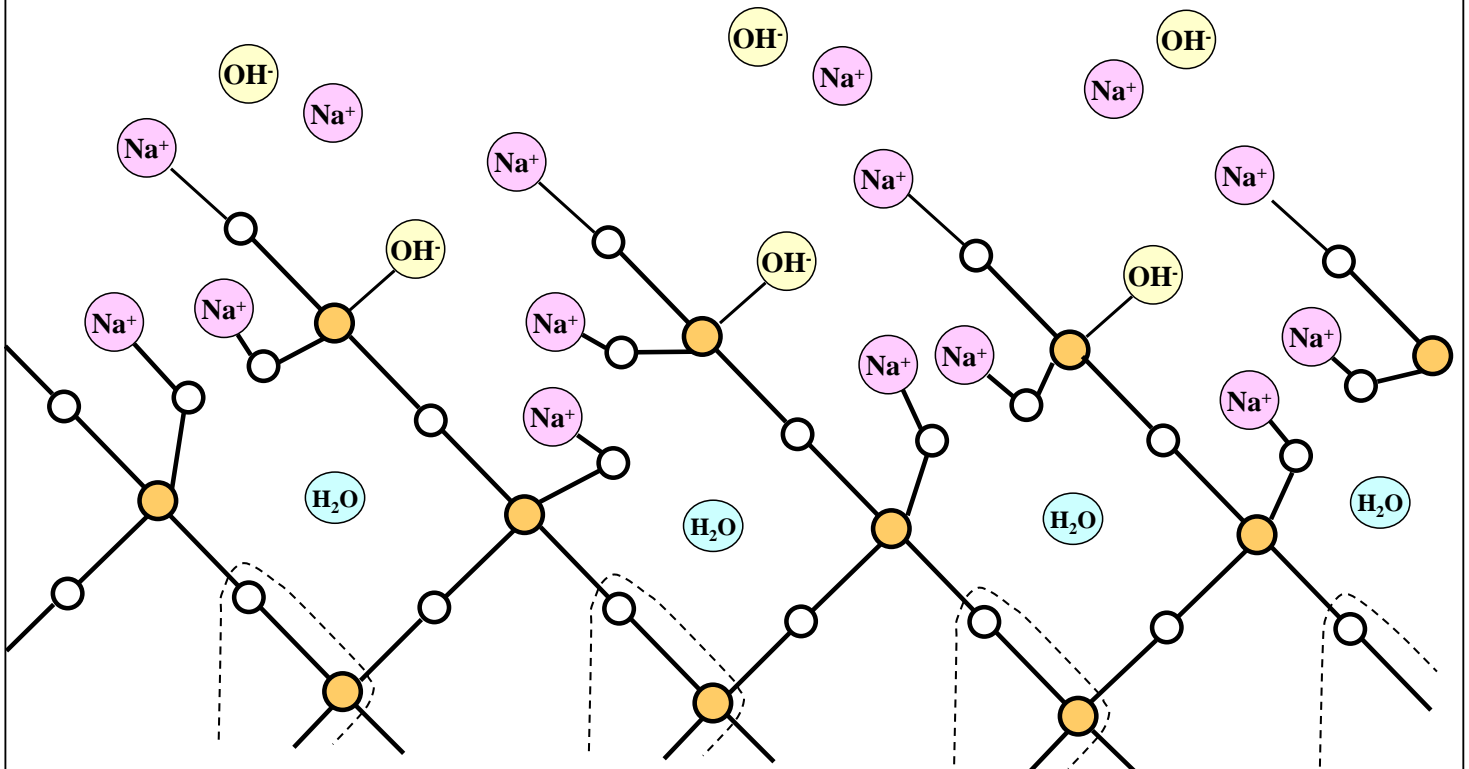
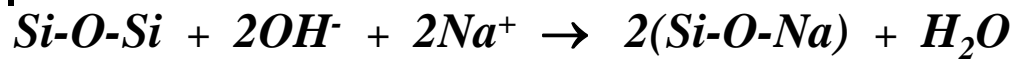




En solutions alcalines, les ions métalliques adsorbent

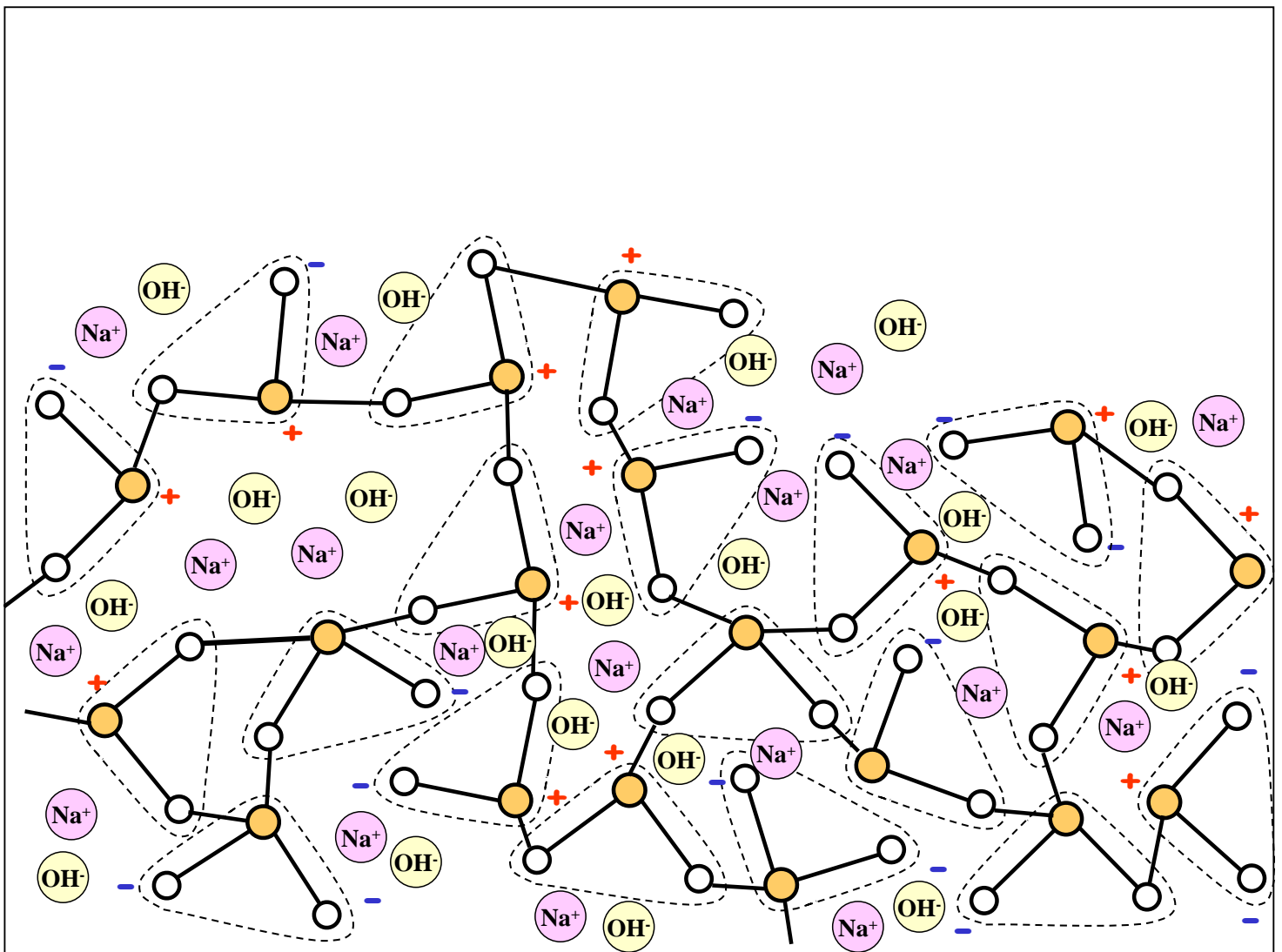
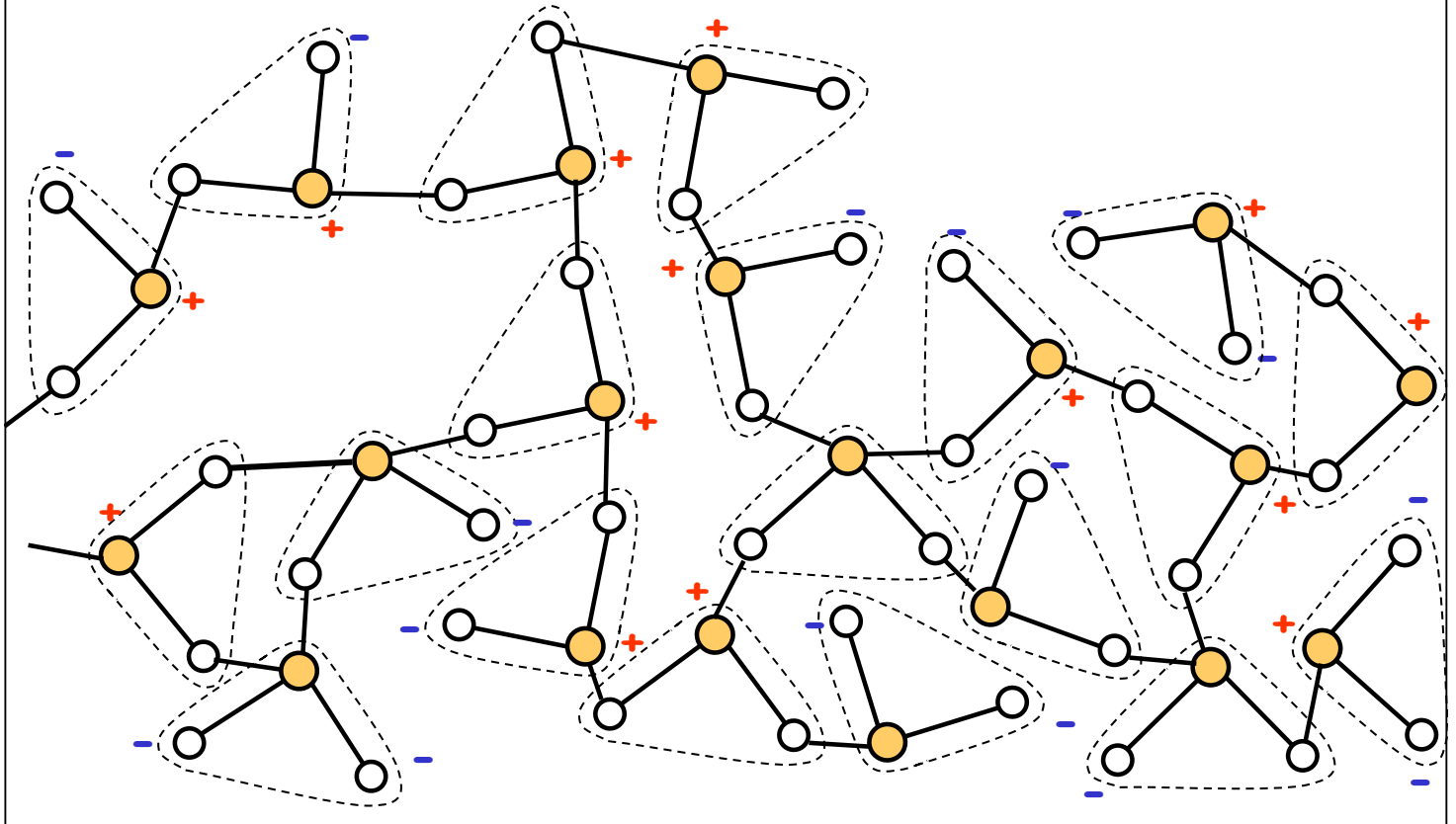


Ceci conduit à la rupture des liaisons silanol

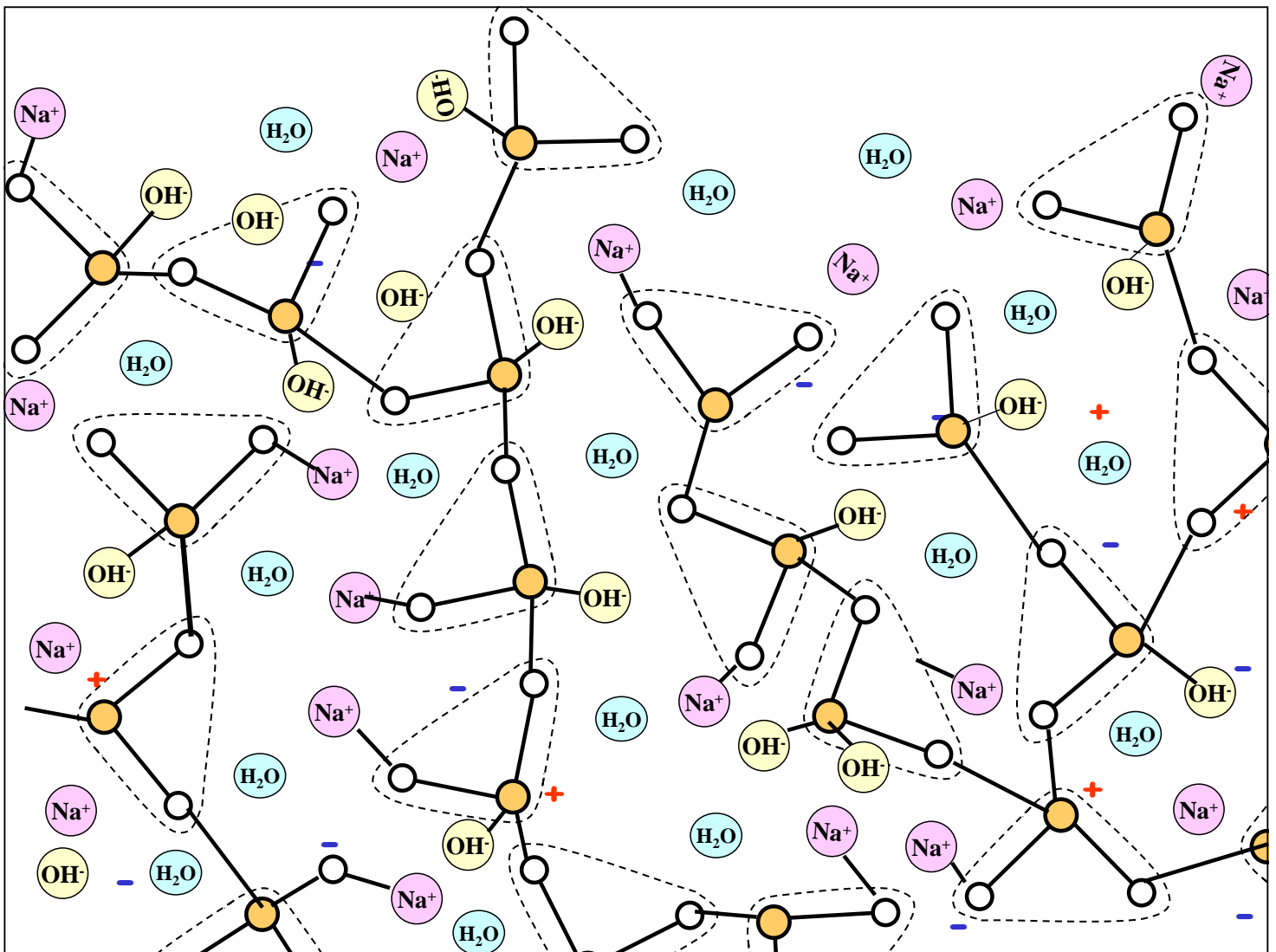
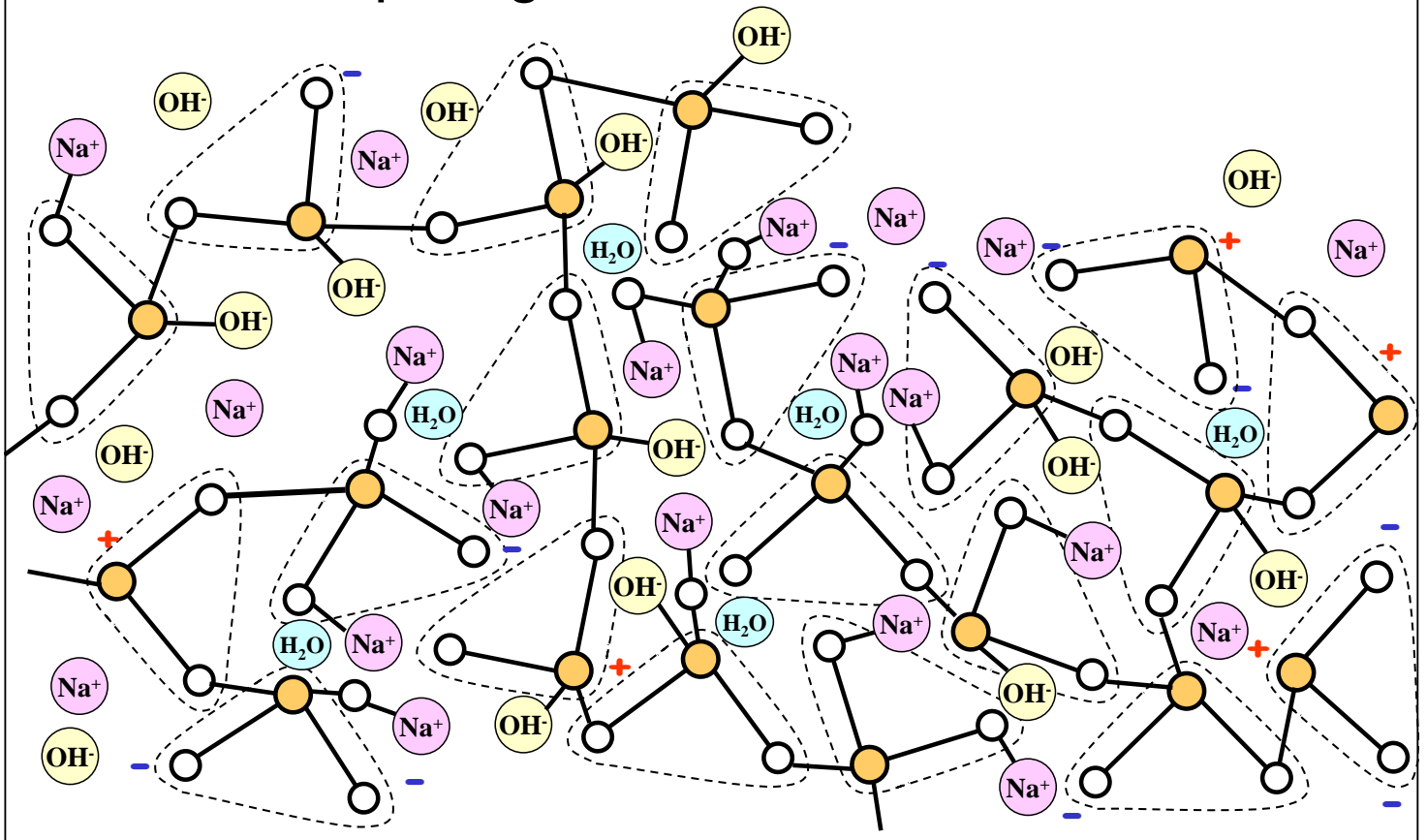


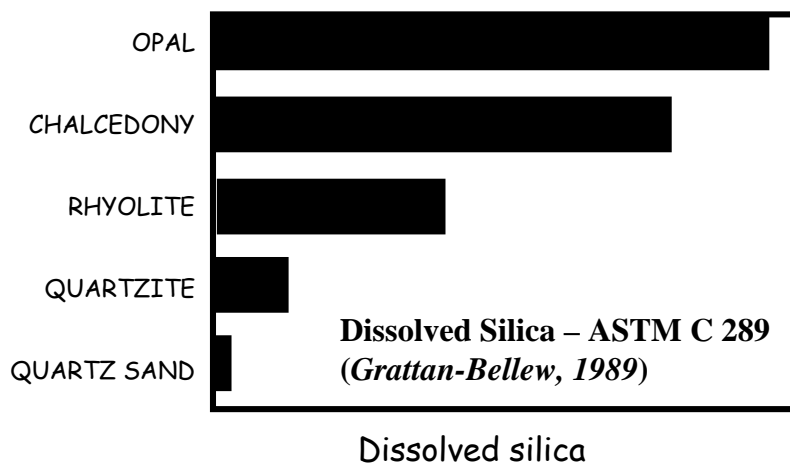
Dans les roches bien cristallisées,
ceci apparaît seulement à la surface

Dans les silices amorphes ou cristallisée
les hydroxydes alcalins peuvent pénétrer
dans le cristal

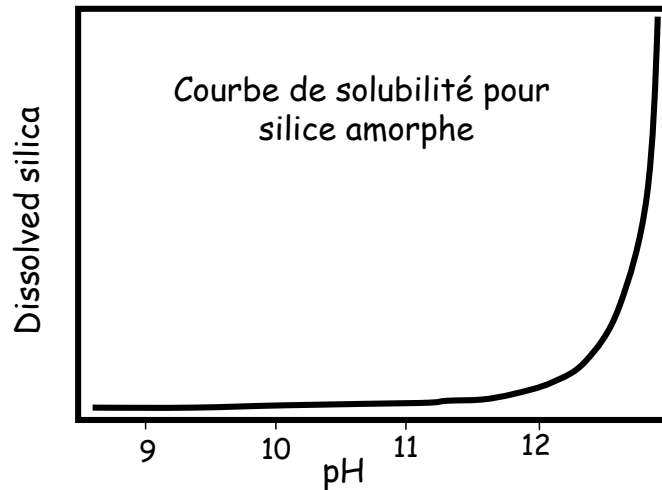


Plusieurs liaisons silanol rompues et l'eau entrante, signifie que la silice disloquée a un volume plus grand > EXPANSION





Le solubilité dépend de la structure minérale et du pH.



Note historique

- **Première identification de la RAS en Californie par Stanton dans les années 1940**
- **Au début, seules les roches en silice peu cristalline – telles que l'opale- ont été crues réactives**
- **Durant les 60 dernières années, de plus en plus de roches se sont avérées réactives**
- **Des cas ont été identifiées presque dans tous les pays**

Caractérisation du ciment

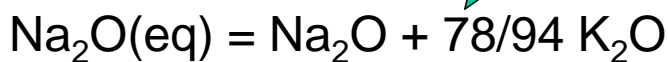
Analyse oxyde (XRF)

SiO ₂	20,5	(19 – 21)
Al ₂ O ₃	6	(4-7)
Fe ₂ O ₃	2,5	(2-3)
CaO	64	(62-65)
MgO	1,2	(1-4)
SO ₃	2,8	(2,5-3,2)
K ₂ O	0,5	(0,3-1)
Na ₂ O	0,2	(0,2-0,5)
PaF(LOI)	1	(1-2)
CaO libre	1	(0,5-1,5)
resid	0,3	(0,2-0,4)

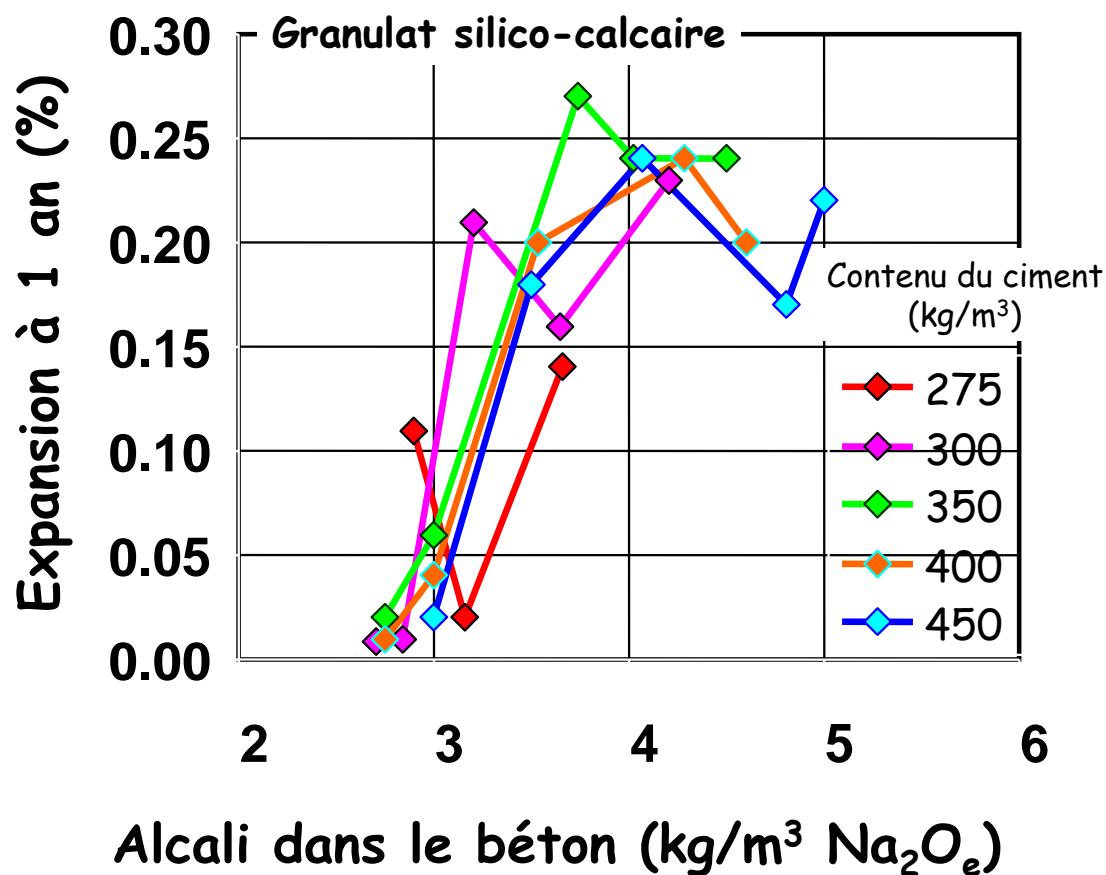
insol

+Mn₂O₃, TiO₂, P₂O₅, CO₂

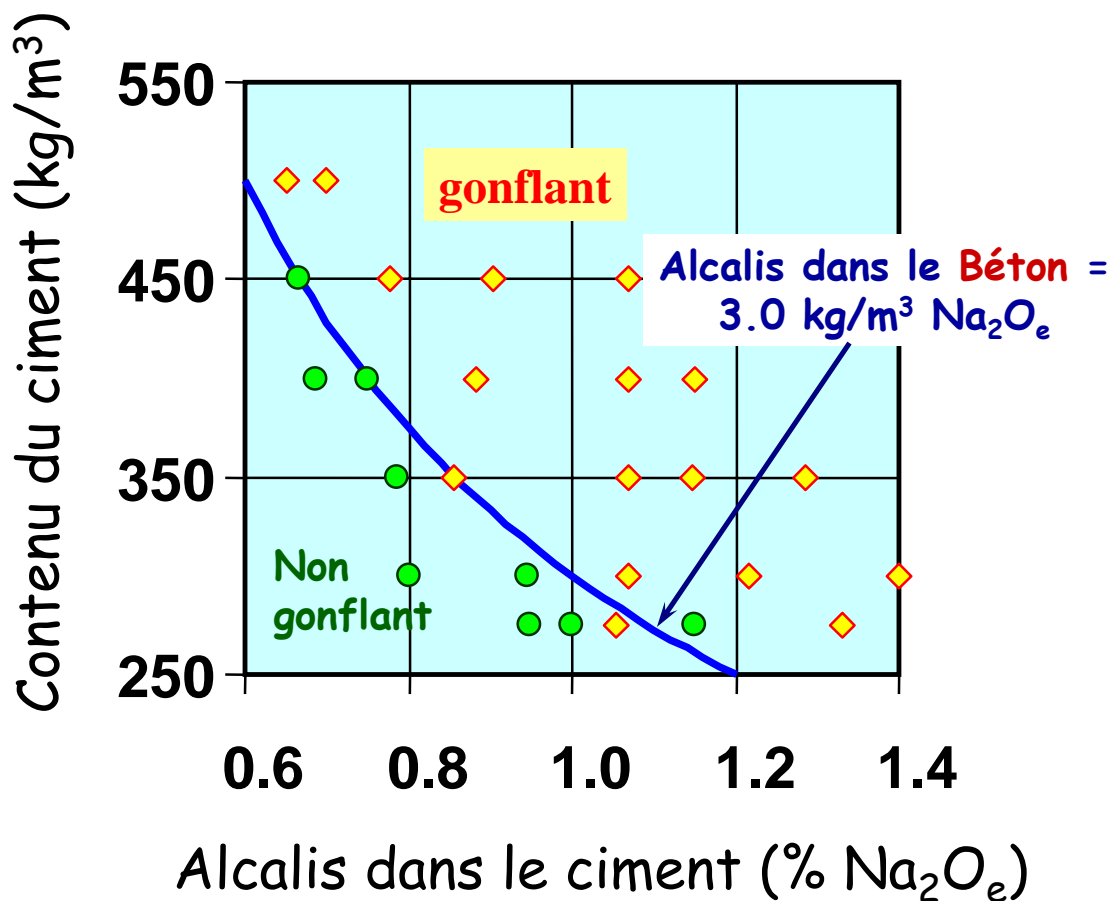
Poids molaire
Na₂O



Effet des alcali du béton sur l'expansion



Effet des alcalis du ciment sur l'expansion



Seuil pour ASR $\sim 3\text{kg}/\text{m}^3 \text{Na}_2\text{O}_e$

Ciment à basse teneur en alcali:

$\text{Na}_2\text{O}_e < \sim 0.7 \%$

MAIS: il y a évidence maintenant que cette approche n'est pas fiable

Méthodes de prévention

- Eviter les granulats réactifs
- (Utiliser le ciment à basse teneur en alkali)
- Utiliser du ciment avec des cendres volantes ou (à voir prochainement)

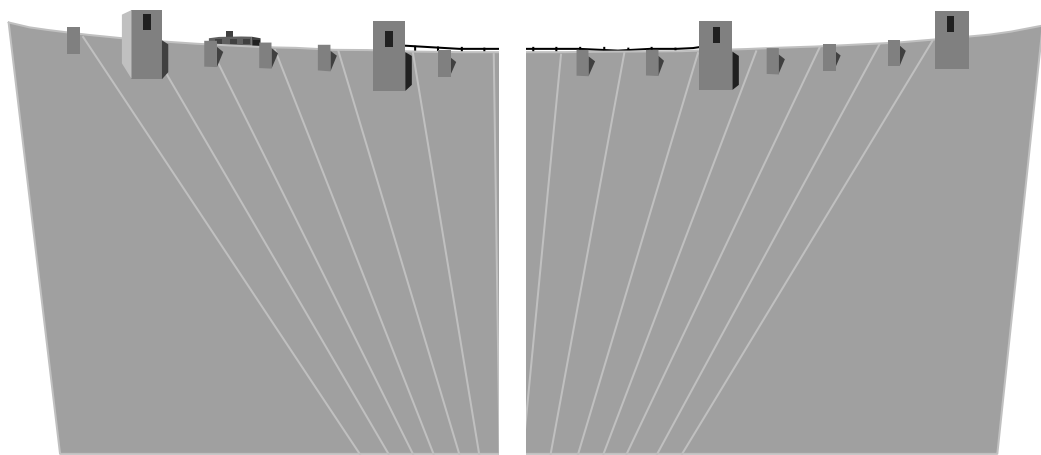
Mais des fois la réaction se manifeste seulement après 30 / 40 ans

- Cosmétique ou structurelle?
- Remplacer ou réparer?
- Des fois des mesures drastiques sont nécessaire

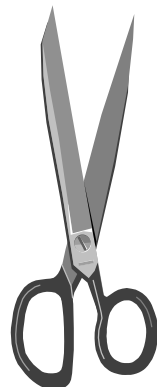
Dans les barrages le l'expansion peut engendre des problèmes structuraux avant la fissuration ou la perte de performance mécanique:

- **Pas d'armatures**
- **Structure en compression**

Slot Cutting

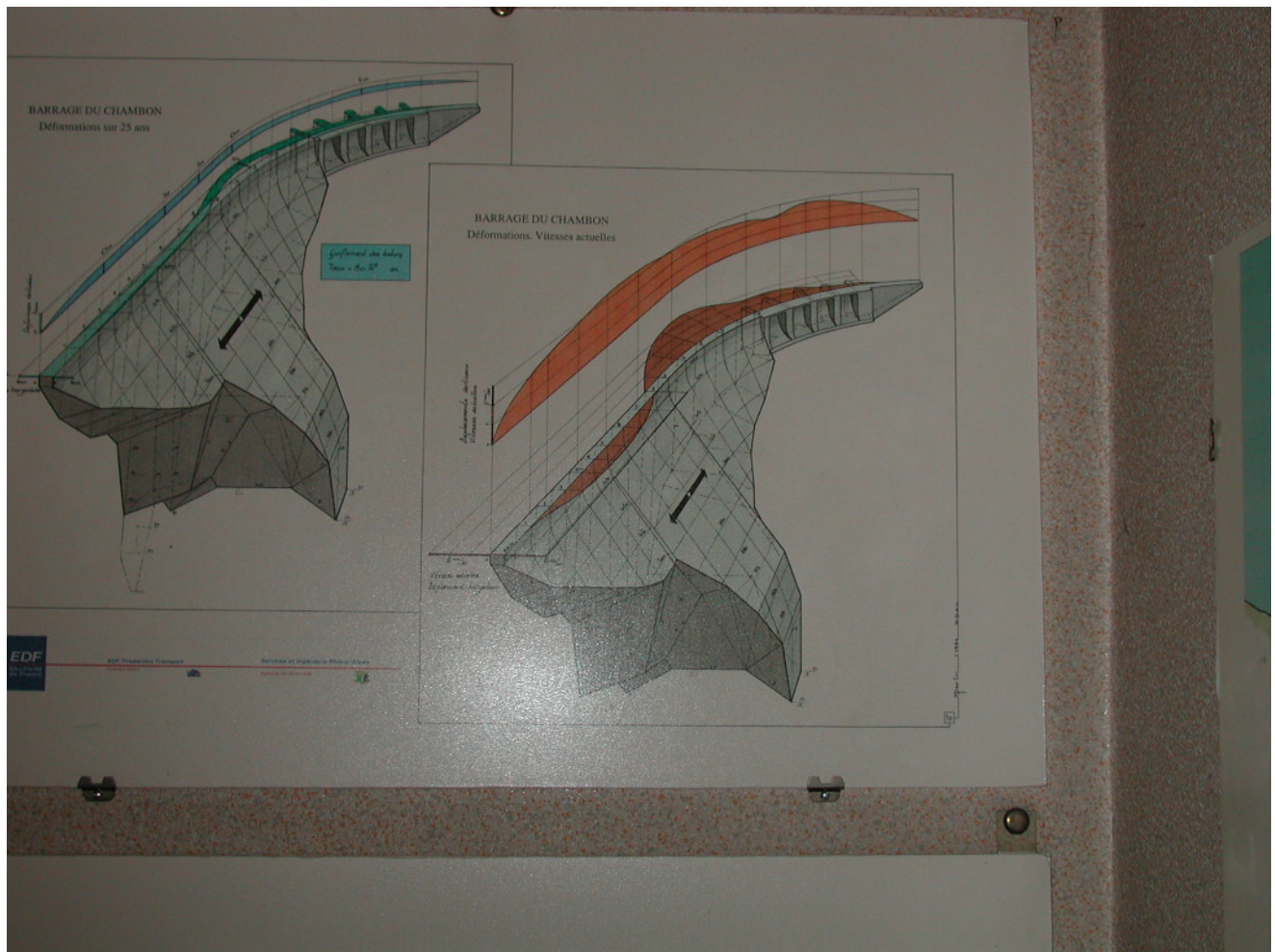


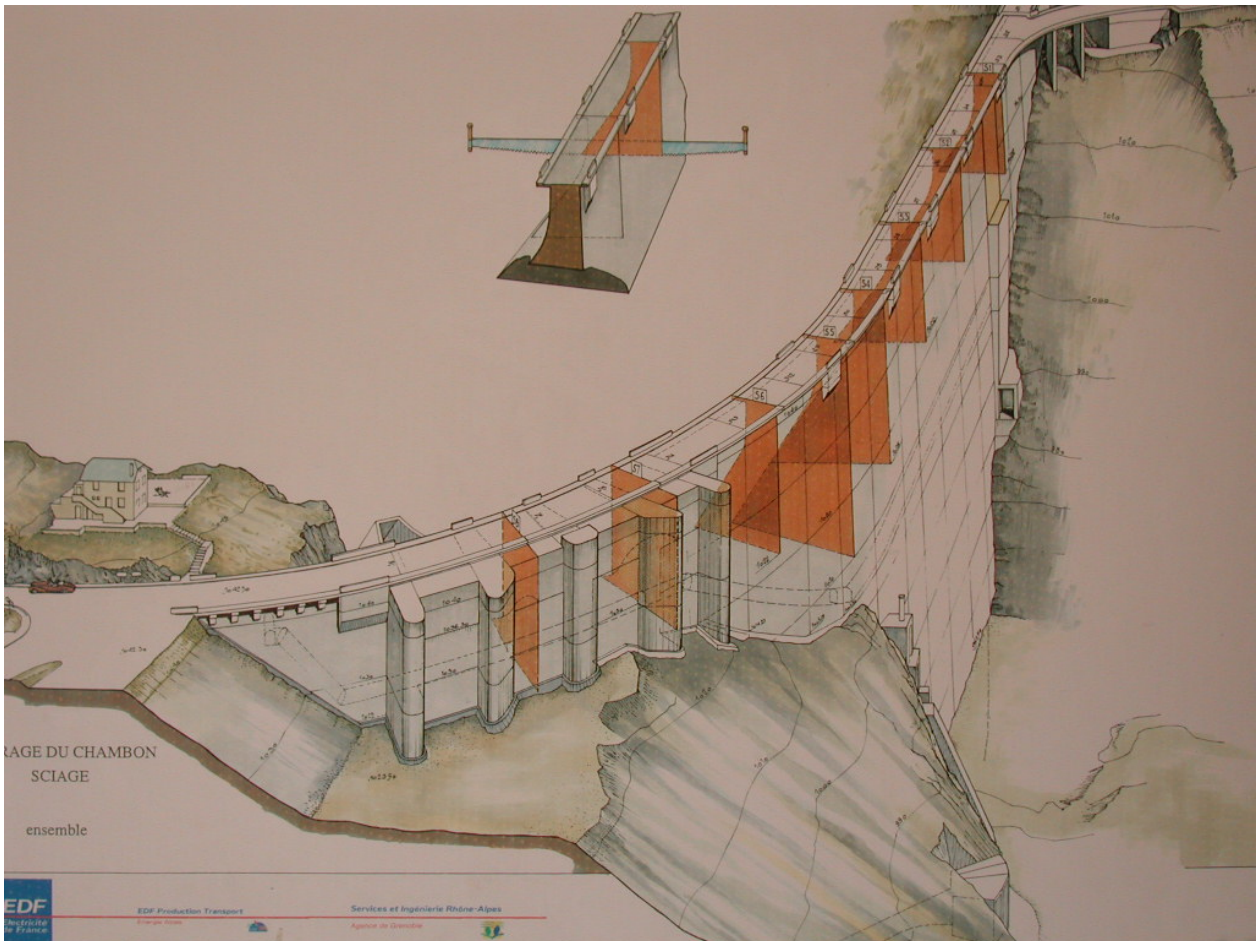
Diamond
wire cutting

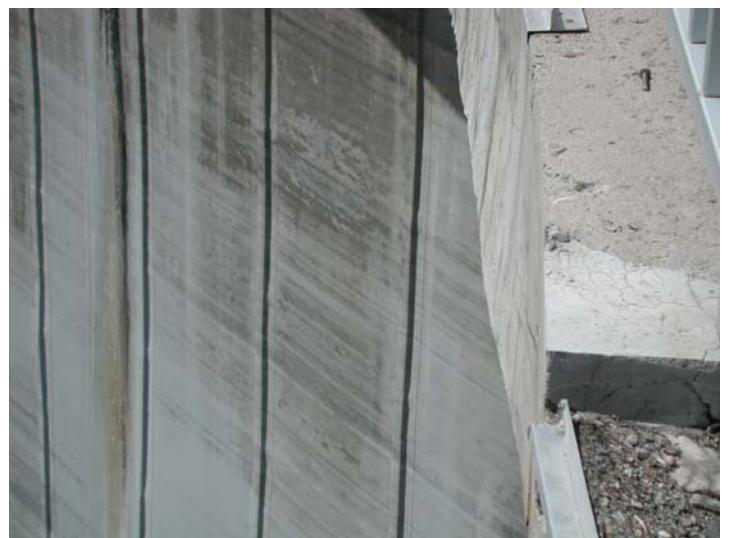
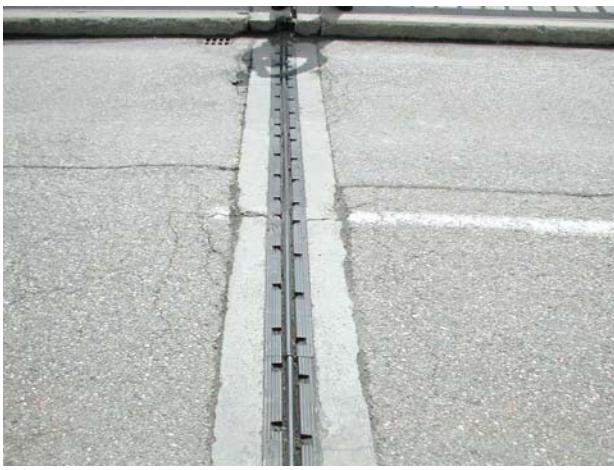


Provides
stress relief

Barrage de Chambon, France

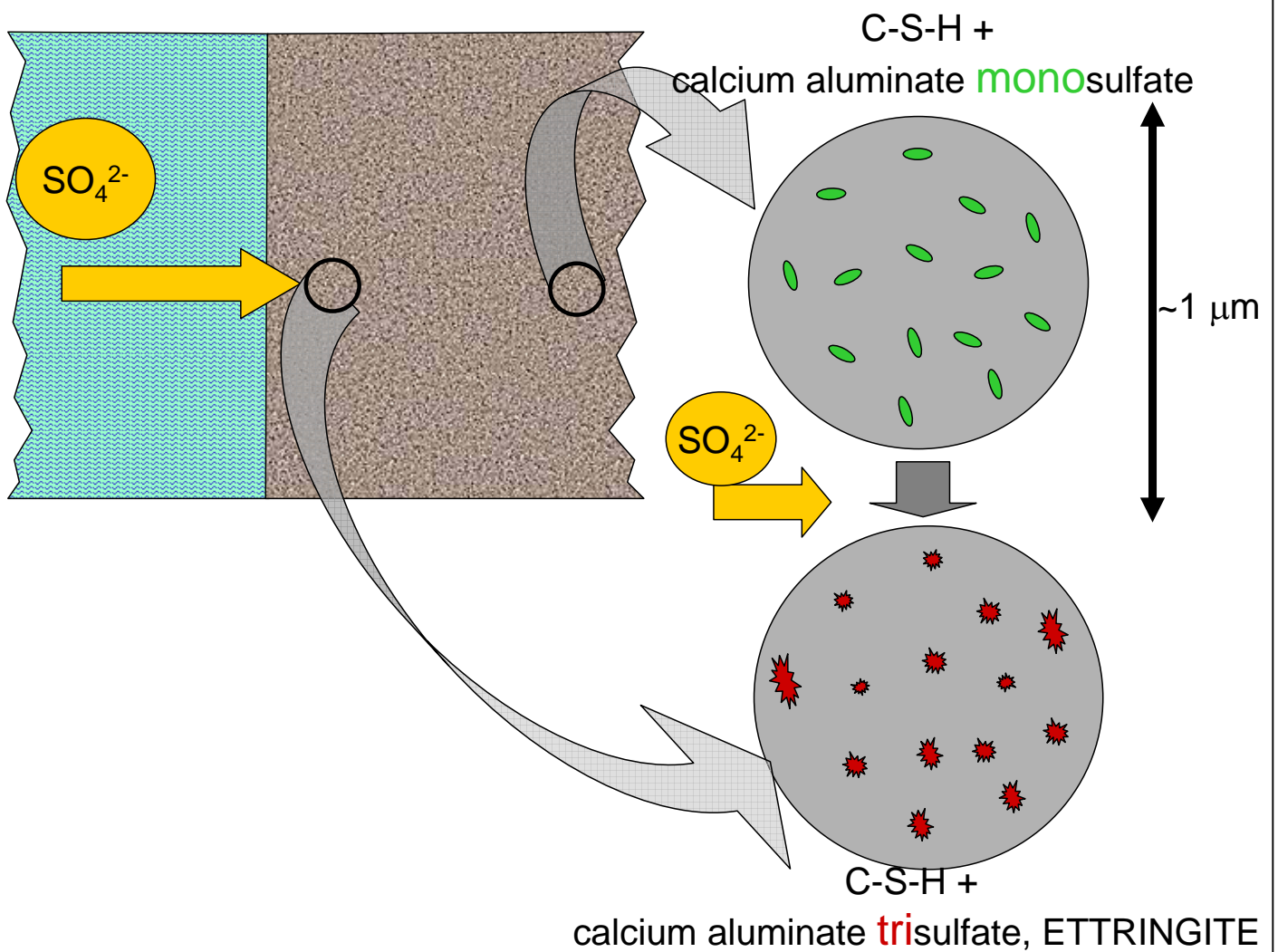


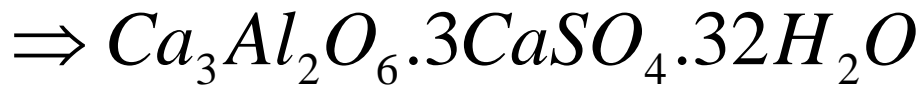




Attaque sulfatique

+ (eau de mer)





Augmentation du volume
 \Rightarrow gonflement

Prendre de calcium du C-S-H
 \Rightarrow softening

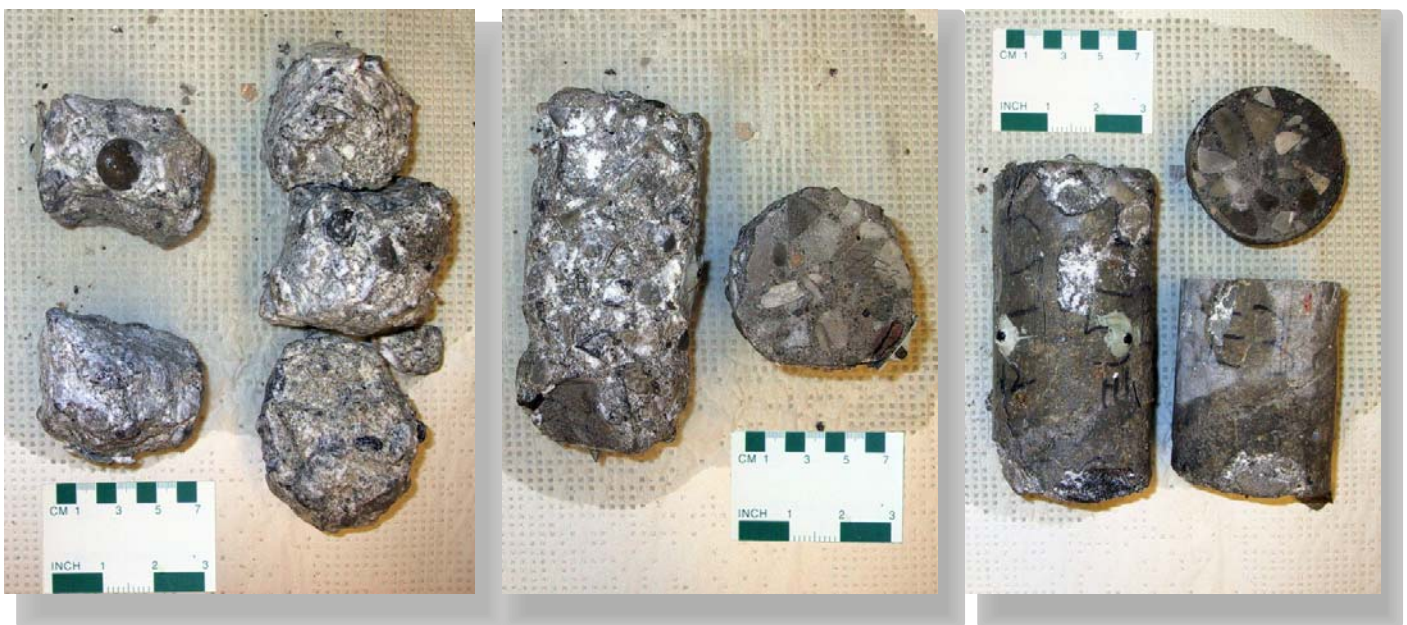
Nécessité d'avoir une dispersion fine de monosulfo dans le C-S-H

génération de pression de cristallisation

Comment éviter

- Moins de monosulfate pour la transformation
- Ciment avec teneur basse en C_3A
- Limiter le rapport e/c

Concrete: Effect of C_3A in Portland Cement
 $w/c = 0.50$, 21 years in 50,000 ppm $MgSO_4$



12.3 % C_3A

7.1 % C_3A

3.5 % C_3A

(Saw Cut cylinders on right side)

Effect of W/C: USBR 40-Year Data ($C_3A = 0-8\%$)

P.J.M. Monteiro, K.E. Kurtis / Cement and Concrete Research 33 (2003) 987-993

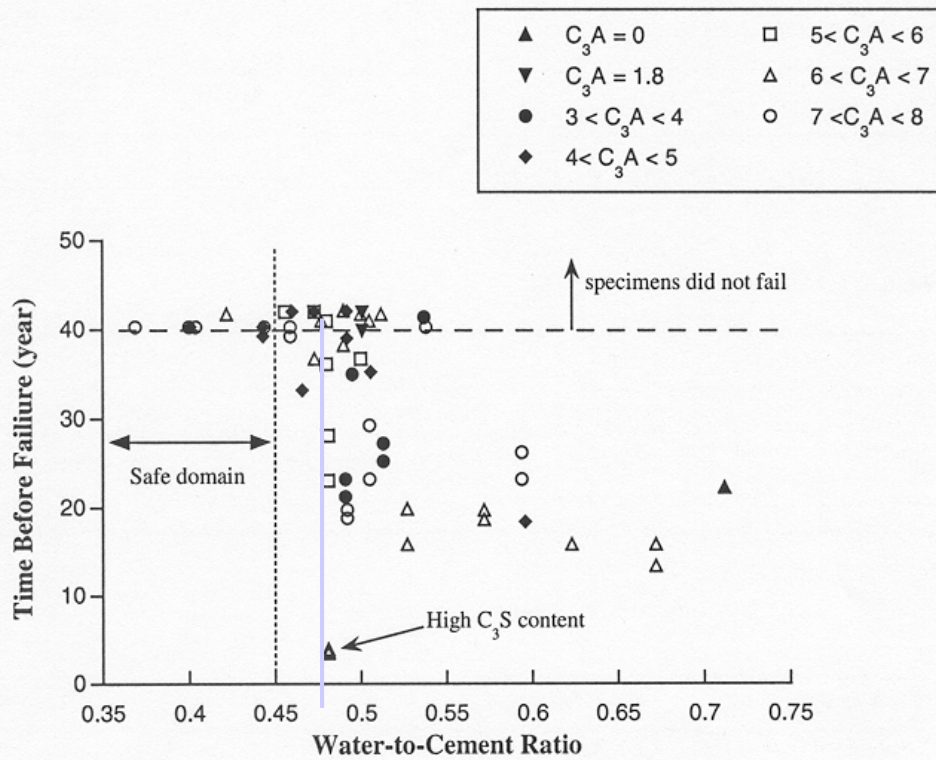
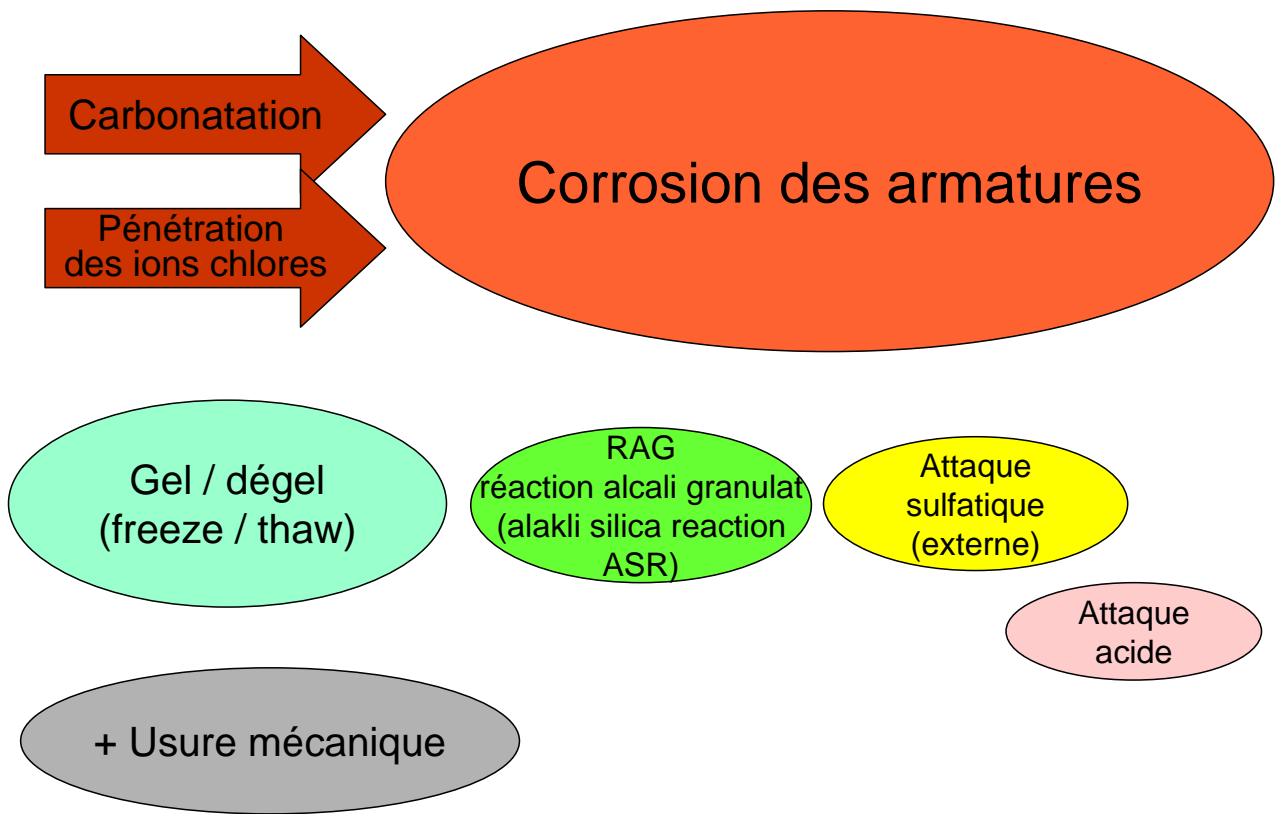


Fig. 2. Time to failure as a function of w/c ratio, with ranges of C_3A content in the range 0-8% shown by the shape and color of the markers.



Causes de dégradation des bétons



Processus de transport

Les processus de pénétration des ions

- Béton saturé, sans différence de pression:
 - Diffusion
- Saturé, avec différence de pression
 - Advection, flux de liquide
- Non saturé
 - Absorption
- Une face saturé, un face sèche
 - “wick action”

Perméabilité

Loi de Darcy

$$\frac{dq}{dt} = K_p \cdot \frac{\Delta h}{x} \cdot A$$

Diagram illustrating the Darcy Law equation with callouts:

- $\frac{dq}{dt}$: Flux
- K_p : Coefficient de perméabilité
- $\frac{\Delta h}{x}$: Gradient de pression
- A : aire

Diffusion

Loi de Fick

$$\frac{dc}{dt} = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

Coefficient de diffusion

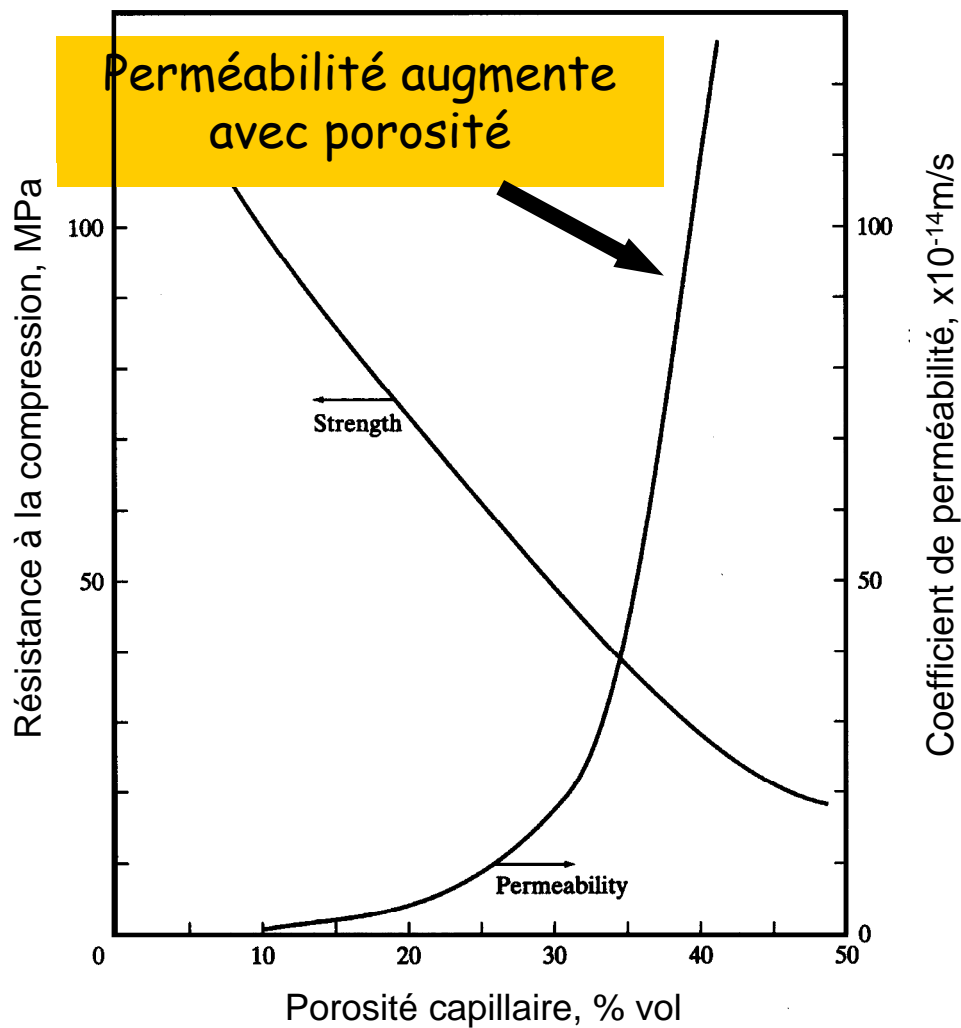
Taux de diffusion

Gradient de concentration

K_p

D

Dépend des mêmes paramètres

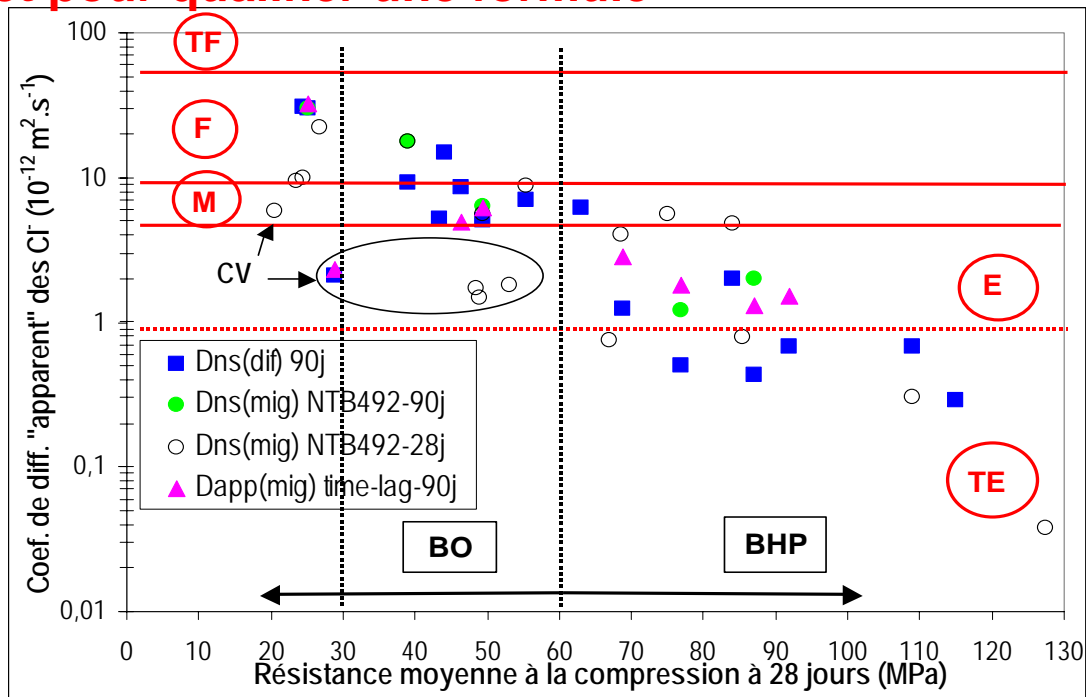


SELECTED DURABILITY PRESCRIPTIONS IN EN 206

Type of Corrosion	Environmental Conditions	Max. w/c ratio	Min. cement content, kg/m^3	Strength Grade
Carbonation	Dry or Wet	0.65	260	C 20/25
	Wet rarely dry	0.60	280	C 25/30
	Mod. humidity	0.55	280	C 30/37
	Cyclic wet/dry	0.55	300	C 30/37
Sea water chlorides	Mod. humidity	0.50	300	C 30/37
	Wet	0.45	320	C 35/45
	Cyclic wet/dry	0.40	340	C 35/45
Aggressive chemicals	Slight	0.50	320	C 30/37
	Moderate	0.45	320*	C 30/37
	High	0.45	350*	C 35/45

* Sulfate resistant cement

→ La résistance mécanique est insuffisante pour évaluer la durabilité "potentielle" des bétons (notamment avec additions) et pour qualifier une formule

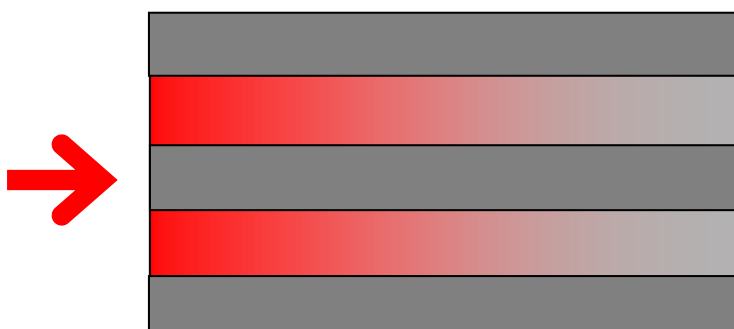


• Exemple : coefficient de diffusion "apparent" des chlorures (obtenu à partir d'essais de diffusion ou migration sur des bétons âgés de 28 ou 90 jours)

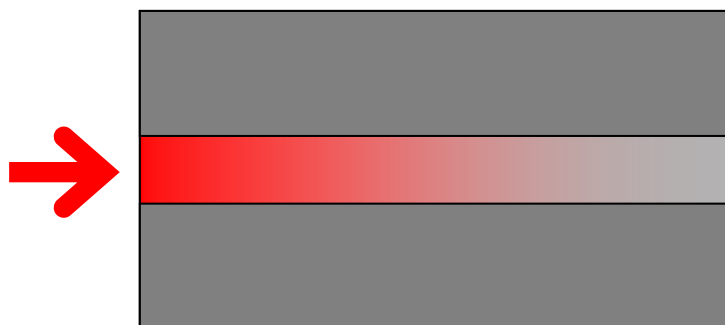


V. Baroghel-Bouny (LCPC)

Effet de la Porosité

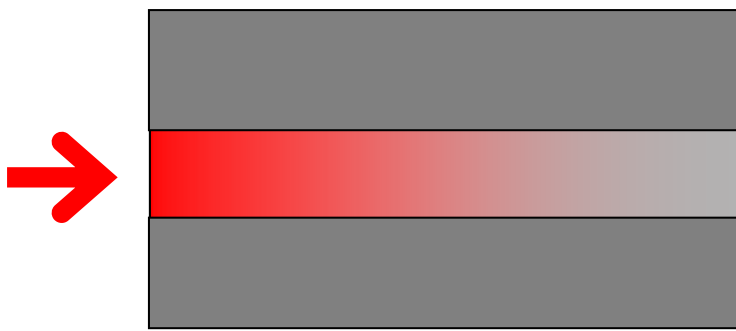


→ Porosité Elevée
→ Résistance au flux plus basse

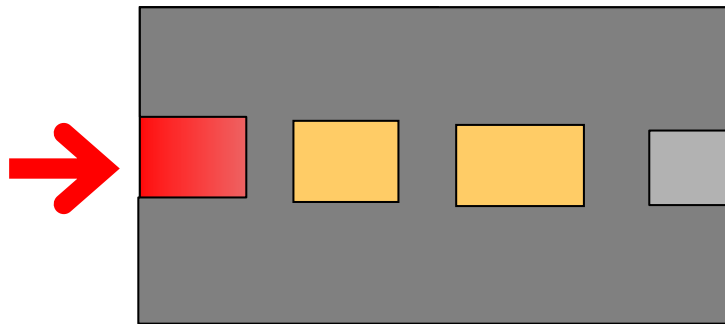


→ Porosité Basse
→ Résistance au flux plus haute

Effet de Connectivité

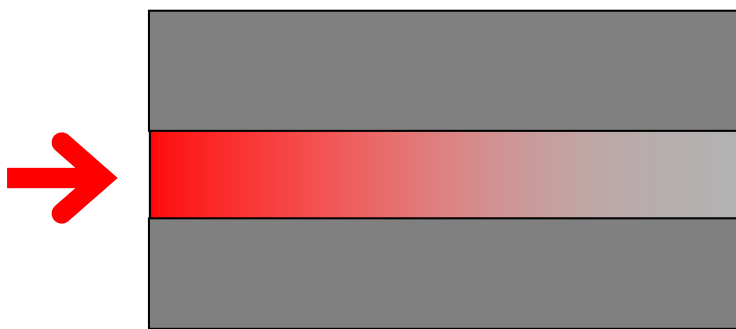


Pores connectés
→ Résistance au flux plus basse

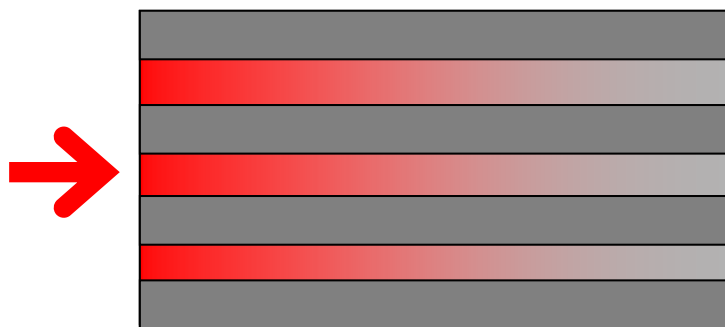


Pores isolés
→ Résistance au flux plus haute

Effet de Resserrement

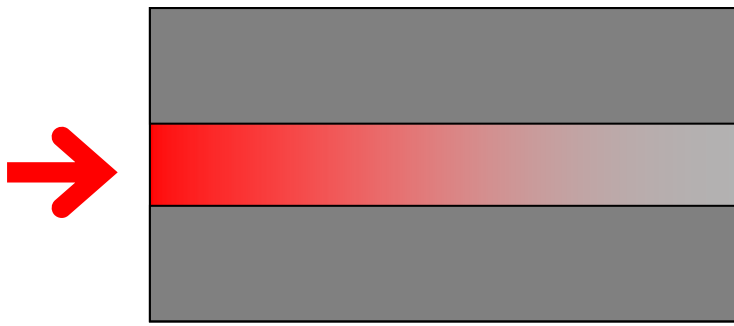


Un grand pore
→ Résistance au flux plus basse

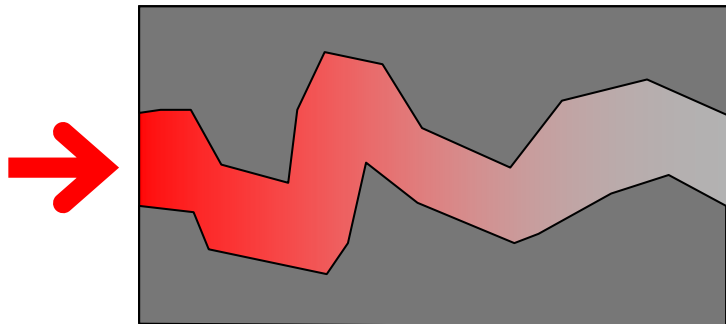


Plusieurs petits pores
→ Résistance au flux plus haute

Effet de la tortuosité



Pore rectiligne
Faible résistance
au flux



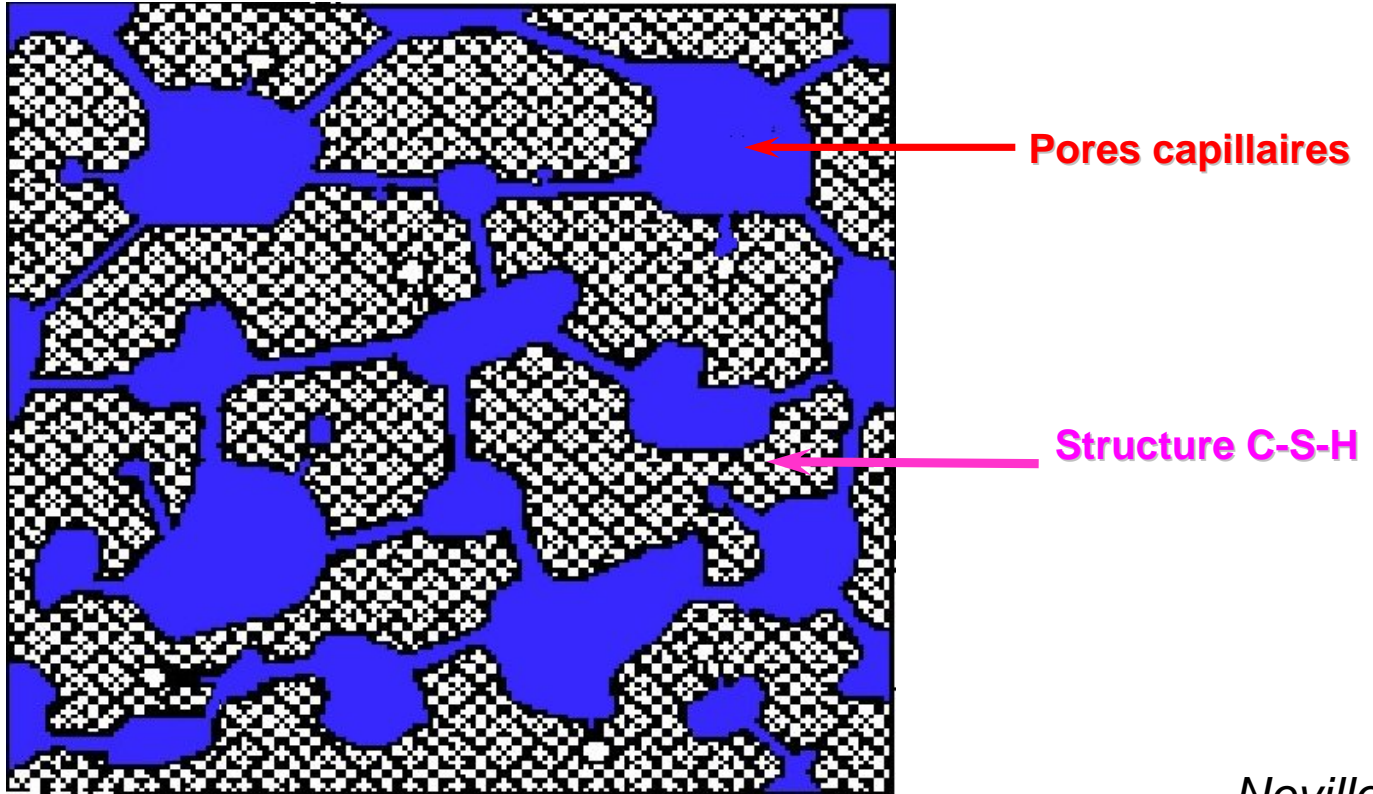
Pore tortueux
Résistance au flux
plus grande

Pour diminuer la perméabilité
d'un matériau poreux:

- Diminuer la porosité totale
- Diminuer la connectivité
- Diminuer la taille des pores
- Augmenter la tortuosité

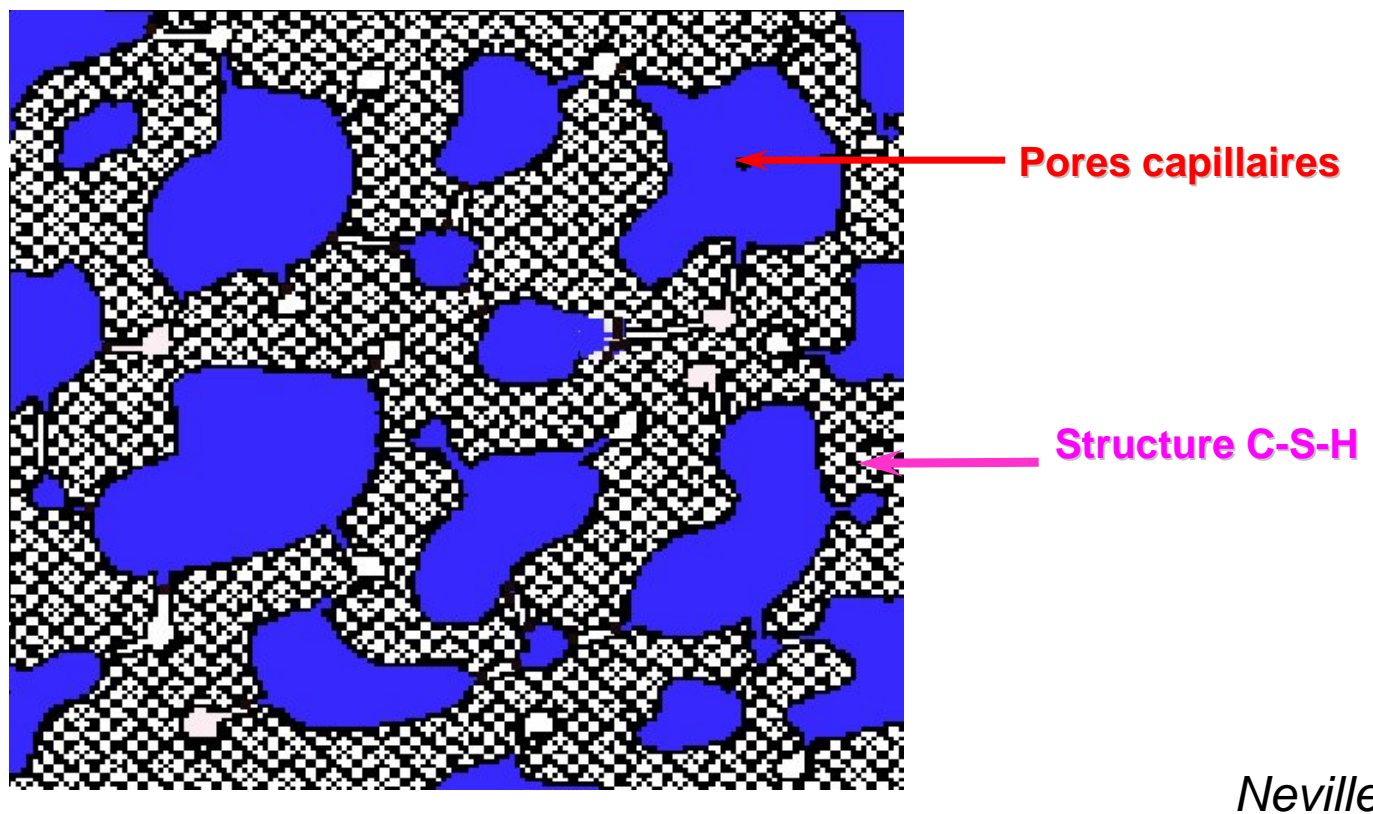
Perméabilité élevée

(Interconnection des pores capillaires)



Faible Perméabilité

Pores capillaires segmentés et partiellement connectés



Impact des paramètres du béton

La plupart du transport se passe dans la pâte de ciment

Donc, pour diminuer la perméabilité, vous devez modifier la pâte.

Réduction de la quantité de pâte:

- Diminuer le rapport eau / ciment
- Améliorer la composition granulométrique

Améliorer la qualité de la pâte:

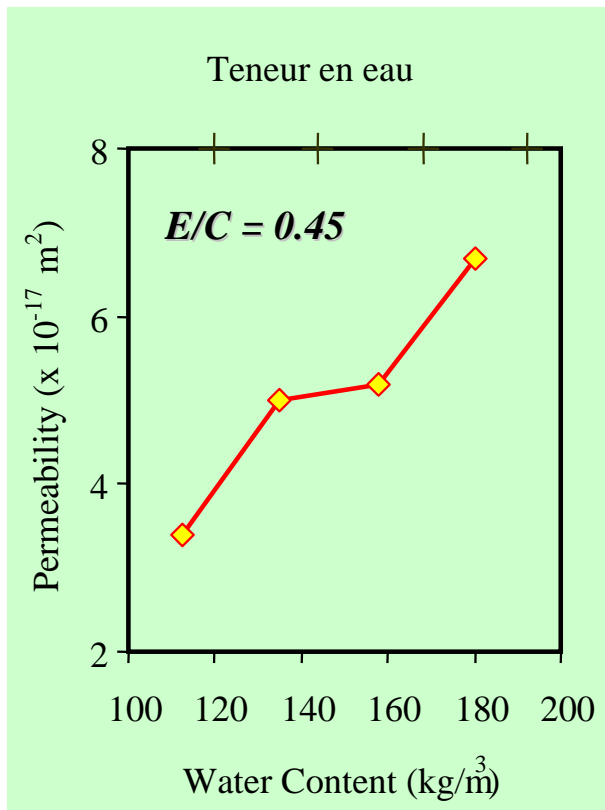
- Diminuer le rapport eau / ciment
- Utiliser SCM's

A dosage en ciment constant,

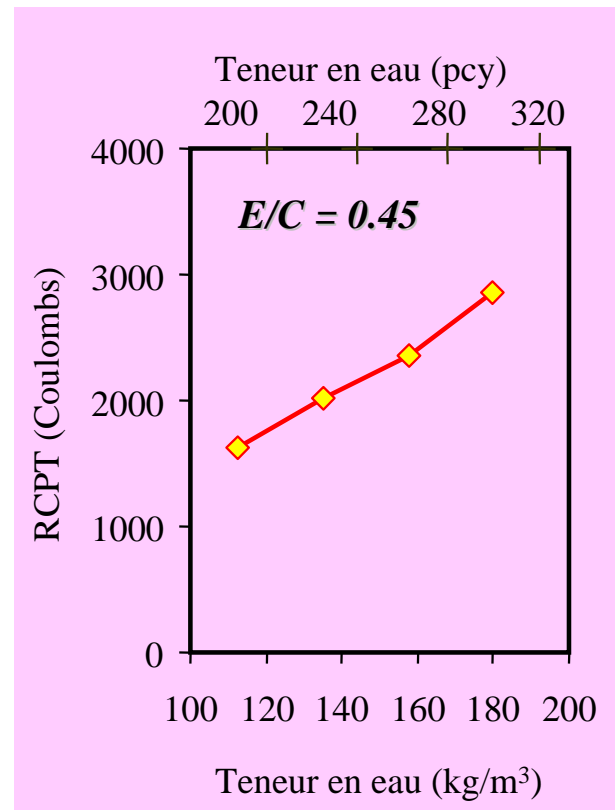
la réduction du rapport
eau / ciment

diminue la quantité de pâte,
donc la porosité totale

Effet de la teneur en eau



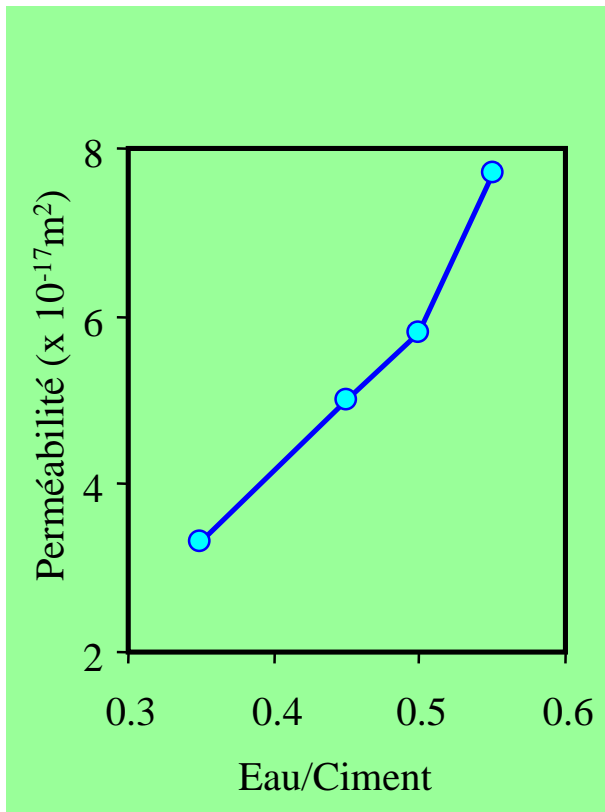
Perméabilité aux gaz



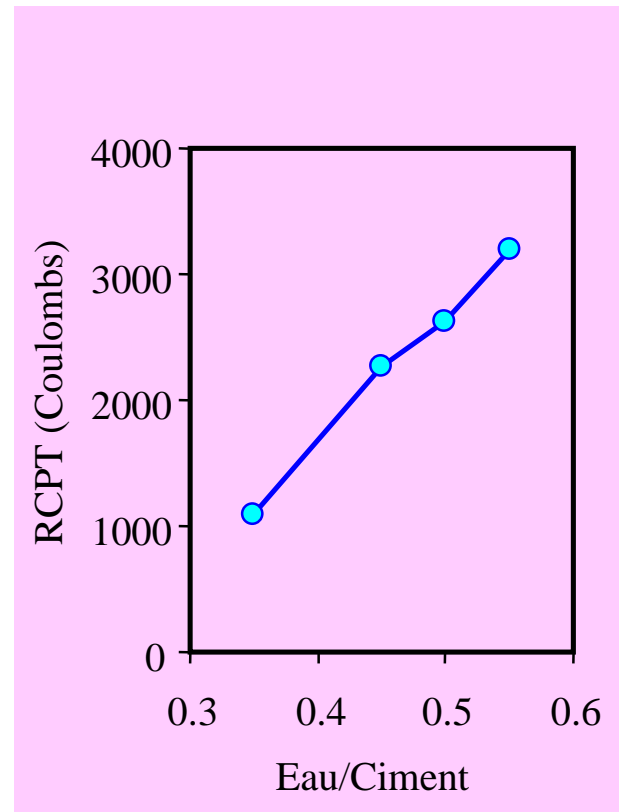
Perméabilité aux "Chlorures"

Améliorer la répartition granulométrique des granulats réduit le volume de la pâte, et donc la porosité totale.

Effet de E/C



Perméabilité aux Gaz



Perméabilité aux "Chlorures"