

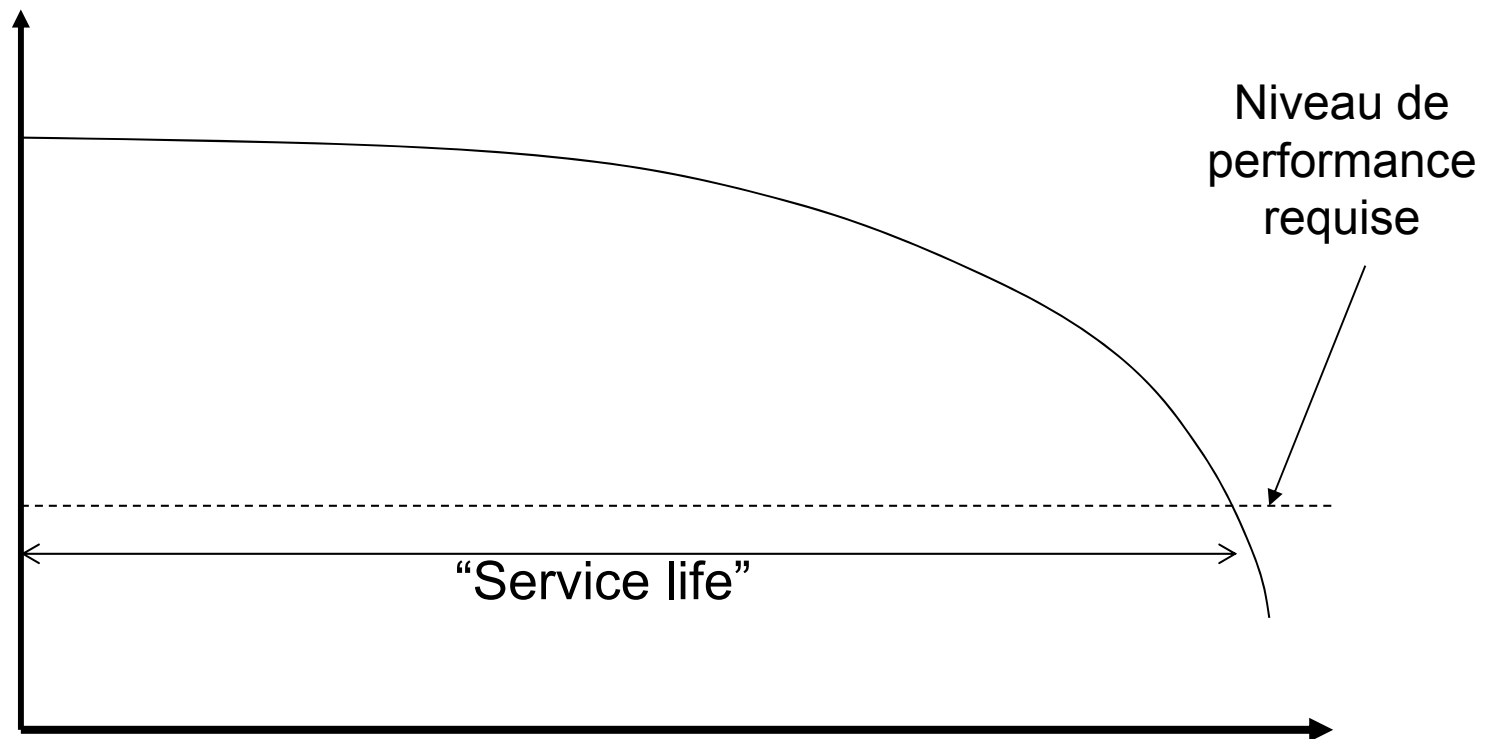
Durabilité



Bien que des ruptures structurelles se produisent, la plupart sont dues à des dégradations progressives des matériaux – i.e. manque de durabilité.

Durabilité

Maintien des performances



- **Un matériau n'est pas intrinsèquement durable ou non durable**
 - **la durabilité est une fonction de l'interaction du matériau avec son environnement.**
 - **Un béton plus durable est un béton plus coûteux**

Certaines structures romaines durent
depuis des millénaires



Pantheon (~ 120 a. J.C.)

Pourquoi cette excellente durabilité

- **Bonne qualité de construction**
les mauvais structure ne sont plus là!
- **L'environnement était relativement bénin**



Pourquoi cette excellente durabilité

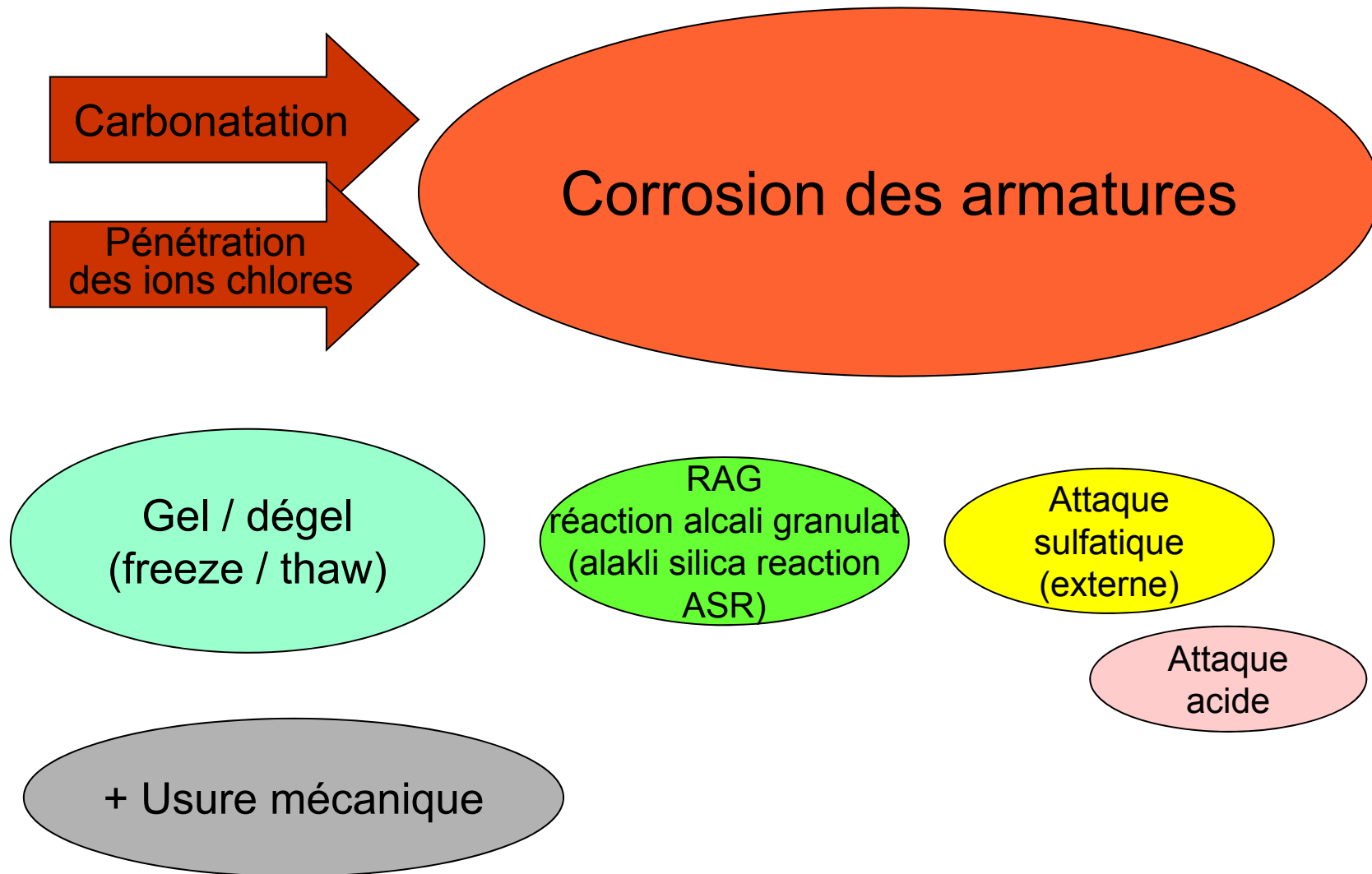
- Bonne qualité de construction
- L'environnement était relativement bénin
- Le béton ne contenait pas d'acier



La cause principale d'une mauvaise durabilité est la corrosion des armatures



Causes de dégradation des bétons



Les dimensions du problème

- Dans les pays développés, les dépenses pour les réparations des structures en béton constituent entre 50% et 100% des dépenses par rapport aux constructions nouvelles.
- En 1991, le « *Transportation Research Board* » (USA) a estimé les frais de réparations nécessaires à cause de l'utilisation de sels de déverglaçage comme suit:



— Tabliers des ponts \$200M / an
autres parties des ponts \$100M / an
parkings, etc. \$100M / an
\$400M / an

En suisse on pense que le coût annuel des réparations des structures est équivalent à 10% du PIB !!

Manifestation des dégradations

Taches de rouille

Rust Staining



Délamination

Delamination





Distribution des Fissures – “Map Cracking”



Echelonnage de surface

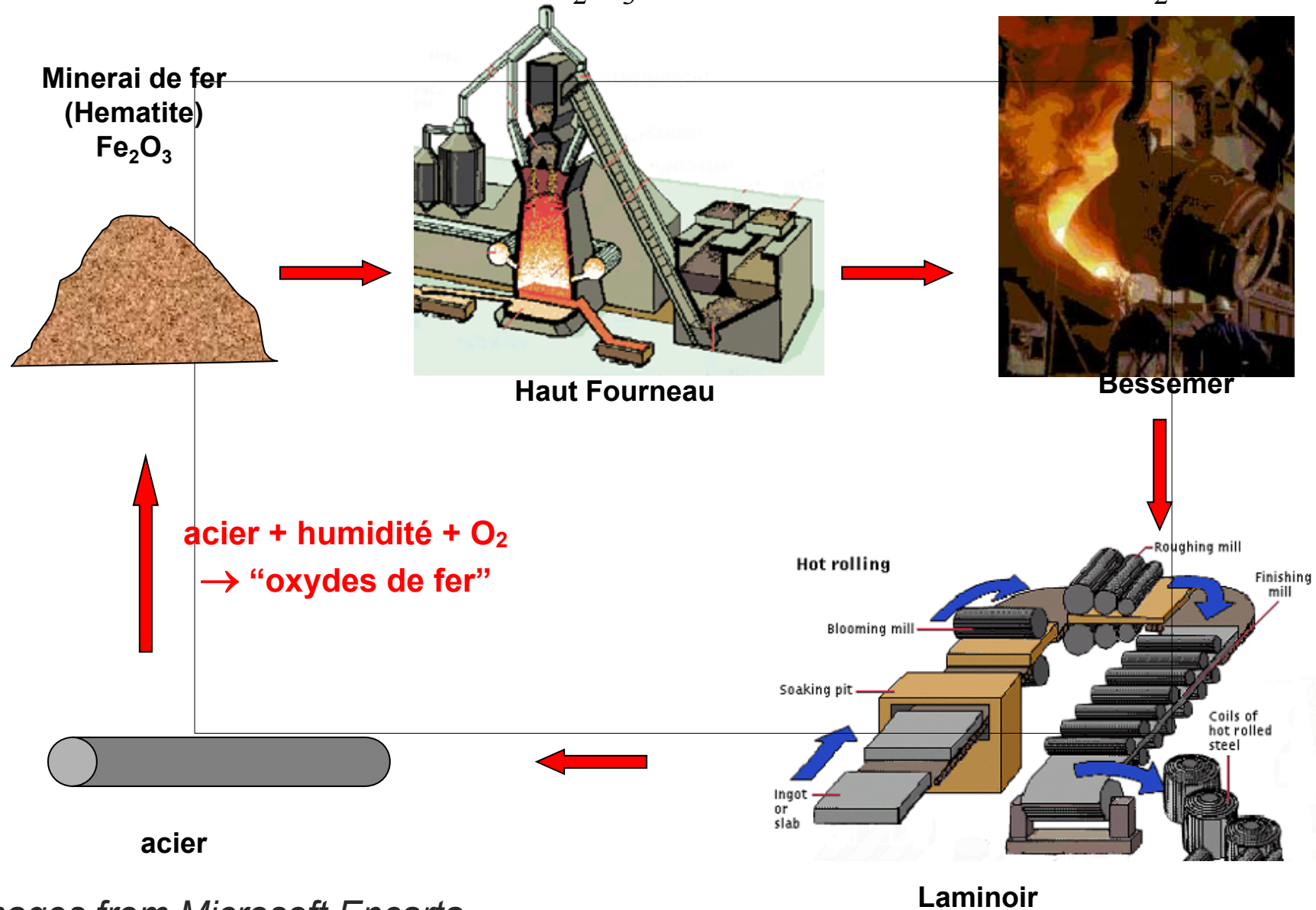
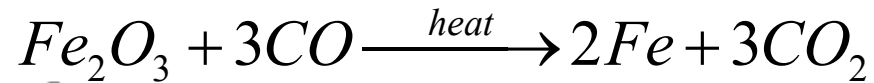
Surface Scaling



A horizontal orange oval with a thin black border, centered on a white background.

Corrosion des armatures

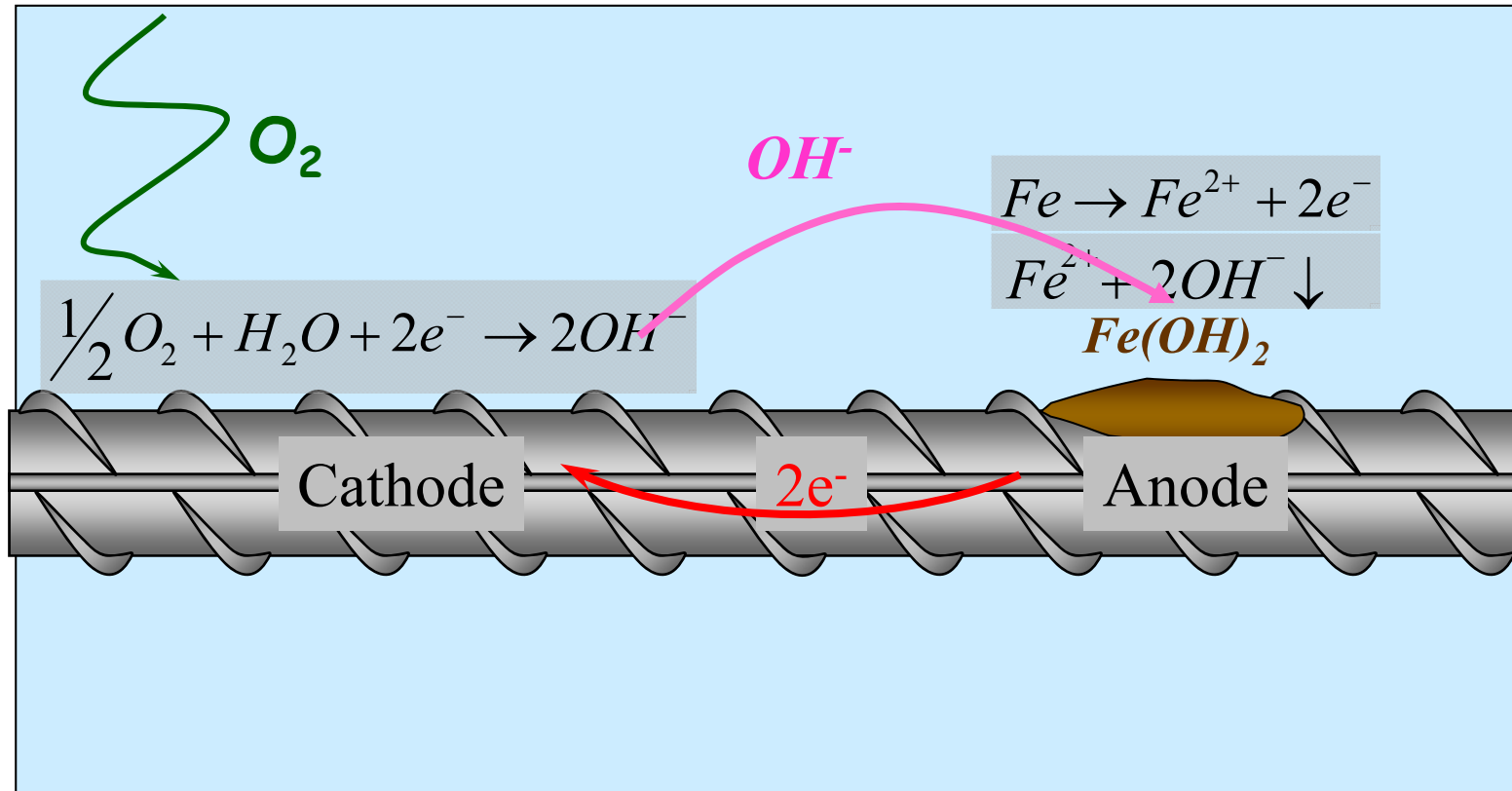
Les oxydes de fer sont thermodynamiquement plus stables que le métal



Images from Microsoft Encarta

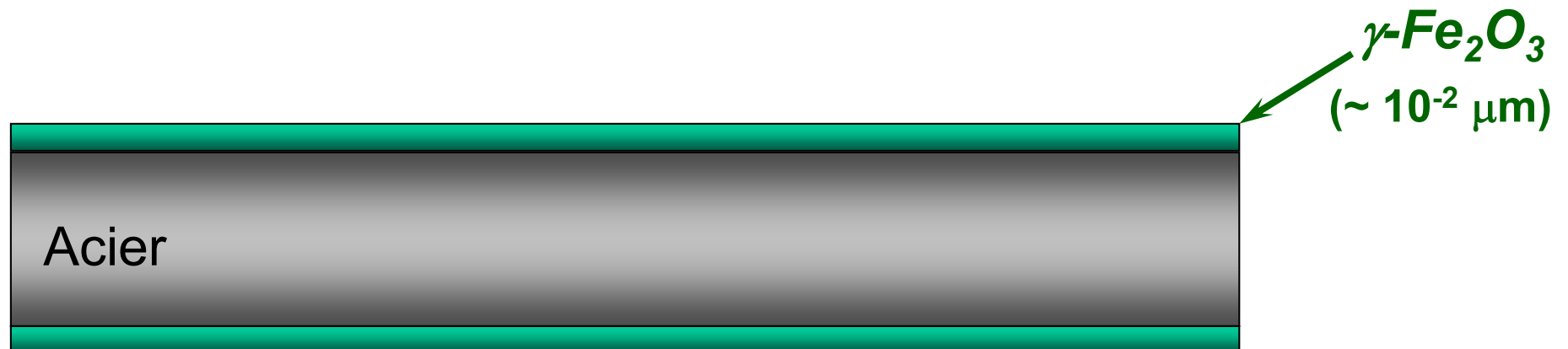
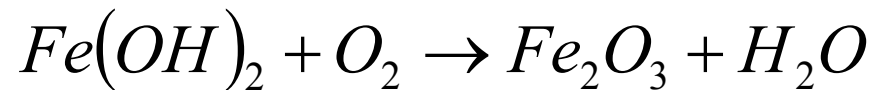
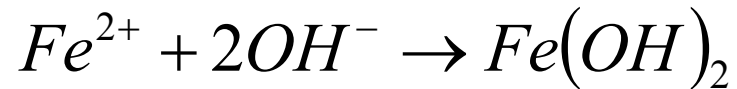
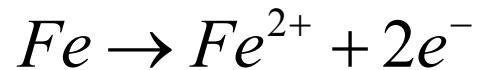
Un processus *électrochimique*

Réaction en 2 parties avec circuit électrique:



Pourquoi tous les aciers ne sont pas
corrodés dans le béton?

Les conditions alcalines (pH>13) dans un béton favorisent la formation d'une couche passive sur l'acier



Passivation

Dans certaines conditions, les métaux vont se corroder et former un film d'oxyde de métal dense, très adhérent sur leur surface.

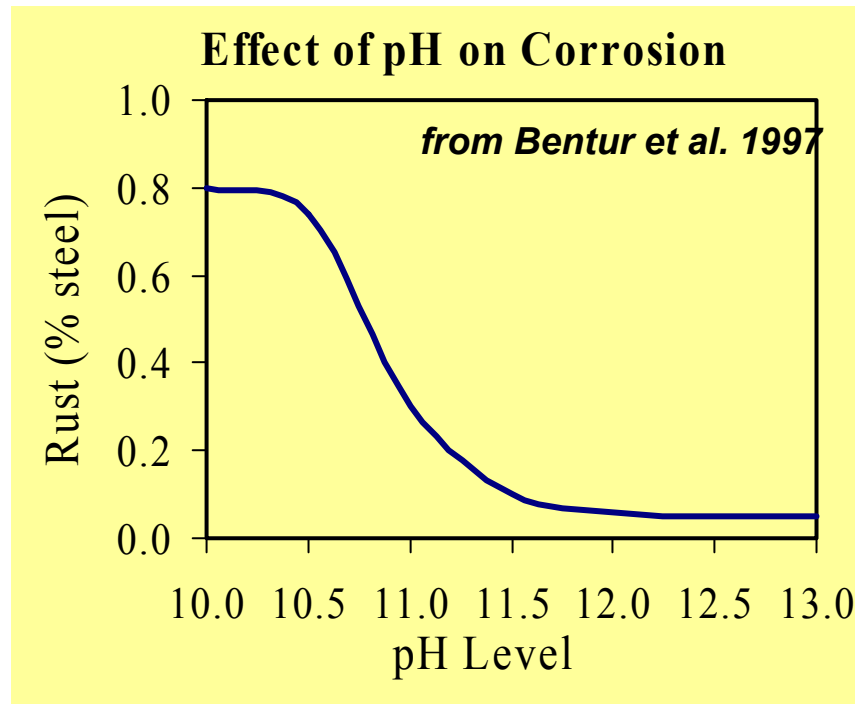
Cette couche isole le métal de l'électrolyte (et de l'oxygène), et empêche efficacement le processus de corrosion.

Ce processus est appelé ***passivation*** et le film à la surface est la ***couche passive***.

Aussi longtemps que la couche passive reste efficace, le processus de corrosion se maintient à un taux négligeable.

Pour que la couche passive reste efficace, elle doit former une couche dense, continue, uniforme, très adhérente sur la surface du métal.

L'efficacité/stabilité de la couche passive dépend des conditions environnementales entourant le métal.



L'acier n'est efficacement **passivé** que si la concentration de ions OH^- est assez élevée.

$$pH = 14 + \log[OH^-]$$

Dans le béton: **$13 < pH < 14$**

$$0.1 < [OH^-] < 1.0$$

L'acier dans le béton peut être **dépassivé** en cas de:

- réduction du pH (concentration de ions OH^-)
- présence suffisante de chlorures proche d'acier pour "déstabiliser" la couche passive

Analyse Typique d'Oxyde pour le ciment Portland

Oxide	OPC
SiO ₂	20.55
Al ₂ O ₃	5.07
Fe ₂ O ₃	3.10
CaO	64.51
MgO	1.53
K ₂ O	0.73
Na ₂ O	0.15
SO ₃	2.53
LOI	1.58

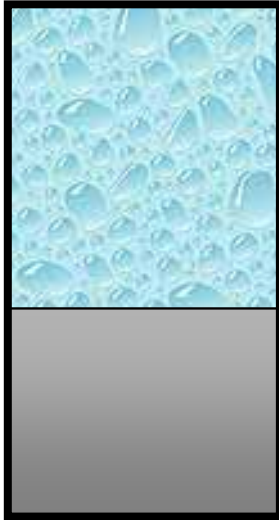
+ other trace elements

100 g de ciment contiennent:-

- 0.73 g d'oxyde de potassium (K_2O)
≡ 0.61 g potassium (K)
- 0.15 g d'oxyde de sodium (Na_2O)
≡ 0.11 g sodium (Na)

**L'hydratation de 100 g de ciment
produit approximativement 20 - 25 g
de $Ca(OH)_2$**

pH du béton



50 g eau

100 g ciment

pH du béton



30 g eau

120 g ciment hydraté

à 70% d'hydratation

En admettant que 70% des alcalins sont dissous

Il y a 0.42 g K^+ et 0.08 g Na^+ dans 30 ml d'eau

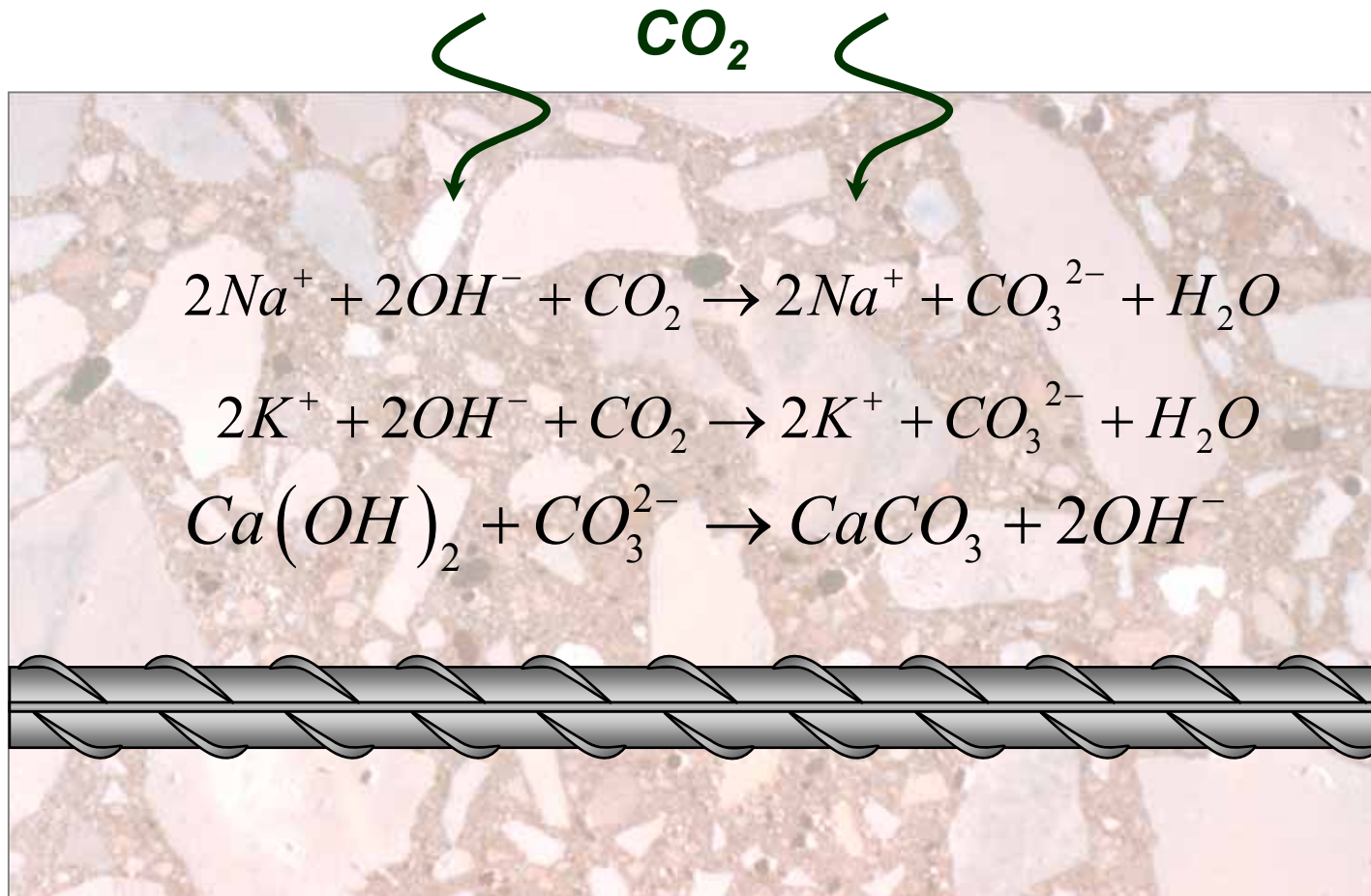
soit 14.1 g K^+ et 2.6 g Na^+ par litre d'eau

correspondant à 0.36 mol K^+ et 0.11 mol Na^+ par litre d'eau

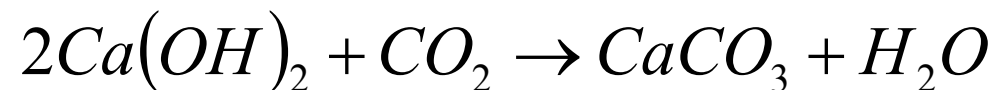
$0.36 + 0.11 = 0.47$ mol OH^- par litre d'eau associée avec les alcalis;
ce qui correspond à $pH = 14 + \log [0.47] = 13.67$

Carbonatation

Carbonatation du béton



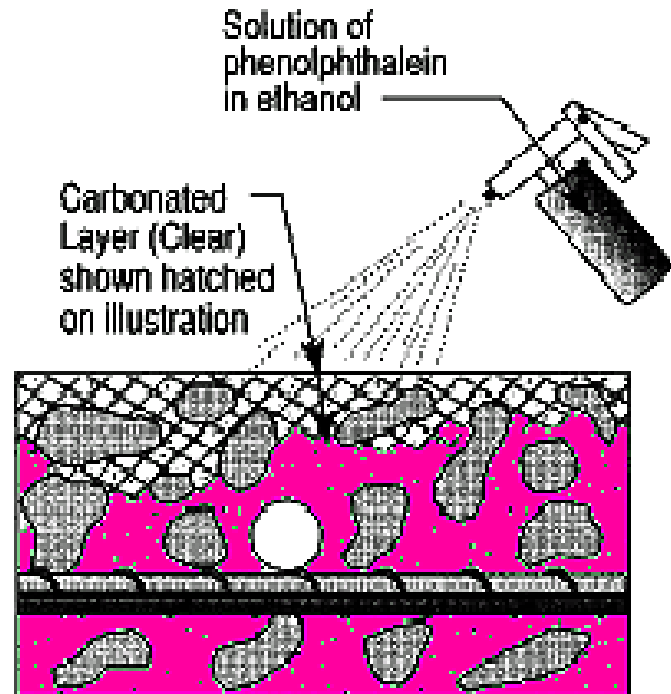
Reaction globale



Note:


d'autres hydrates (e.g. C-S-H) carbonatent aussi, mais ce n'est pas décrit ici.

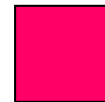
Carbonatation du béton



Surfaces with pH below 10 (carbonated) will have no change in color, with a pH above 10 the color of concrete will change to a pink color.

Le béton **carbonaté** a un $\text{pH} < 9.0$
(~ 8 selon Bentur *et al*, 1997)

Indicateur Phenolphthaléine 
(indicateur de base acide)
est un moyen pratique de mesurer
la profondeur de la carbonatation
lorsqu'elle change
du violet → au neutre
selon la figure:

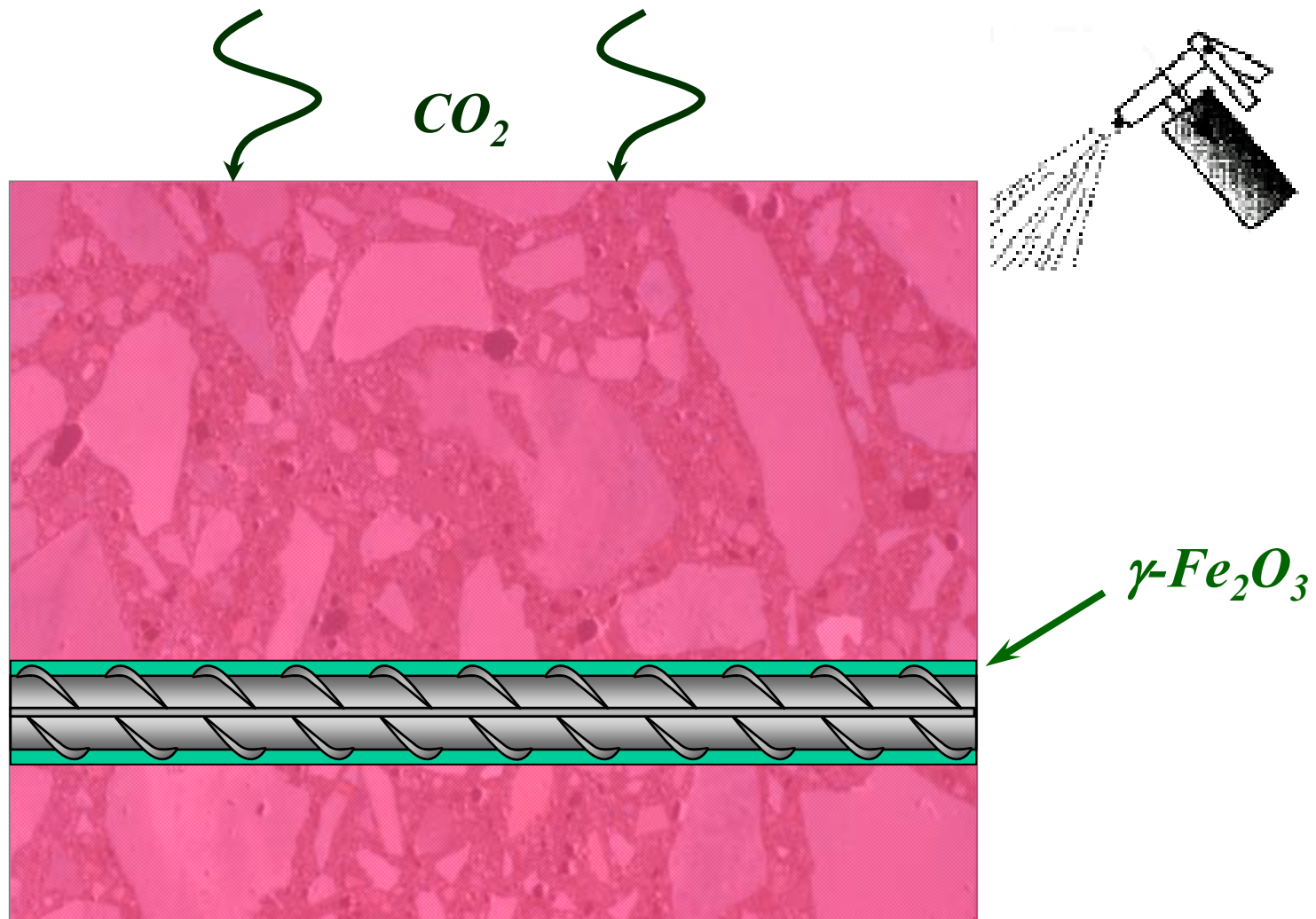


$\text{pH} > 9.2$ (violet)



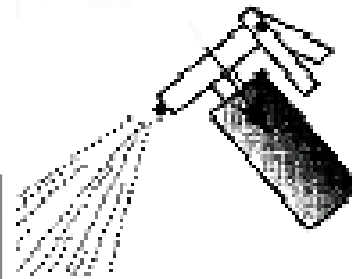
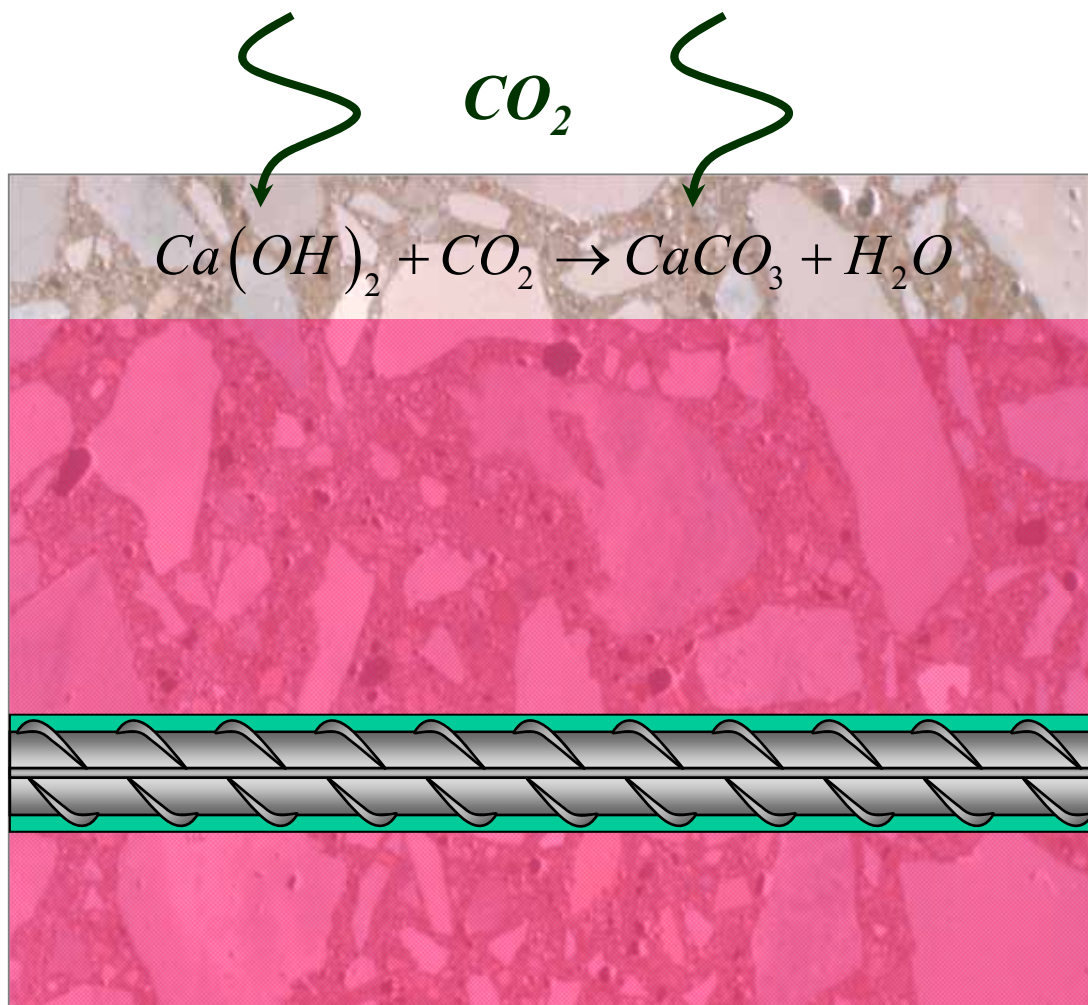
$\text{pH} < 9.2$ (neutre)

Carbonatation du béton



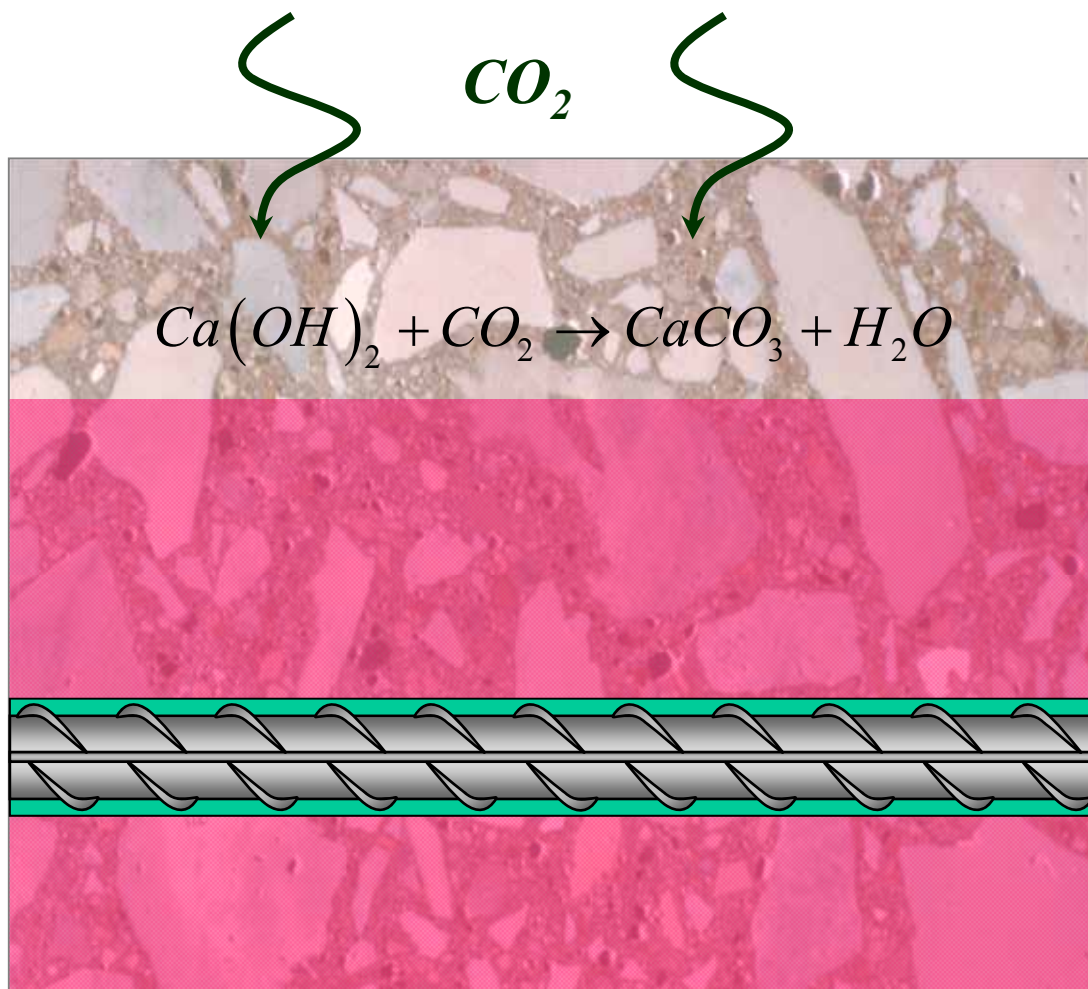
t_0

Carbonatation du béton



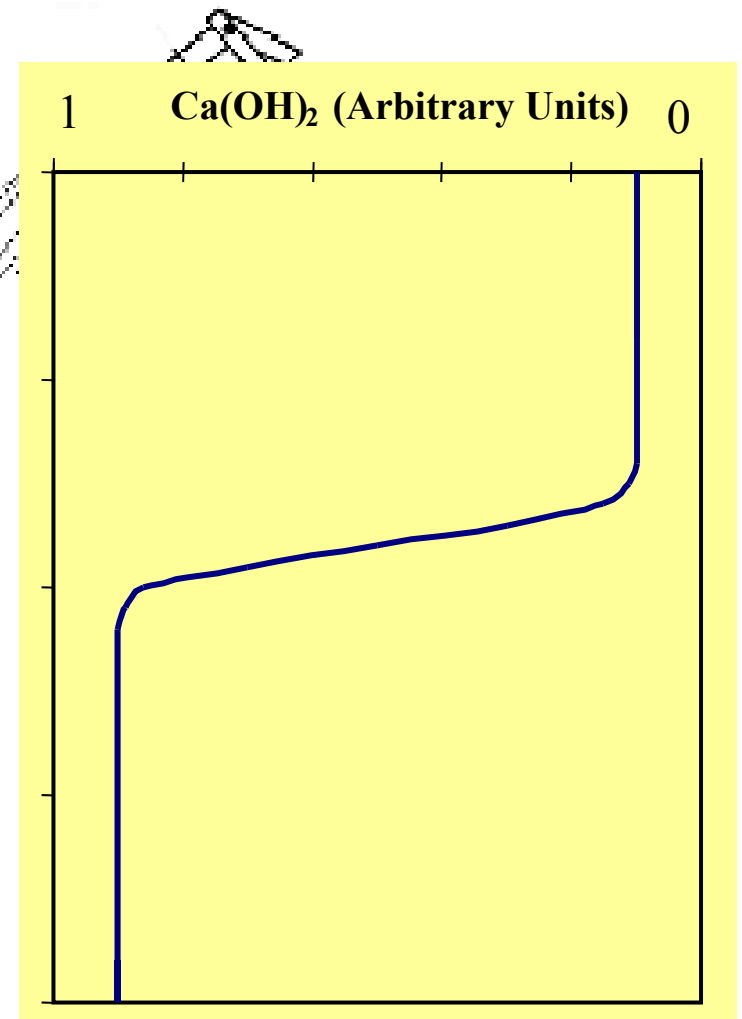
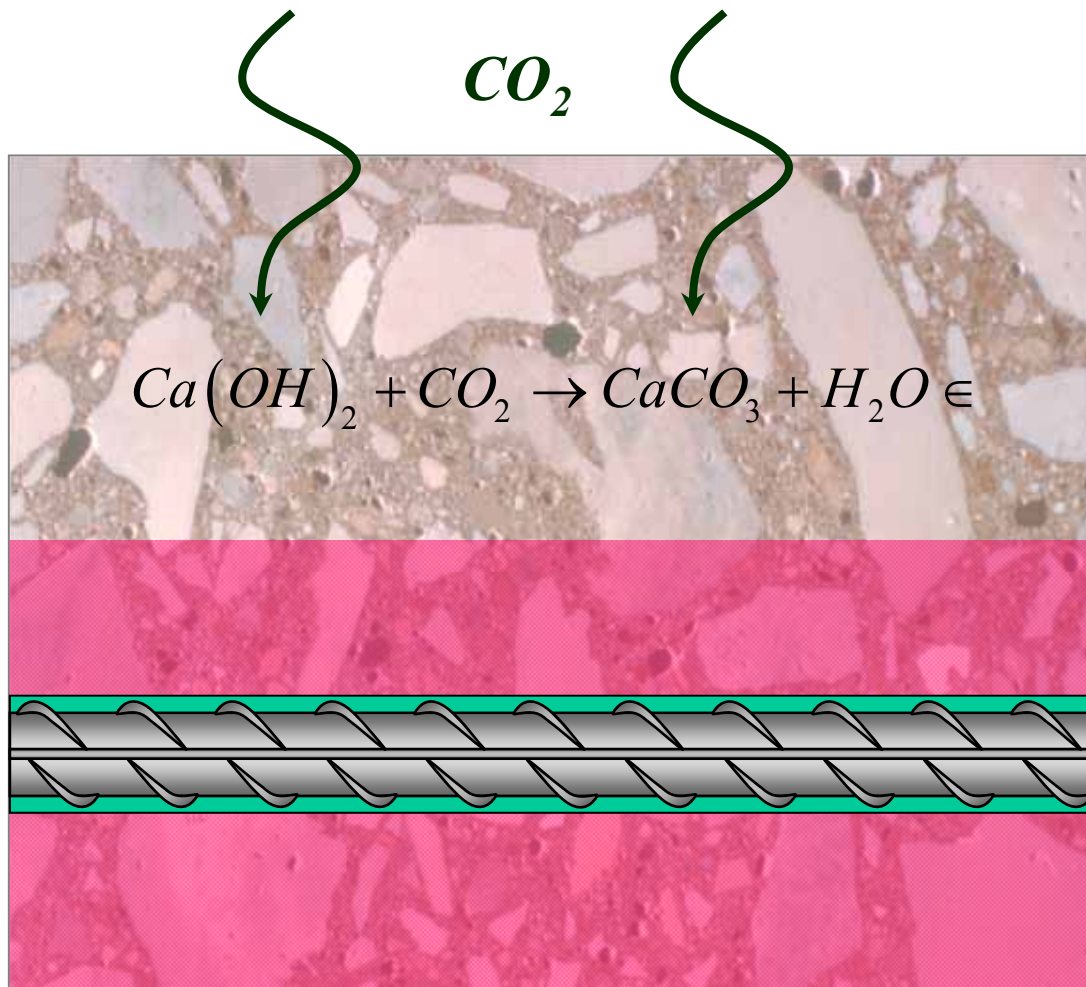
$$t_1 > t_0$$

Carbonatation du béton



$$t_2 > t_1$$

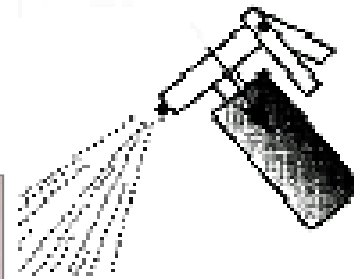
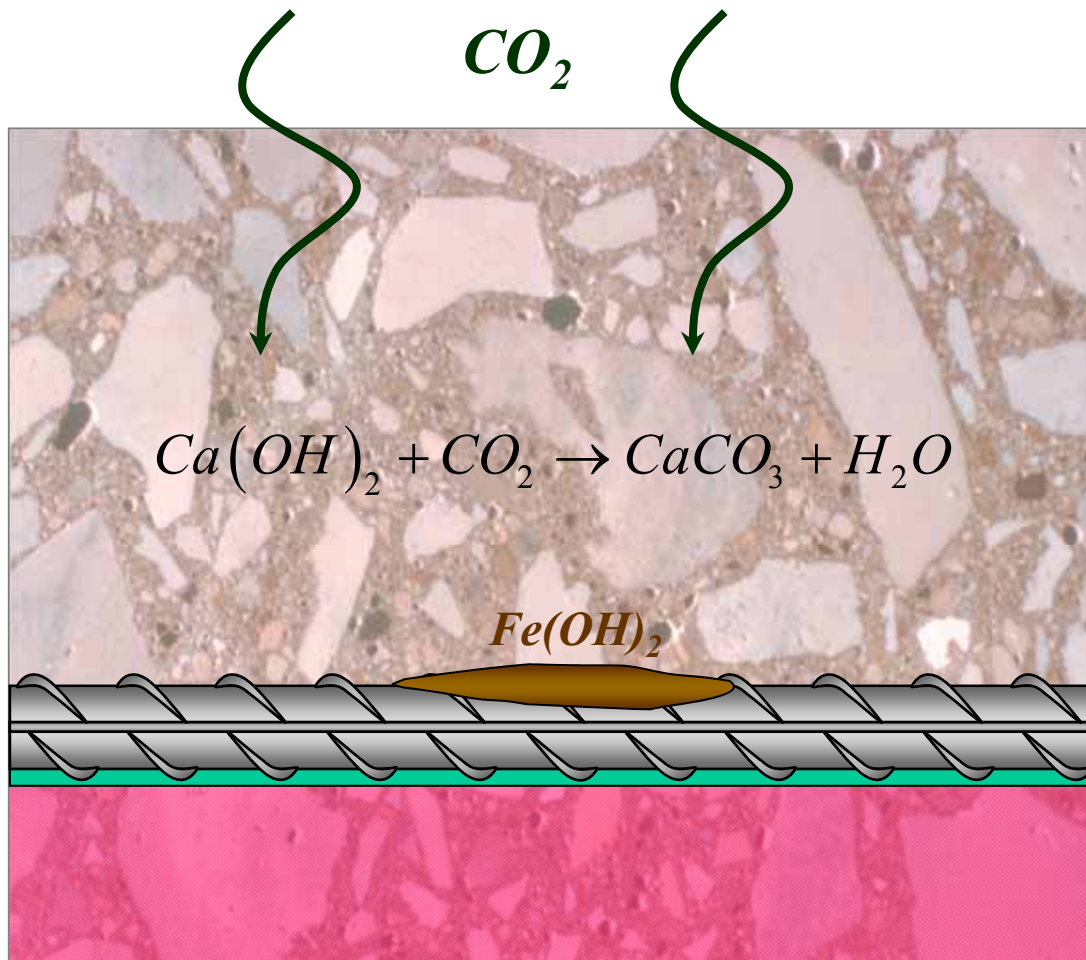
Carbonatation du béton



$$t_3 > t_2$$

Le front de carbonatation est abrupt
avec le changement de $pH > 13$ à $pH < 9$
se produisant sur quelques mm de béton

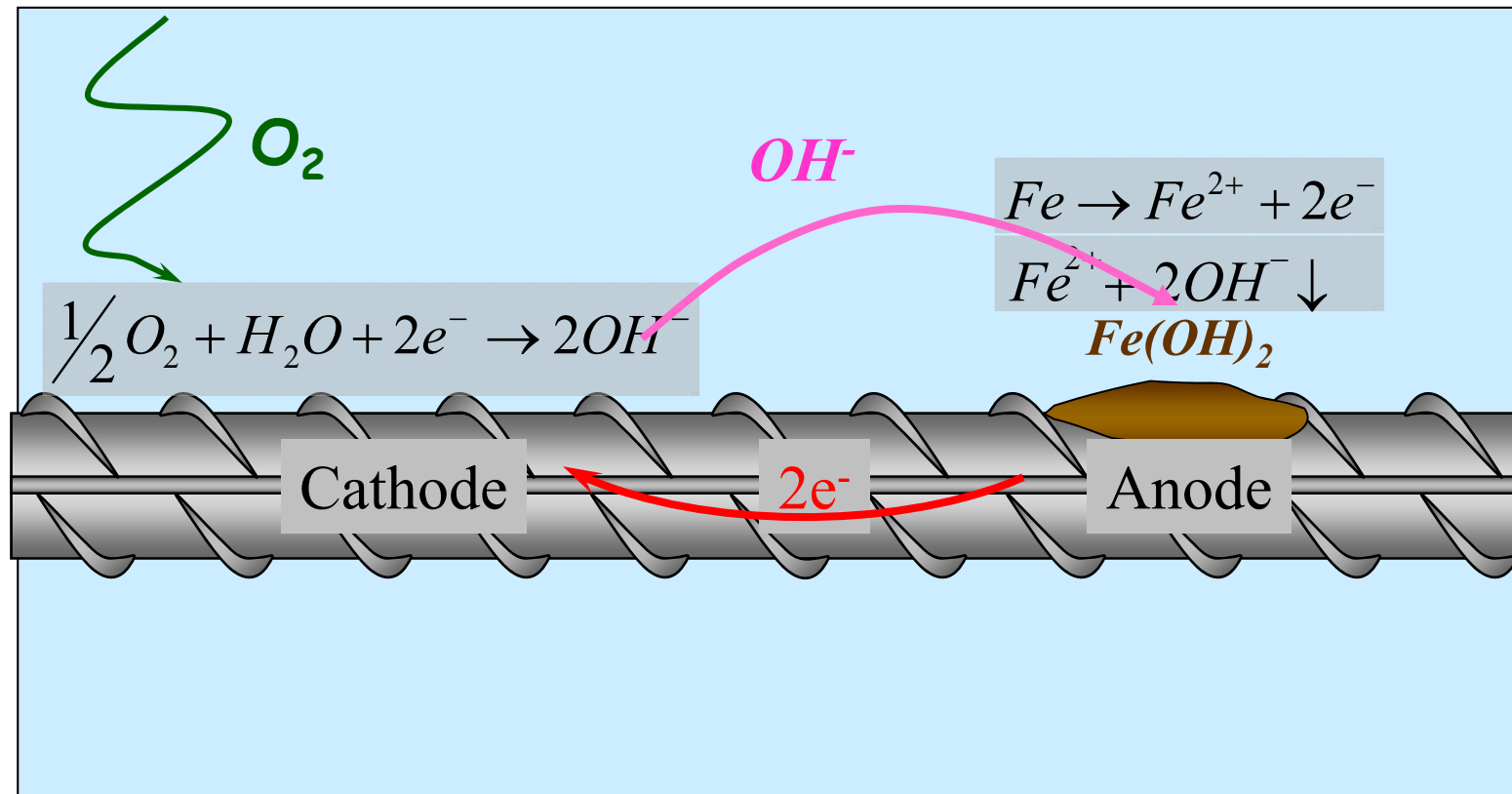
Carbonation du béton



Le processus de corrosion débute au temps t_i quand le front de carbonatation atteint le niveau d'acier

$$t_i > t_3$$

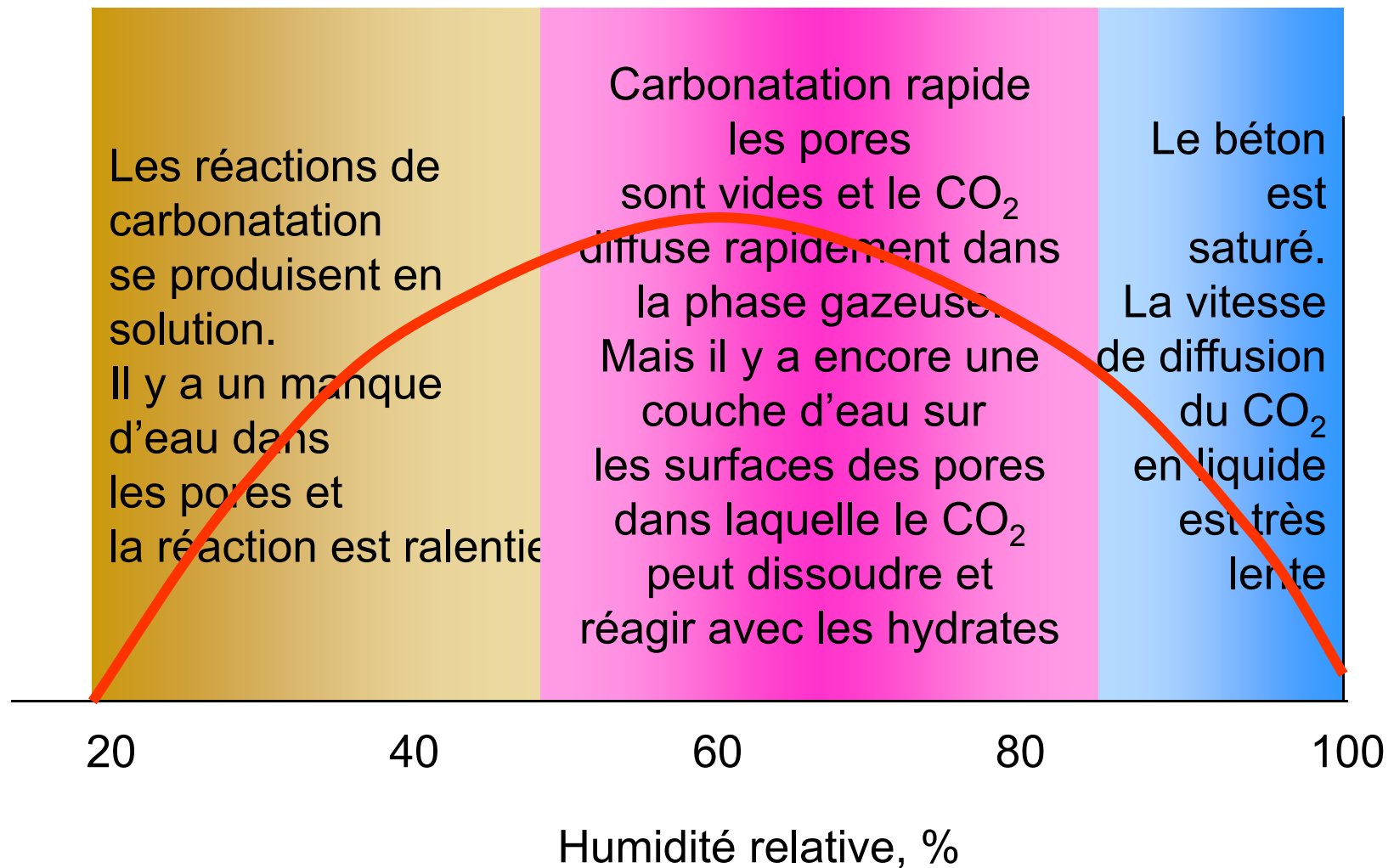
Dans le cas de l'acier:



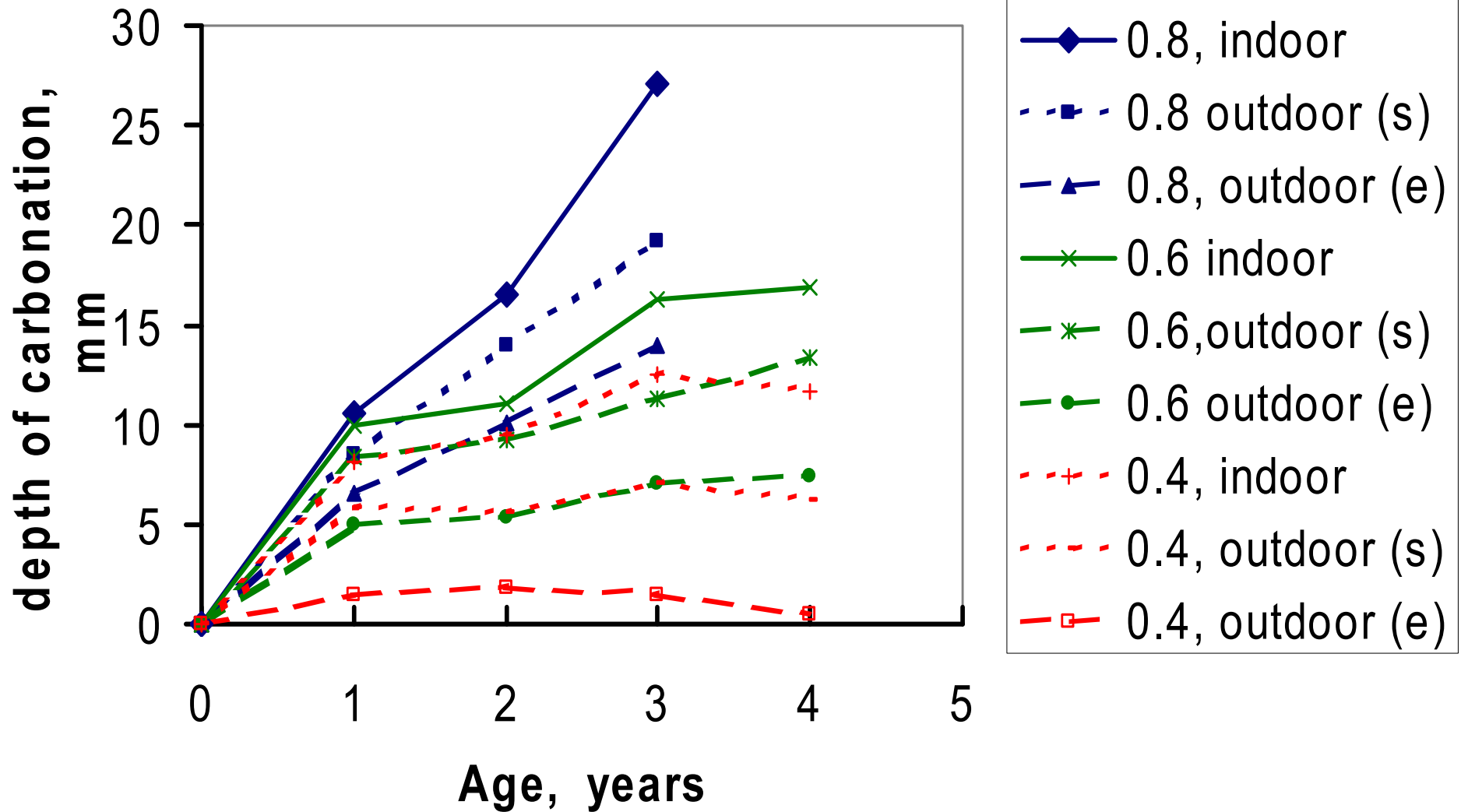


La photo 1 montre un éclat de béton résultant de la corrosion d'une barre d'armature
 – à noter les taches de rouille où la fissure atteint l'acier.
 Après avoir sprayé la surface fraîchement fissurée avec de la phenolphthaléine (Photo 2), on peut voir que la couche de béton sur la surface extérieure de la barre a été carbonatée (Photo 3). Beaucoup de béton entourant la barre d'armature reste hautement alcalin, cependant.

Vitesse de carbonatation



Epaisseur carbonatée



Paramètres importants

Qualité du Béton

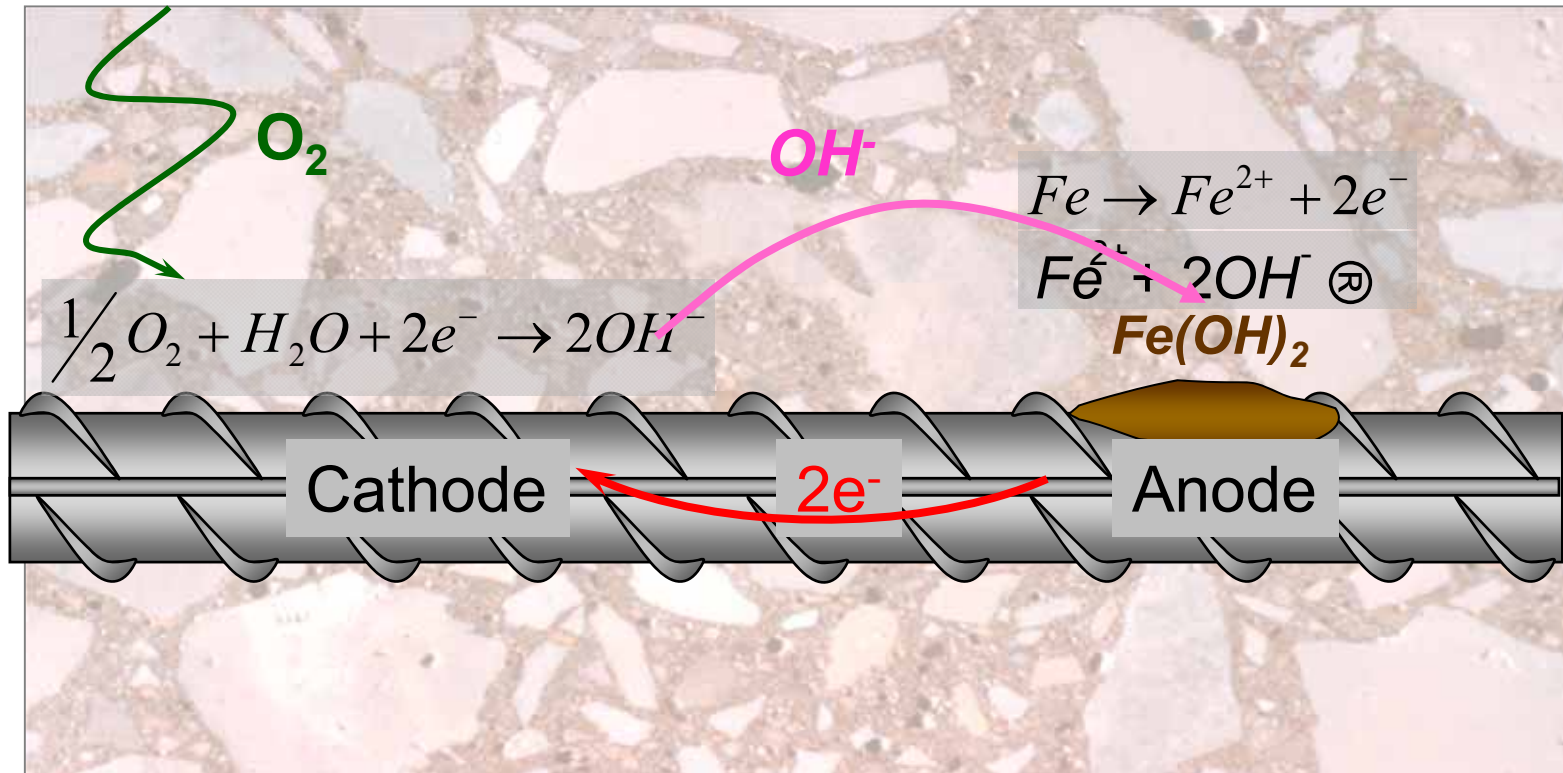
- **Rapport E/C**
- **Degré d'hydratation / Cure**

Épaisseur de la couche autour des armatures

Environnement

- **L'humidité relative**

Quand l'alcalinité est réduite:

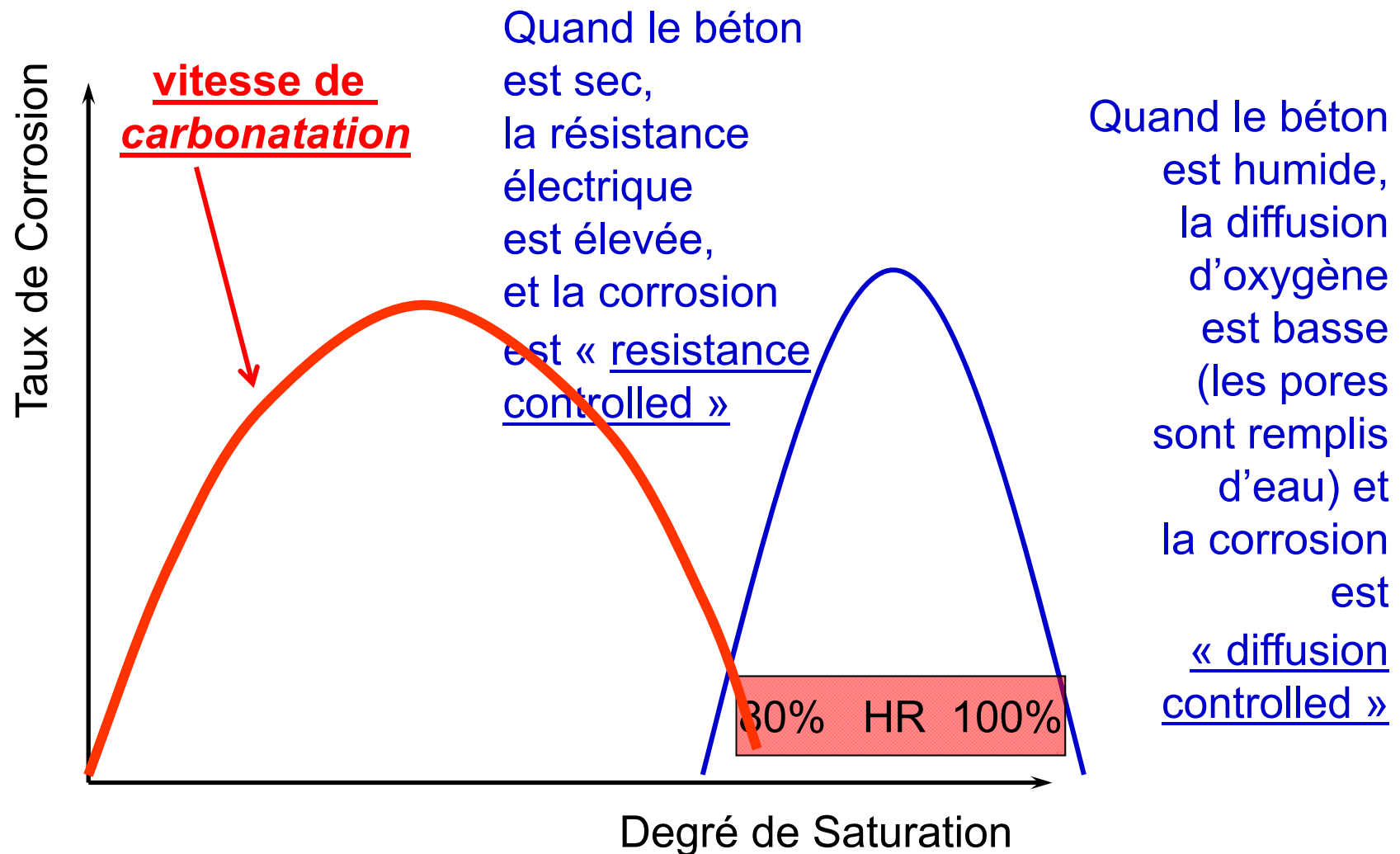


Corrosion active – la vitesse est contrôlée par:

1. l'arrivée d'oxygène à la cathode
2. Le transfert des ions OH^- de la cathode à l'anode

PERMEABILITÉ
DIFFUSION
RESISTIVITÉ

Effet de la teneur en eau sur la vitesse de corrosion



Note:- l'eau participe également à la réaction cathodique.

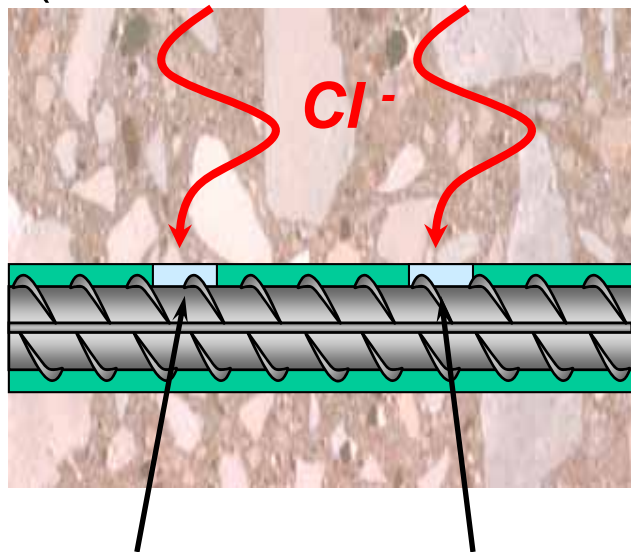
Effet des chlorures

Il est maintenant reconnu que la présence de ions chlores dans le béton armé peut provoquer la corrosion de l'acier (avec une présence suffisante de O_2 et H_2O pour soutenir la réaction).

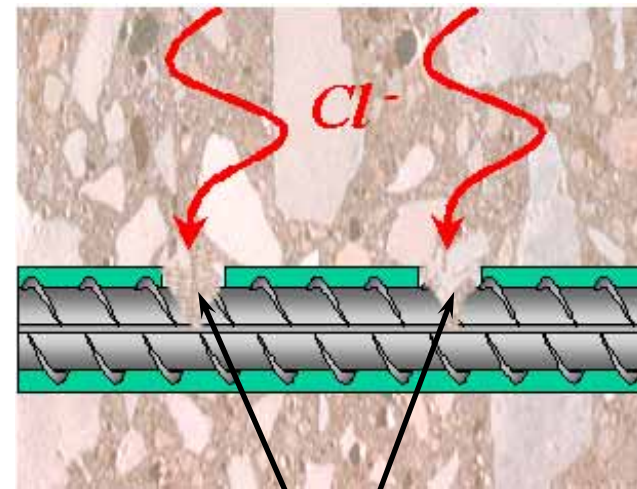
- La structure de la couche passive et sa dégradation par les chlorures n'est pas totalement comprise
- On pense généralement que les ions chlore s'introduisent dans la couche passive – remplaçant un peu de l'oxygène et augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité et sa conductivité ionique
- La couche passive perd donc sa propriété protectrice
- Il y a une concentration critique des ions chlores qui provoque la corrosion

Effet des chlorures

- Les ions chlorures sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier et il subsiste quelques imperfections dans la couche passive qui facilitent l'incorporation des ions chlorure.
- Par conséquent, la dégradation de la couche passive est un phénomène local.
- Cela conduit à une corrosion par piqûre (avec un taux élevé de cathode-anode).



Défauts dans la couche passive et/ou Cl^- élevé



Piqûres

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



<http://www.vectorgroup.com/CorrosionOverview.pdf>

Sources de chlorures dans le béton

- Chlorure dans l'eau de mer (structures marines, ports, plate-formes pétrolières, ponts côtiers, tunnels, bateaux)
- Chlorure dans l'eau souterraine (structures enterrées, pilônes, tunnels, fondations)
- Chlorures de sel de déverglaçage ~ e.g. (autoroutes, ponts, parkings, etc.)

Sources externes de chlorures

Sources de chlorures dans le béton; à éviter

- Adjuvants chimiques
 - e.g. CaCl_2 utilisé comme accélérateur d'hydratation
 - Quelques autres peuvent contenir de faibles quantités de Cl
- Certains granulats peuvent contenir du NaCl
 - e.g. sable de mer
 - granulat contenant le minéral *halite*
- L'eau de gâchage peut contenir des chlorures

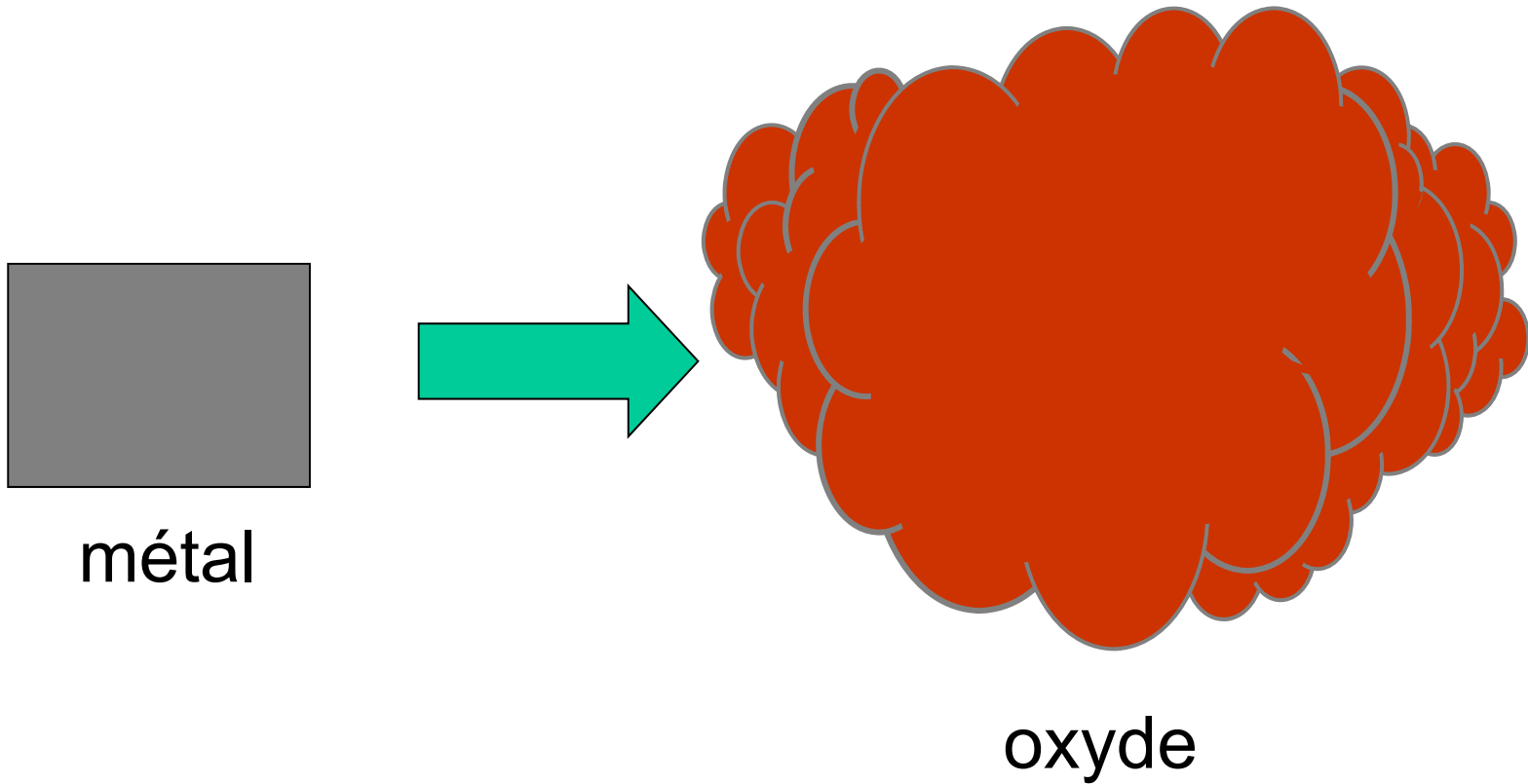
Provenance
interne de chlorures

Les normes limitent la teneur en chlorures des bétons.
< 0.10%

Comment ralentir la corrosion des armatures par carbonatation ou attaque de chlorures?

- **Augmenter la couche de béton entre l'environnement et les armatures – « cover »**
- **Diminuer la vitesse de pénétration du CO_2 ou Cl^- – “perméabilité”**

Conséquences de la corrosion sur le béton



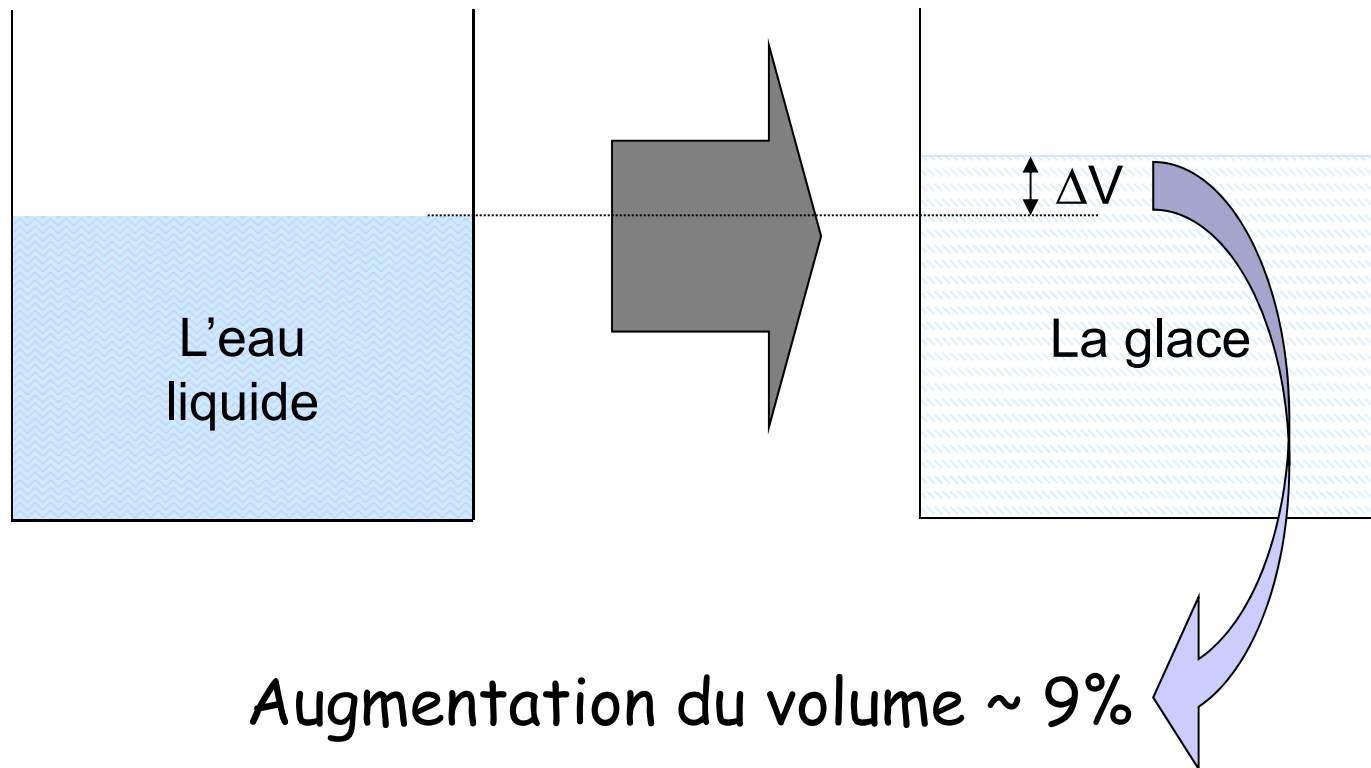
Augmentation du volume, jusqu'à 7x

Délamination

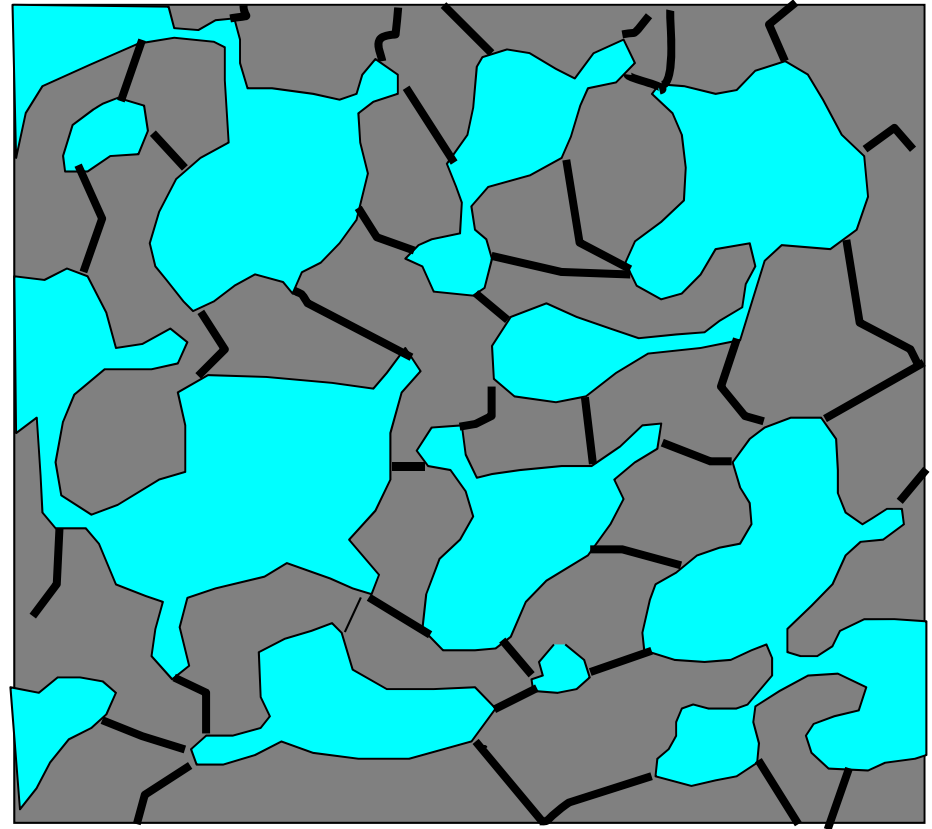
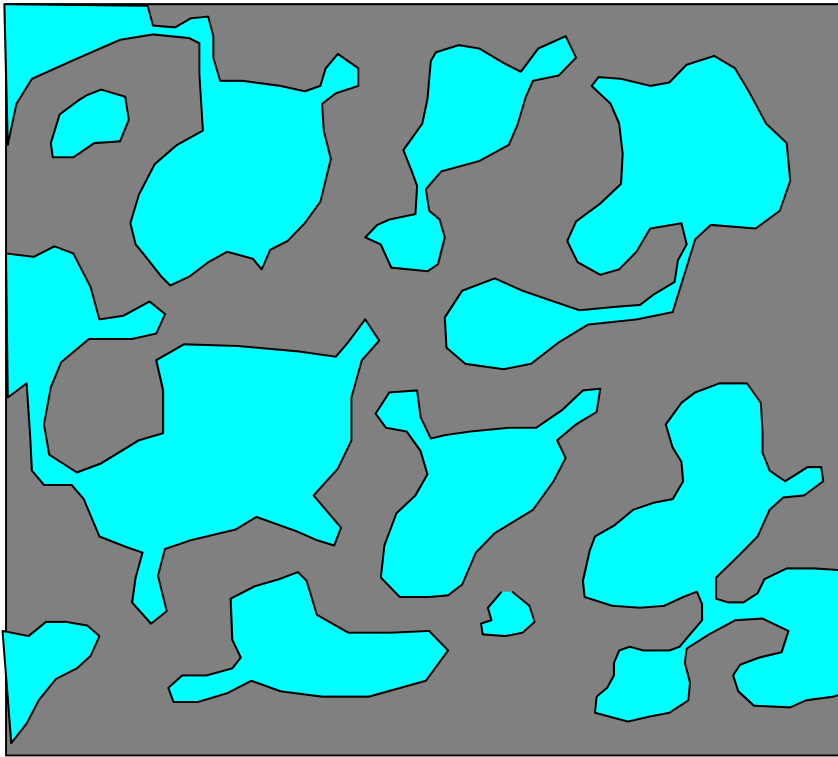
Delamination



Gel Dégel

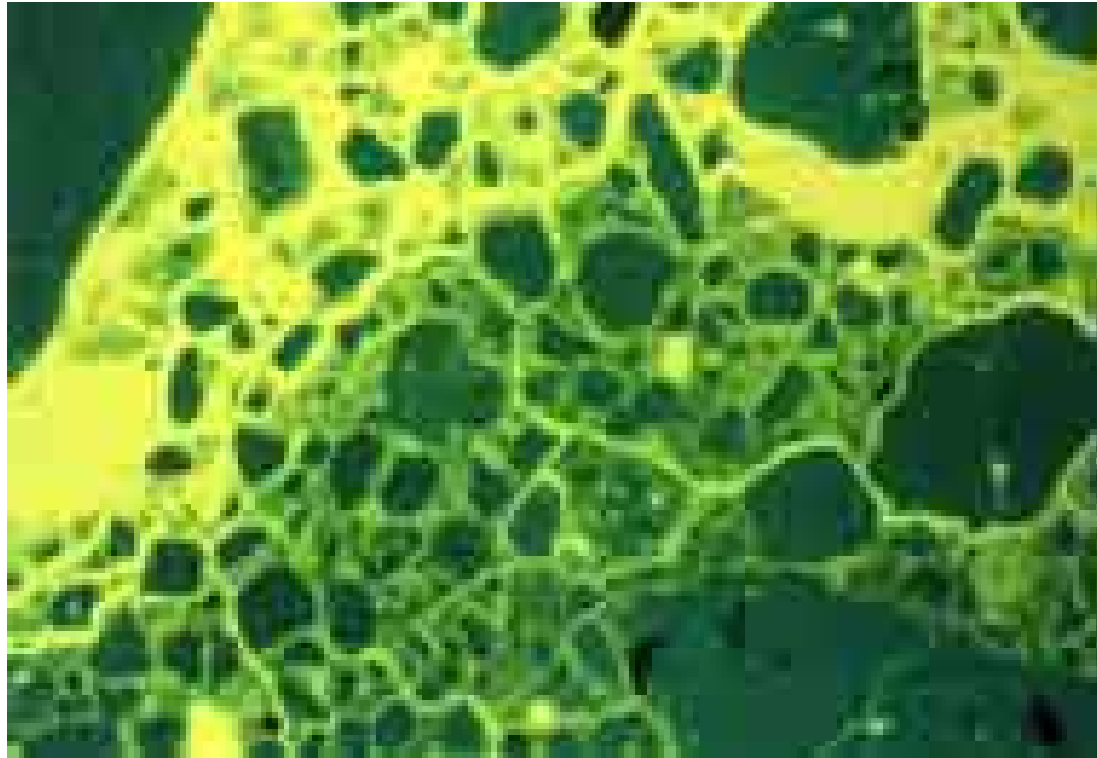


Pâte avec des pores saturés

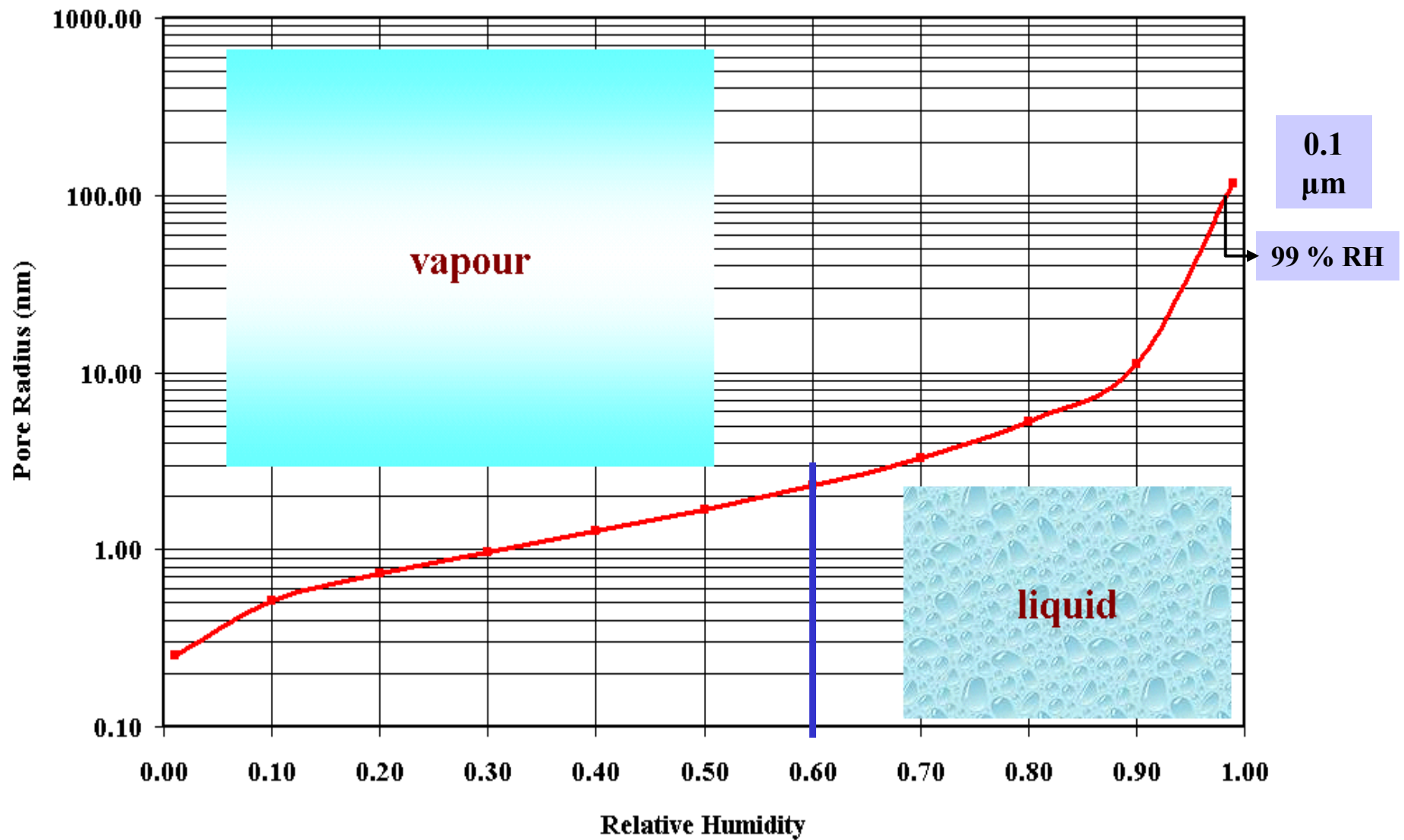


Gel = Rupture de la pâte

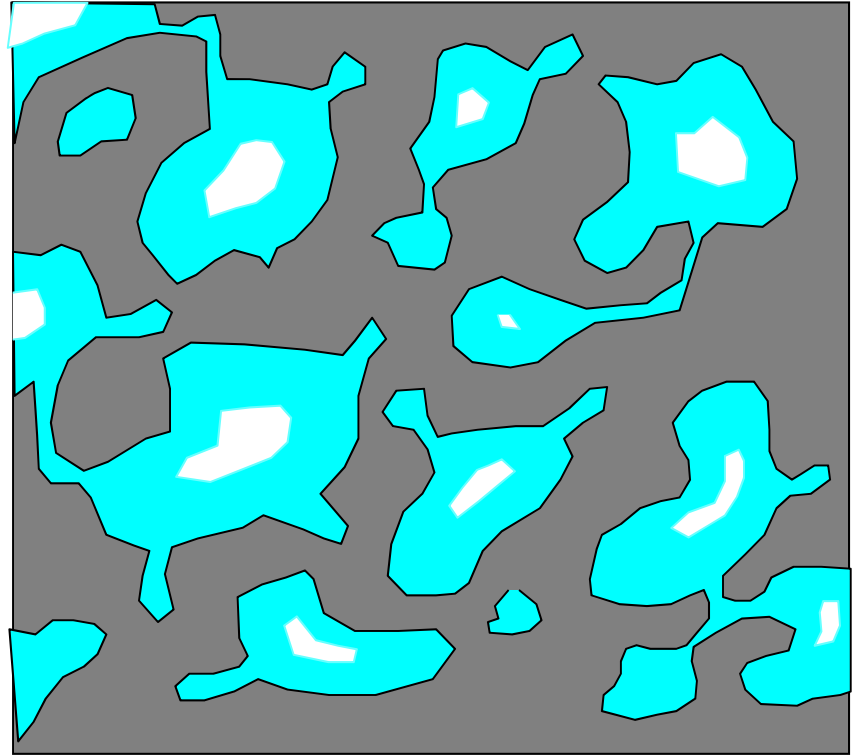
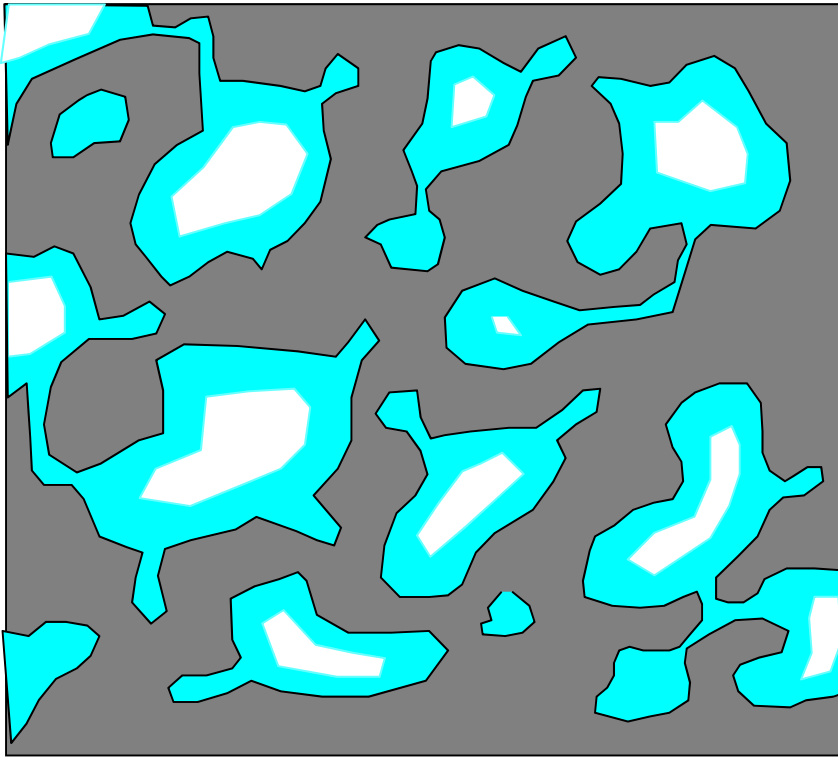




Loi Kelvin-Laplace



Pâte avec des pores partiellement saturés



Gel = pas d'endommagement

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 - $\sim 6 - 8 \%$

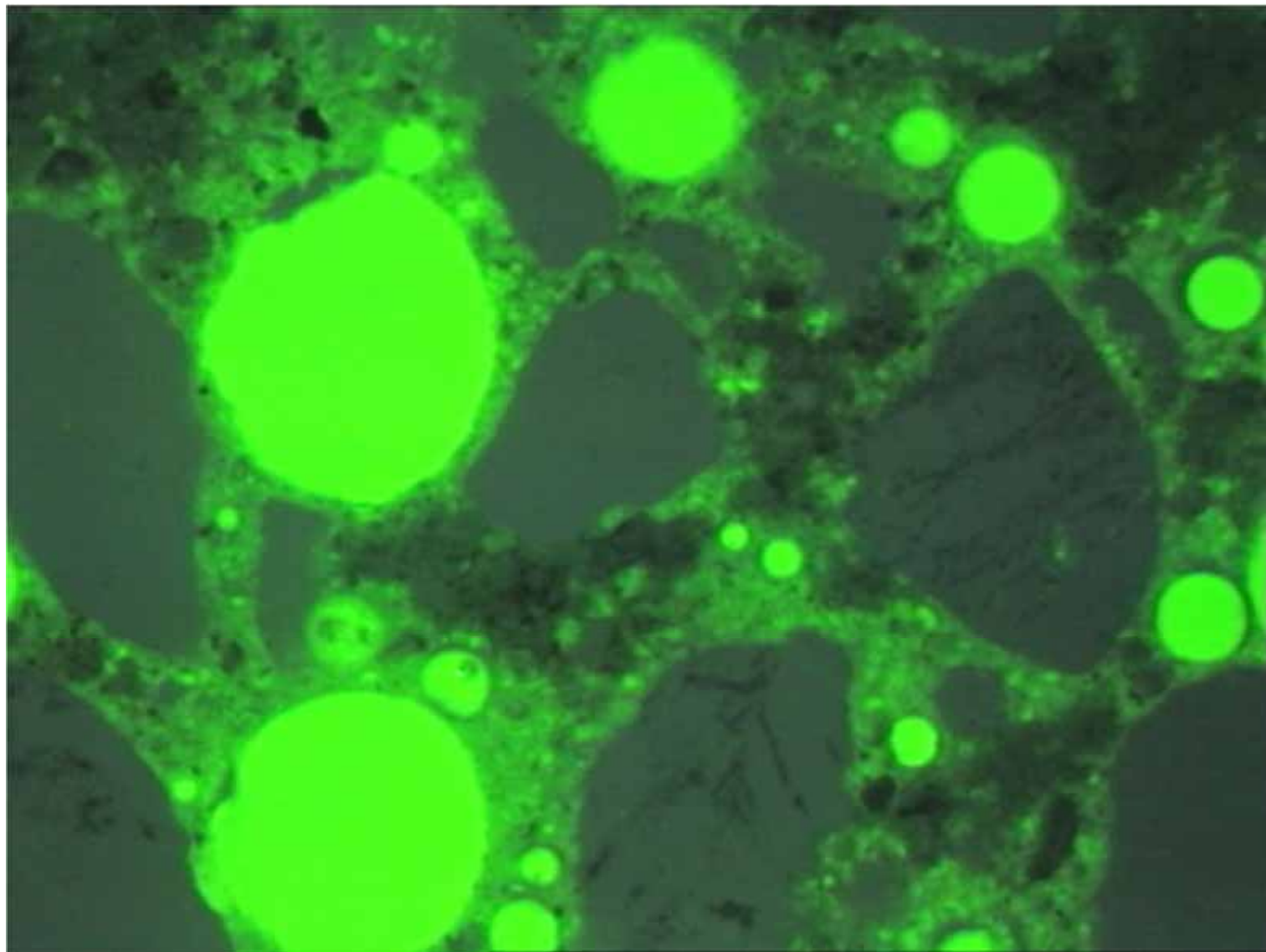
Par utilisation des entraîneurs d'air, adjuvants liquides.

Taille $\sim 50 \mu\text{m}$ (difficile à saturer).

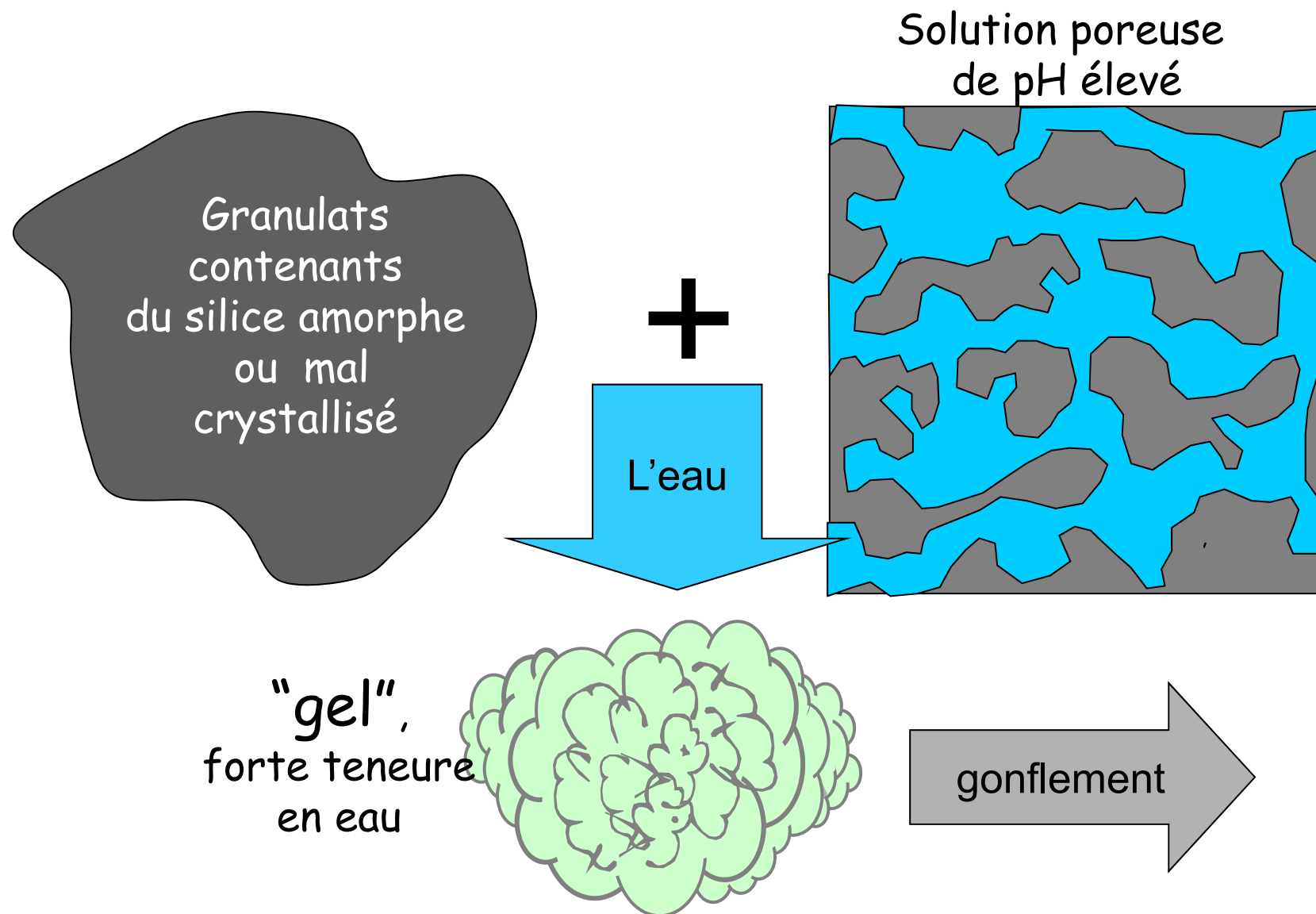
L'eau dans les pores de la pâte peut «s'échapper» dans ces vides, s'il y a un gel.

Espacement des vides $< 0.2 \text{ mm}$

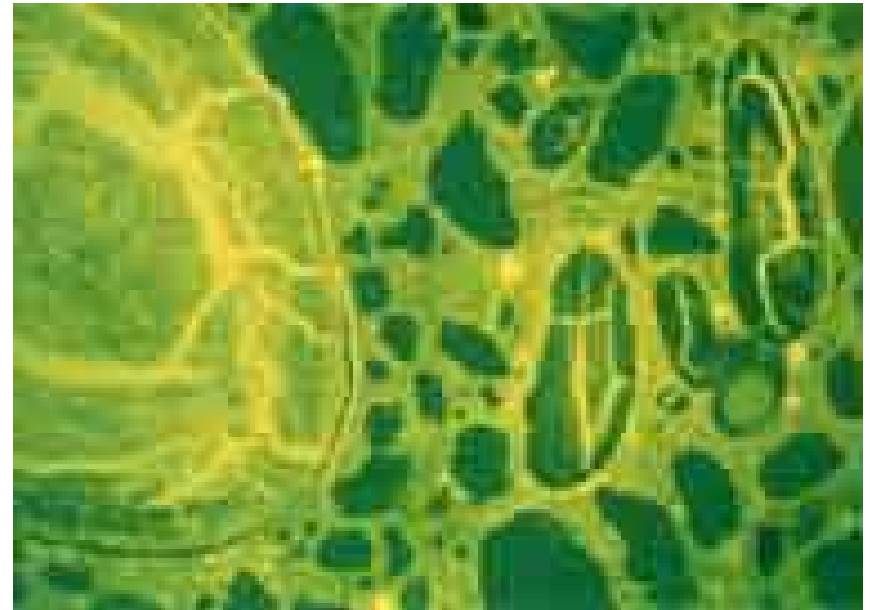
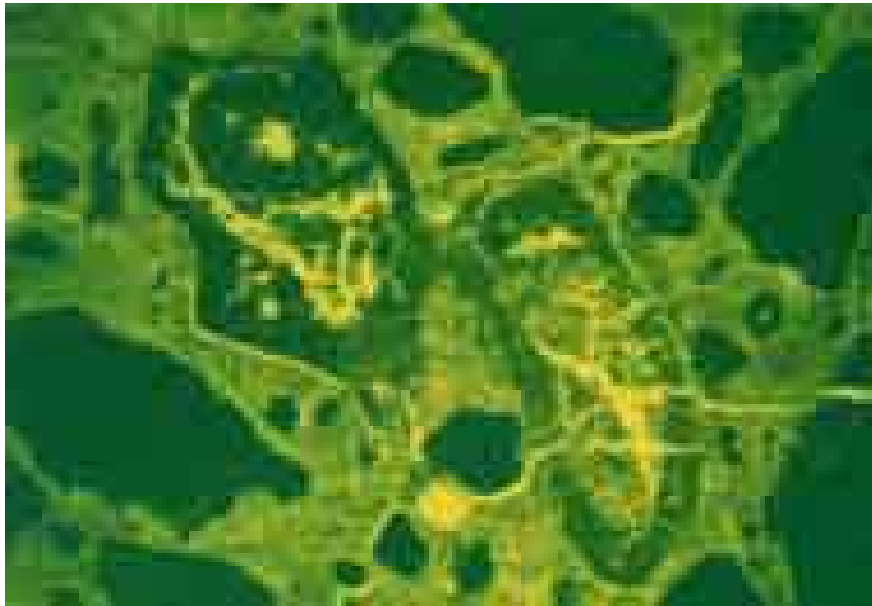
Or dense concrete with low w/c

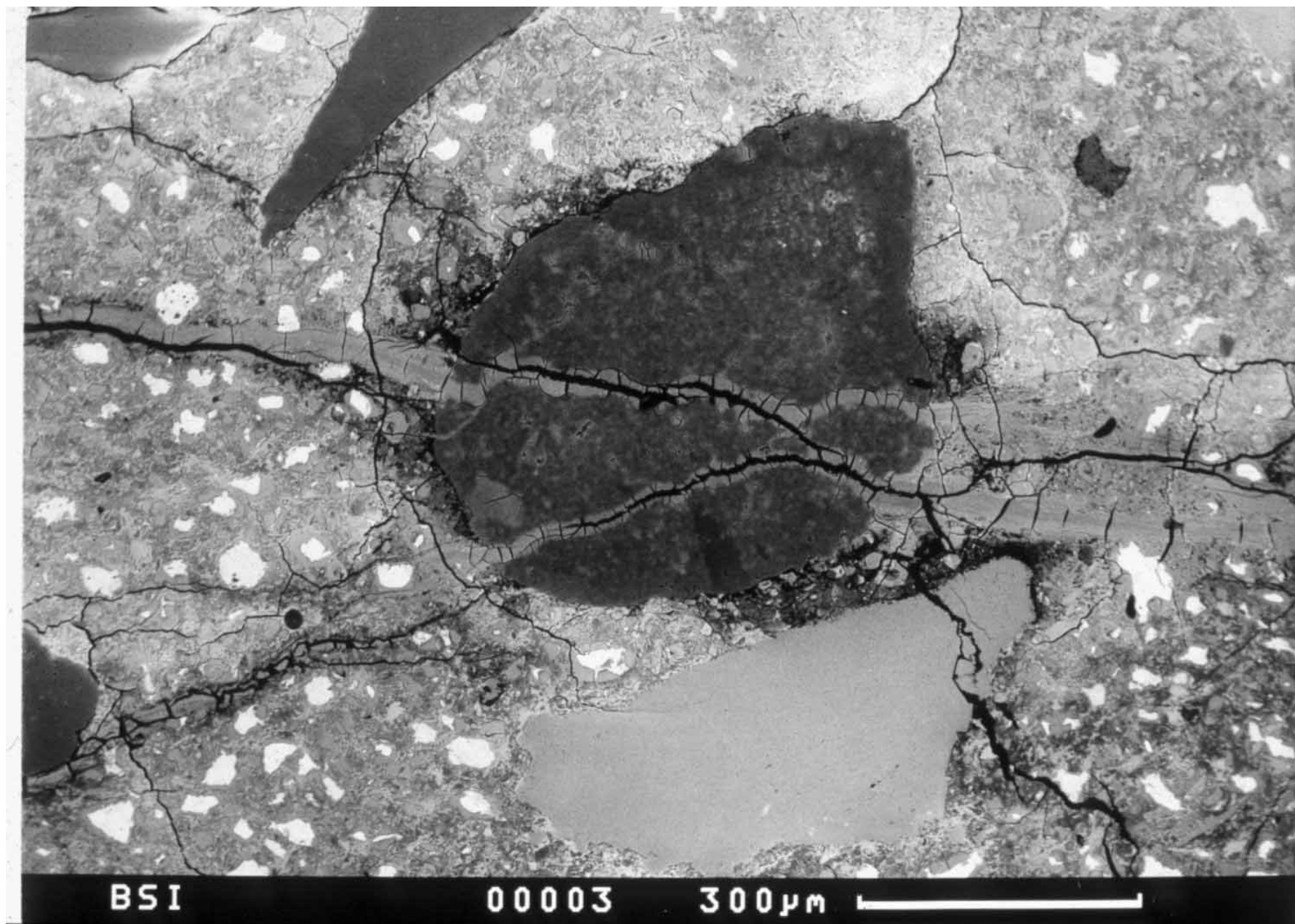


Réaction alcali granulat	RAG
Alkali aggregate reaction	AAR
Alkali silica reaction	ASR



Manifestation microscopique:





BSI

00003

300 μ m



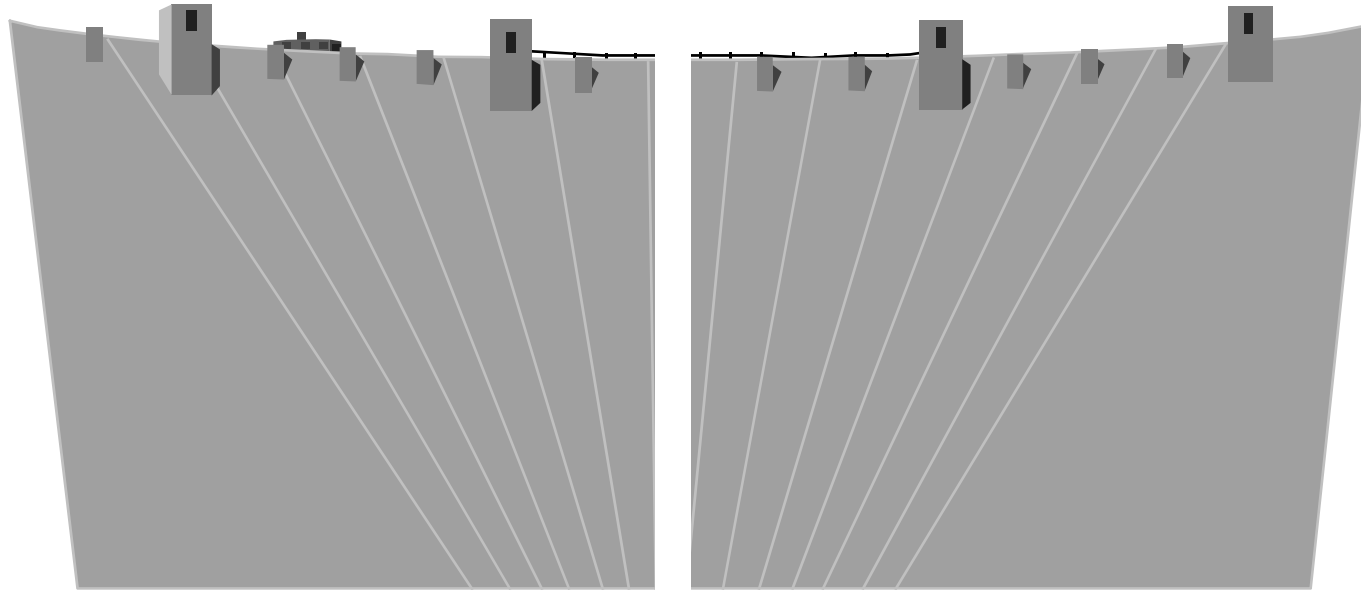
Distribution des Fissures – “Map Cracking”



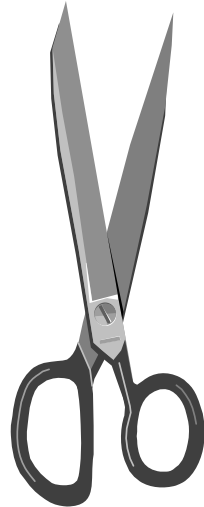
Dans les barrages le l'expansion peut engendrer des problèmes structuraux avant la fissuration ou la perte de performance mécanique:

- Pas d'armatures
- Structure en compression
- Déjà une expansion de 0.01%, peut poser des problèmes

Slot Cutting



Diamond
wire cutting

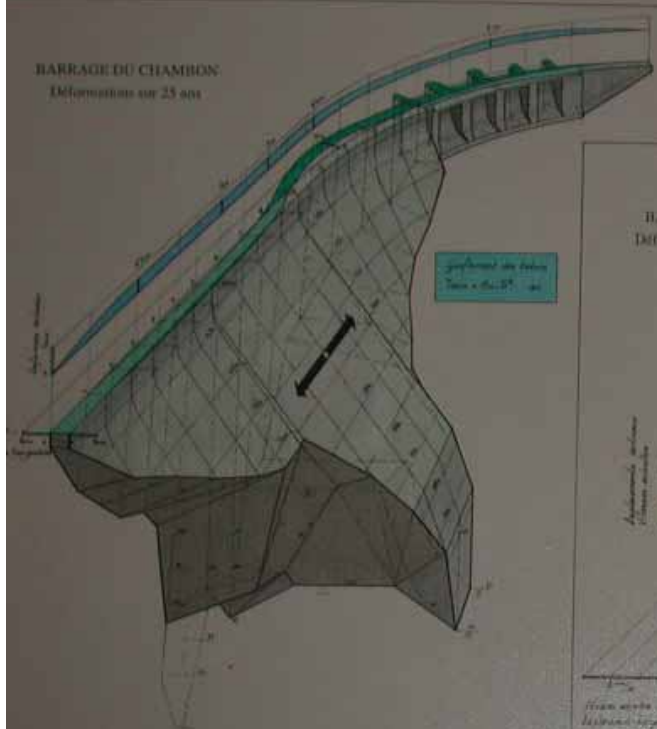


Provides
stress relief

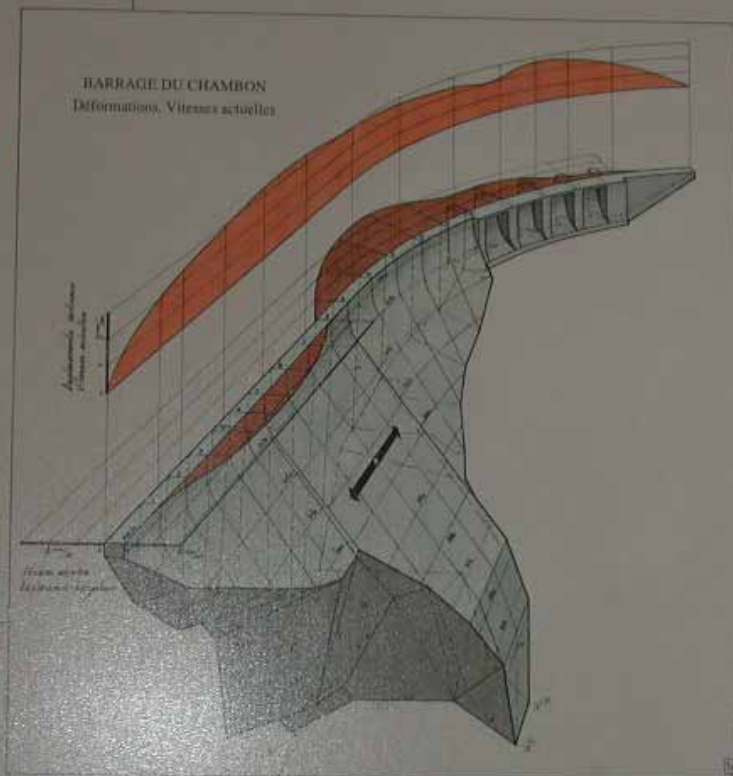
Barrage de Chambon, France



BARRAGE DU CHAMBRON
Déformations sur 25 ans



BARRAGE DU CHAMBRON
Déformations, Vitesse actuelles











Méthodes de prévention

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