

# Béton: durabilité

---



# Sommaire

## **1. Introduction**

*1.1. Définition*

*1.2. Phénomènes de diffusion*

*1.3. Principales causes de dégradation des bétons*

## **2. La corrosion des aciers**

*2.1. Mécanisme de corrosion des aciers*

*2.2. La passivation des armatures*

## **3. Corrosion des armatures due à la carbonatation du béton**

*3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures*

*3.2. prévention*

*3.3. les classes d'exposition selon SN EN 206*

*3.4. essais en laboratoire*

*3.5. cas de corrosion sur ouvrage : diagnostic et remise en état*

## **4. Corrosion des armatures due aux chlorures**

*4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures*

*4.2. prévention*

*4.3. les classes d'exposition selon SN EN 206*

*4.4. essais en laboratoire*

*4.5. cas de corrosion sur ouvrage : diagnostic et remise en état*

# Sommaire

## **5. Dégradation par le phénomène de gel - dégel**

*5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton*

*5.2. prévention*

*5.3. les classes d'exposition selon SN EN 206*

*5.4. essais en laboratoire*

*5.5. cas de gel dégel sur ouvrage : diagnostic et remise en état*

## **6. Réaction Alkali Granulat (RAG)**

*6.1. RAG : mécanisme*

*6.2. prévention*

*6.3. essais en laboratoire*

*6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état*

## **7. Attaque acide**

*7.1. attaques acides : mécanisme*

*7.2. les classes d'exposition selon SN EN 206*

*7.3. cas d'attaque acide sur ouvrage : diagnostic et remise en état*

# 1. Introduction

## 1.1. Définition

# 1. Introduction

## 1.1. Définition



Effondrement du pont Morandi, Gènes – Le Monde



Effondrement du pont Morandi, Gènes – Le Point

Bien que des ruptures structurelles se produisent, la plupart sont dues à des dégradations progressives des matériaux

→ manque de durabilité

### La durabilité

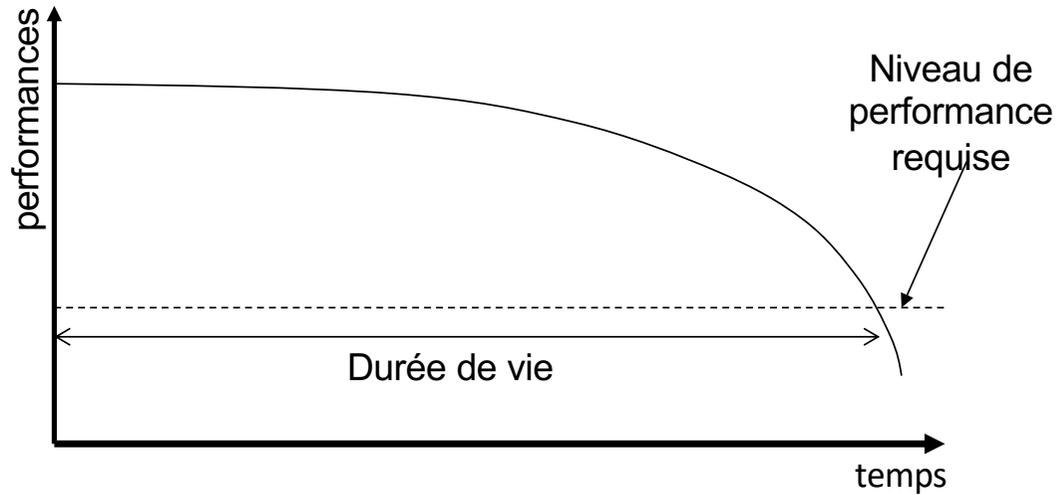
Définit la durée d'utilisation d'une structure.

La durabilité d'une structure dépendra de :

- l'environnement dans lequel elle se trouve
- des évolutions de son utilisation
- de la façon dont elle a été réalisée
- des matériaux utilisés

# 1. Introduction

## 1.1. Définition



### Un matériau n'est pas intrinsèquement durable ou non durable

- la durabilité est fonction de l'interaction du matériau avec son environnement
- un béton plus durable (dans un environnement donné) est un béton plus coûteux
- il est important d'adapter le type de béton à l'exposition (éviter la sur qualité, penser aux expositions provisoires!)

# 1. Introduction

## 1.1. Définition

Certaines structures romaines en béton durent depuis des millénaires



Pantheon (~ 120 a. J.C.)

- Bonne qualité de construction (les structure de mauvaise qualité ne sont plus là..)
- L'environnement est peu agressif
- Béton non armé

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

# 1. Introduction

## 1.1. Définition



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

# 1. Introduction

## 1.1. Définition

Les dimensions du problème :

- Les dépenses pour les réparations des structures en béton constituent entre 50% et 100% des dépenses par rapport aux constructions nouvelles.

En suisse le coût annuel des réparations des structures est équivalent à environ 10% du PIB



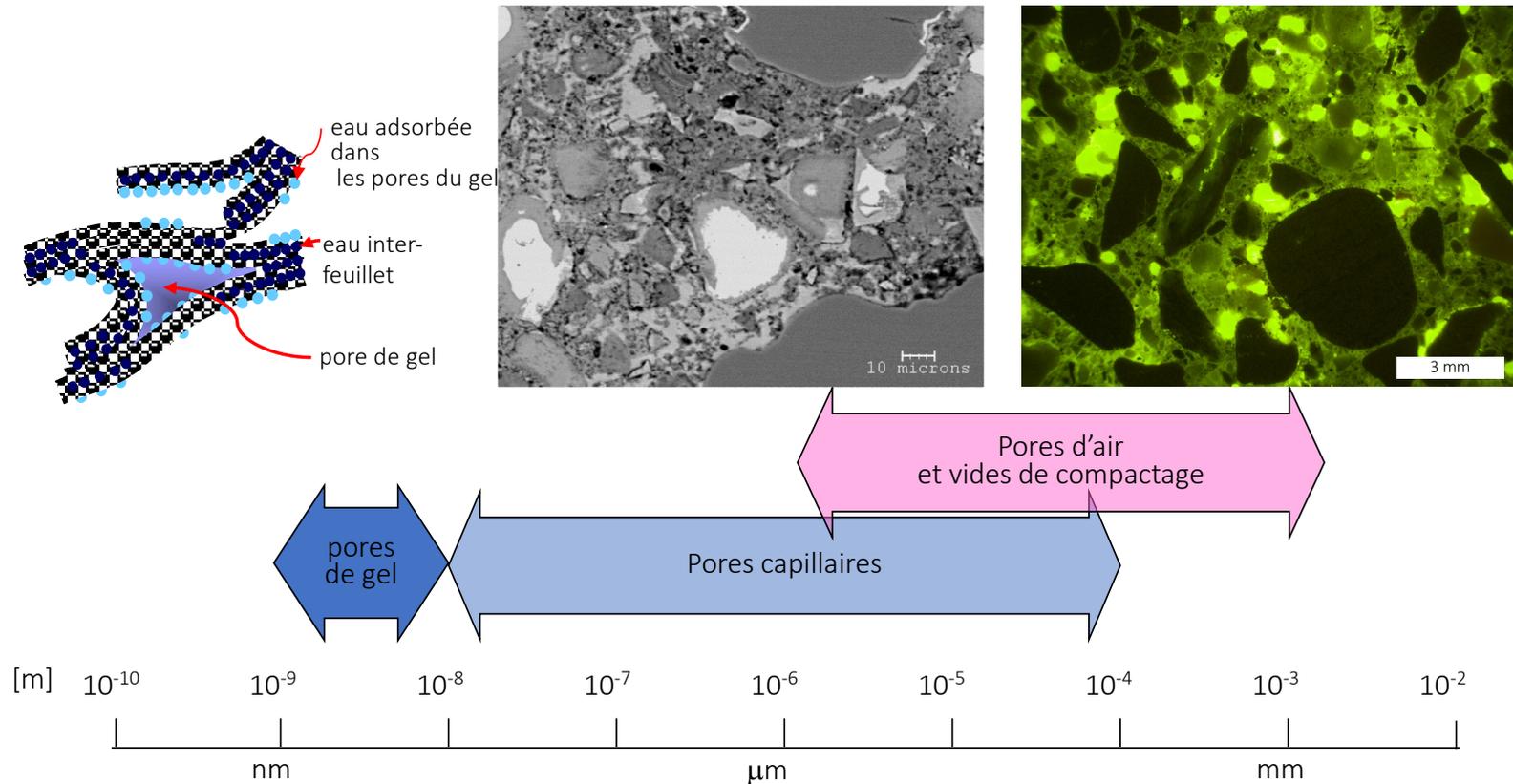
# **1. Introduction**

## 1.2. Phénomènes de diffusion

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

Les différentes porosités du béton : rappel

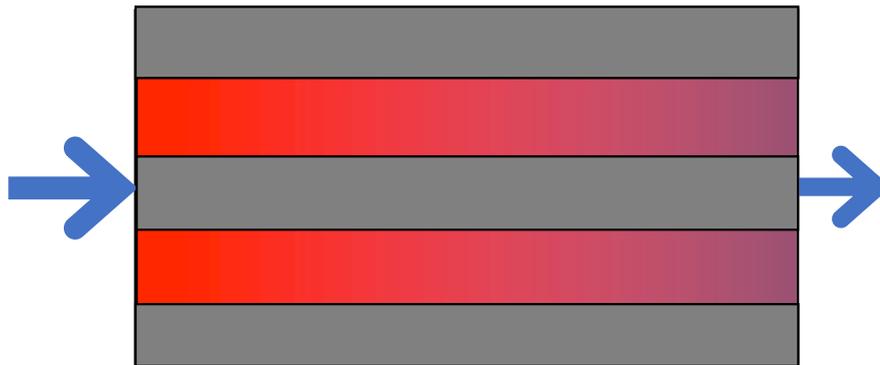


**La plupart du transport se passe dans la pâte de ciment**

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

Effet de la Porosité



**Porosité élevée**

Faible résistance au flux



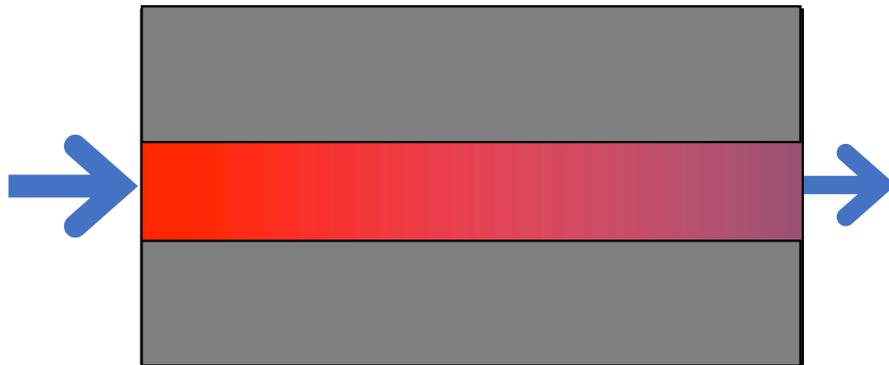
**Porosité basse**

Résistance au flux élevée

# 1. Introduction

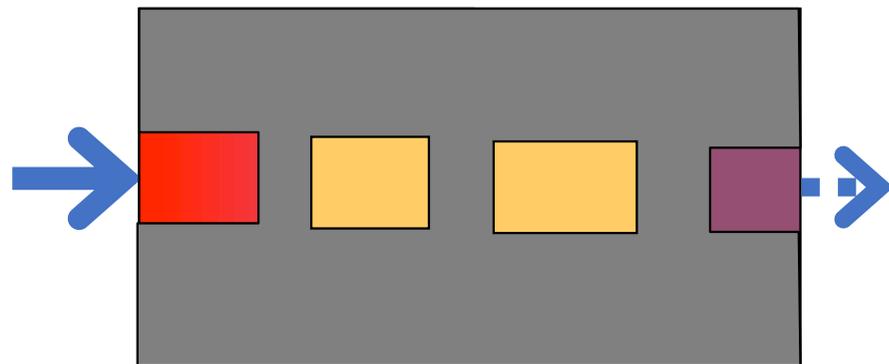
## 1.2. Phénomènes de diffusion

Effet de Connectivité



**Porosité connectée**

Faible résistance au flux



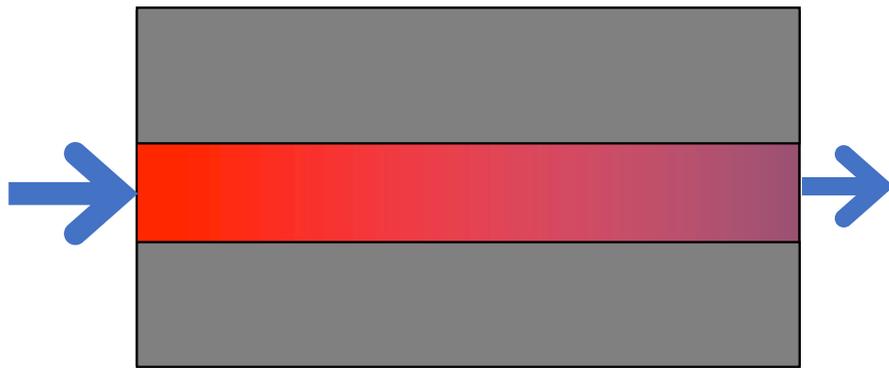
**Porosité non connectée**

Résistance au flux élevée

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

Effet de Resserrement



**Un grand pore**  
Faible résistance au flux



**Plusieurs petits pores**  
Résistance au flux élevée

# 1. Introduction

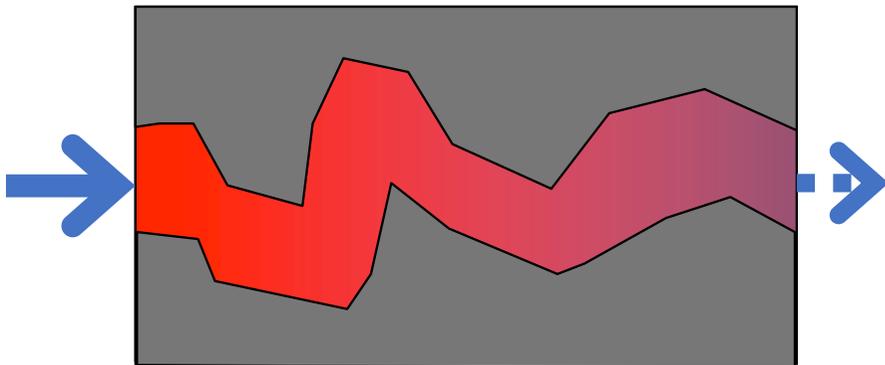
## 1.2. Phénomènes de diffusion

Effet de la tortuosité



**Pore rectiligne**

Faible résistance au flux



**Pore tortueux**

Résistance au flux élevée

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

Pour diminuer la perméabilité d'un matériau poreux (béton) il faut :

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

→ C'est possible en modifiant les propriétés de la pâte de ciment :

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

Pour diminuer la perméabilité d'un béton, il faut :

### **Améliorer la qualité de la pâte de ciment :**

- diminuer le rapport eau / ciment
- utiliser des additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitiers de haut fourneau etc.)

### **Réduire la quantité de pâte de ciment :**

- diminuer le rapport eau / ciment
- améliorer la composition granulométrique

### **Améliorer la mise en place du béton :**

- en compactant bien le béton frais
- en soignant la cure (cf. cours sur les propriétés mécaniques)

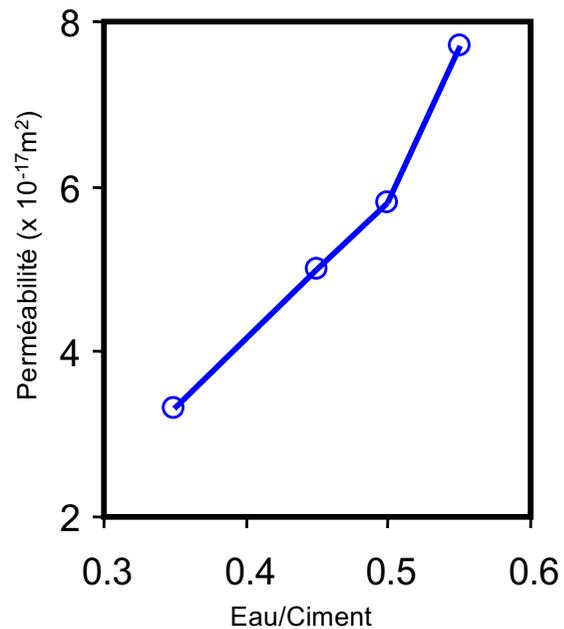
# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

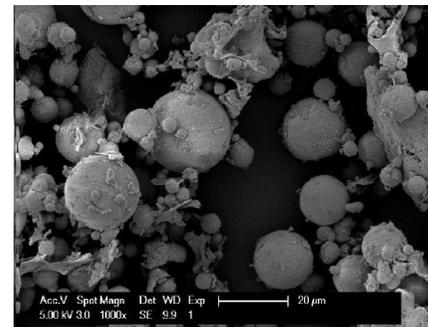
### Améliorer la qualité de la pâte de ciment :

- diminuer le rapport eau / ciment
- utiliser des additions minérales (cendres volantes, fumée de silice, laitiers de haut fourneau etc.)

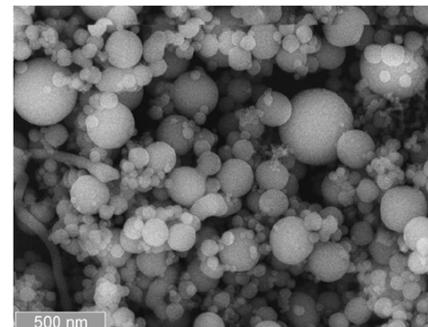
Effet du e/c sur la perméabilité aux Gaz:



Effet des additions minérales:



R. Snellings et al.: SEM picture of a typical fly ash with its mostly spherical and some angular particles.

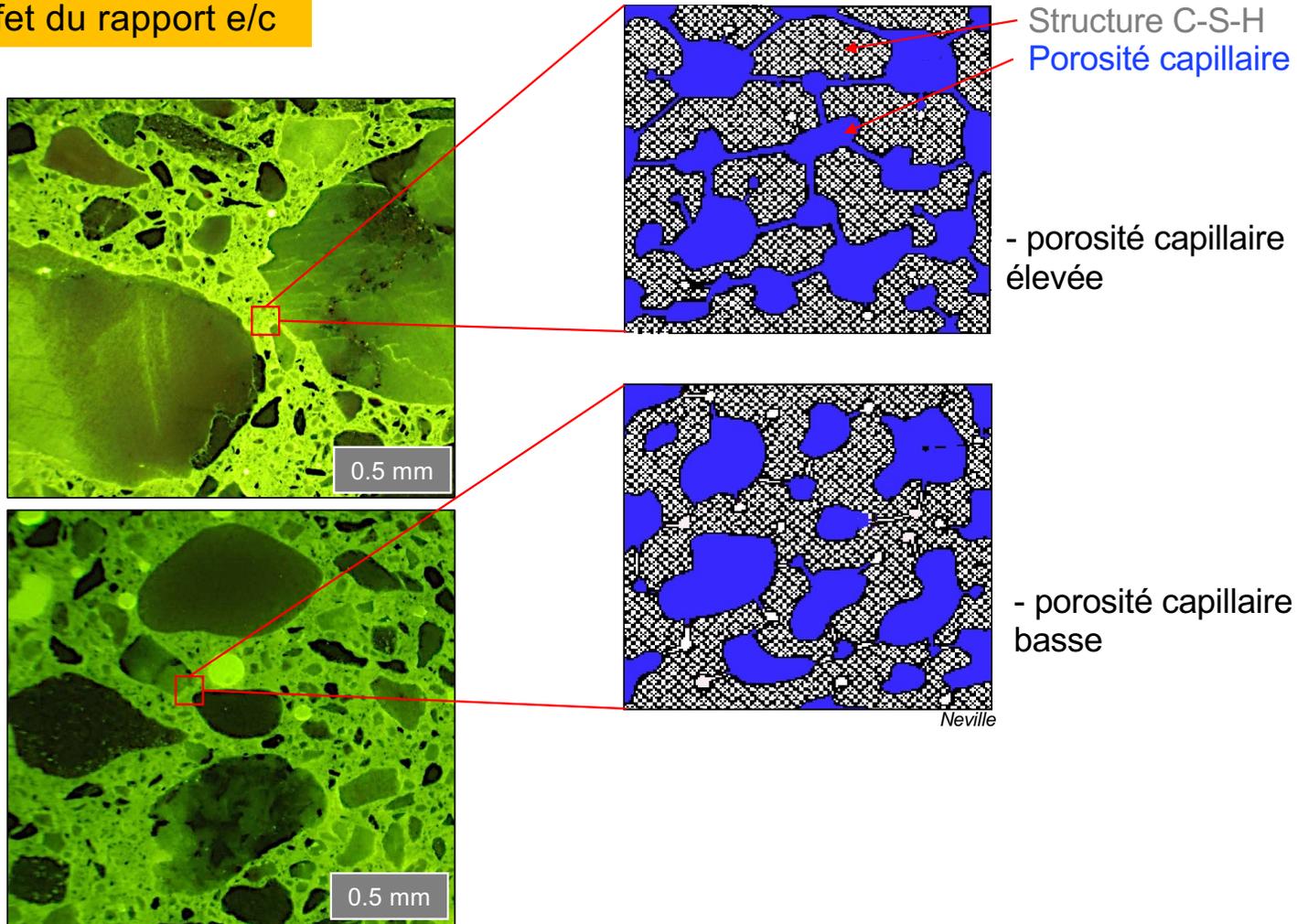


R. Snellings et al.: SEM picture of a typical silica fume

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

Effet du rapport e/c



# 1. Introduction

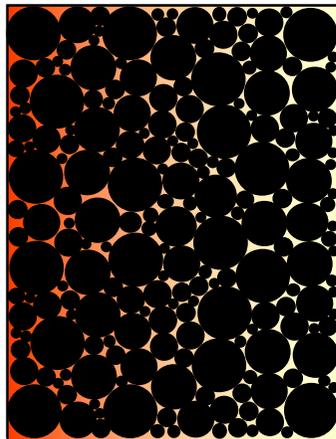
## 1.2. Phénomènes de diffusion

### Réduire la quantité de pâte de ciment :

- diminuer le rapport eau / ciment
- améliorer la composition granulométrique (cf. cours mise en oeuvre)

● ● ● ● ● ● Bonne granulométrie

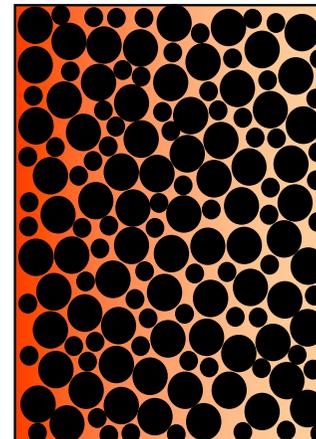
faible perméabilité



← même  $e/c$  →

● ● Mauvaise granulométrie

perméabilité élevée



# **1. Introduction**

## 1.3. Principales causes de dégradation des bétons

# 1. Introduction

## 1.3. Principales causes de dégradation des bétons

### Corrosion des armatures

(Ch. 2, 3, 4)

~ 90%



Carbonatation  
du béton

Pénétration  
des chlorures

### Gel / dégel (Ch. 5)

~ 5%



### RAG : réaction alcali granulat (Ch. 6)

~ 5%



### Attaque acide (Ch. 7)

Attaque sulfatique

Usure mécanique

## **2. La corrosion des aciers**

### 2.1. Mécanisme de corrosion des aciers

## 2. La corrosion des aciers

### 2.1. Mécanisme de corrosion des aciers

Les oxydes de fer sont thermodynamiquement plus stables que le métal

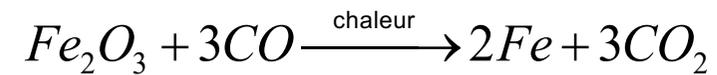
minerai de fer (Hematite)  $Fe_2O_3$



haut fourneau



acier +  $H_2O$  +  $O_2$   
→ "oxydes de fer"



**Problèmes liés au processus d'oxydation des armatures dans le béton :**

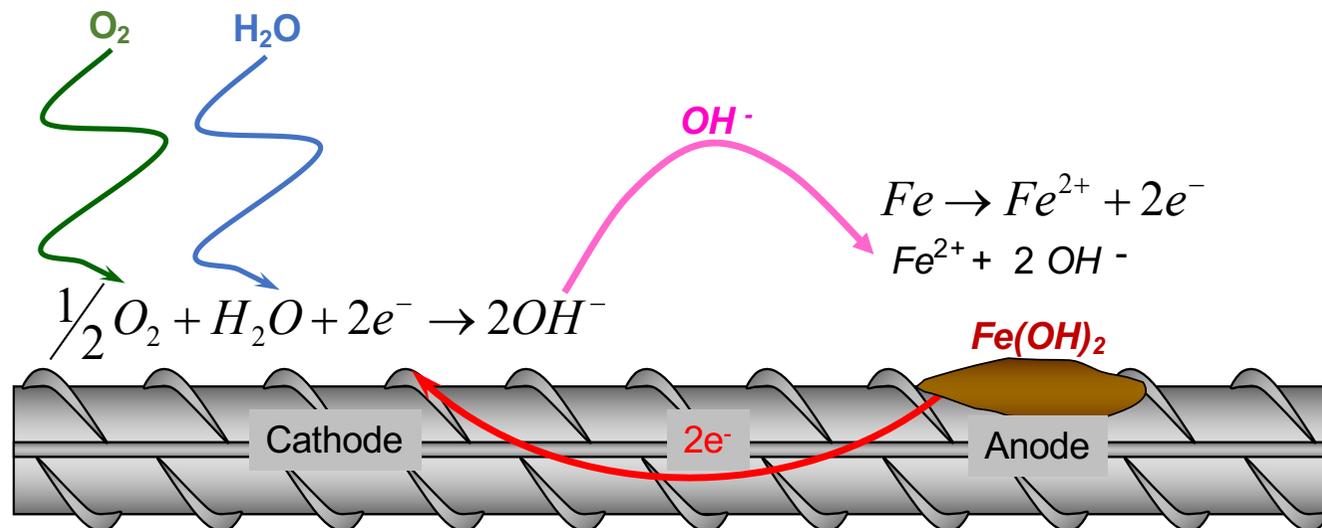
- Prise de volume (7x) → Éclatement du béton d'enrobage
- Perte de propriétés mécaniques
- Perte de section



## 2. La corrosion des aciers

### 2.1. Mécanisme de corrosion des aciers

Réaction en 2 parties, formation d'une pile de corrosion :



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

## **2. La corrosion des aciers**

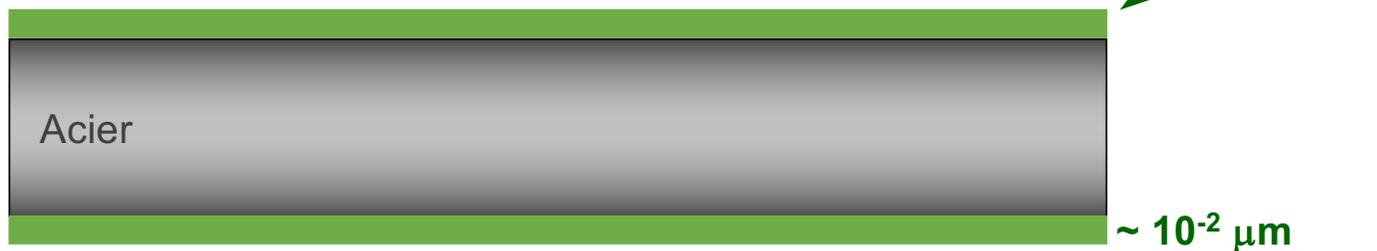
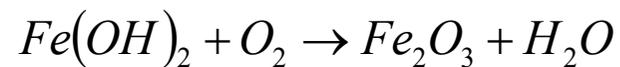
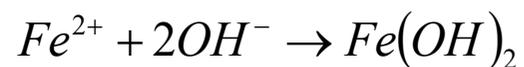
### 2.2. La passivation des armatures

## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures

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

→ Film d'oxyde de fer très dense et très adhérent sur la surface



Le milieu basique du béton provient de la solution de pore riche en alcalins

## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures

Cette couche d'oxyde 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.

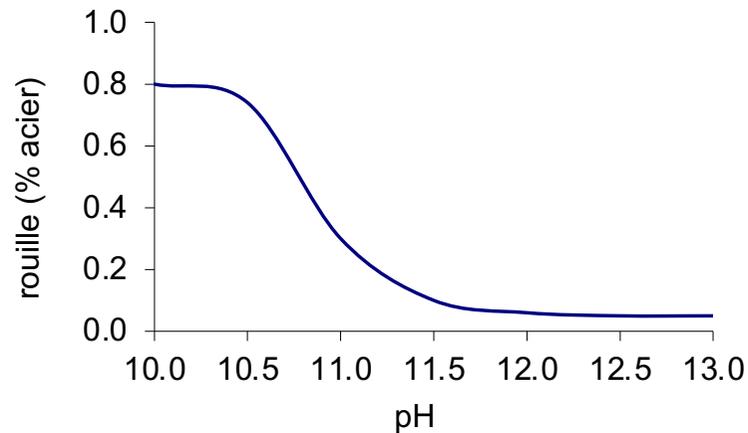
**Pour que la couche passive reste efficace, elle doit former une couche dense, continue, uniforme, très adhérente sur la surface de l'acier**

**L'efficacité et la stabilité de la couche passive dépendent des conditions environnementales entourant l'acier**

## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures

Effect du pH sur la corrosion *Bentur et al. 1997*



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 de l'acier pour "déstabiliser" la couche passive

## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures

Analyse typique d'oxyde pour le ciment Portland:

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

+ autres éléments traces

100 g de ciment contiennent:-

- 0.73 g d'oxyde de potassium (K<sub>2</sub>O)  
≡ 0.61 g potassium (K)
- 0.15 g d'oxyde de sodium (Na<sub>2</sub>O)  
≡ 0.11 g sodium (Na)

L'hydratation de 100 g de ciment produit approximativement 20 - 25 g de Ca(OH)<sub>2</sub>

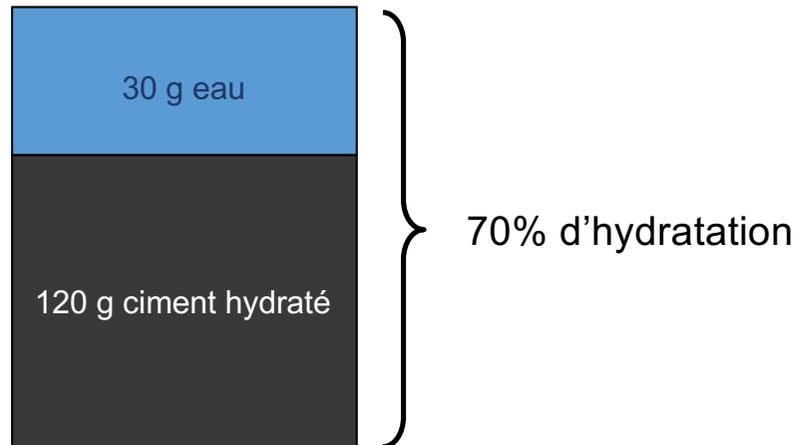
## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures



## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures



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

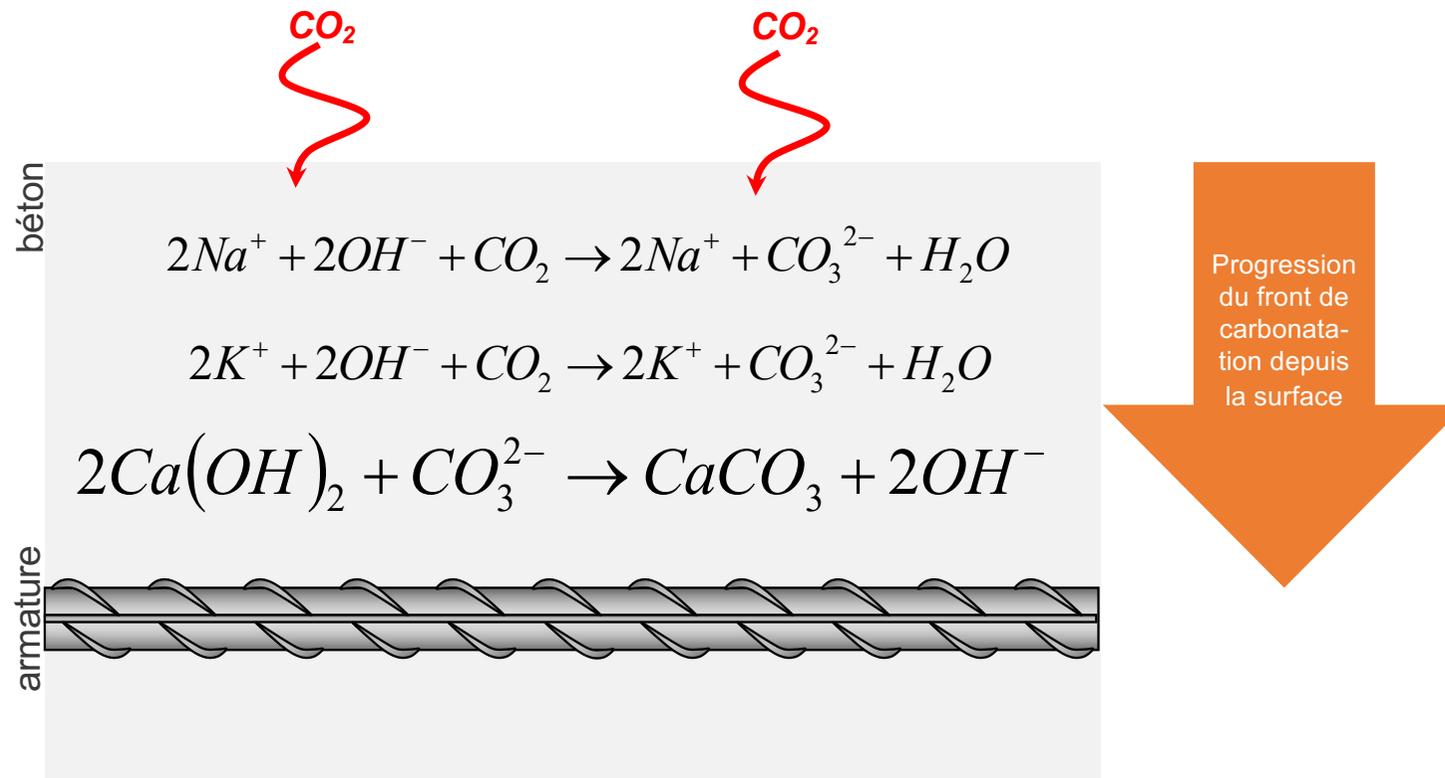
$0.36 + 0.11 = 0.47$  mol  $OH^-$  par litre d'eau associée avec les alcalis;  
ce qui correspond à  $pH = 14 + \log [0.47] = \mathbf{13.67}$

### **3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton**

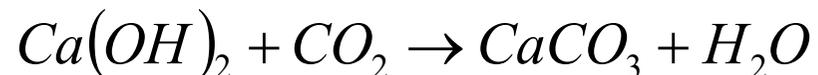
#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures



Reaction globale :



Remarque: d'autres hydrates (C-S-H) carbonatent aussi

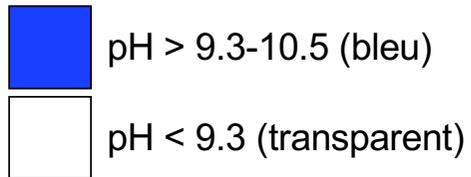
### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

Le béton **carbonaté** a un  $\text{pH} < 9.0$

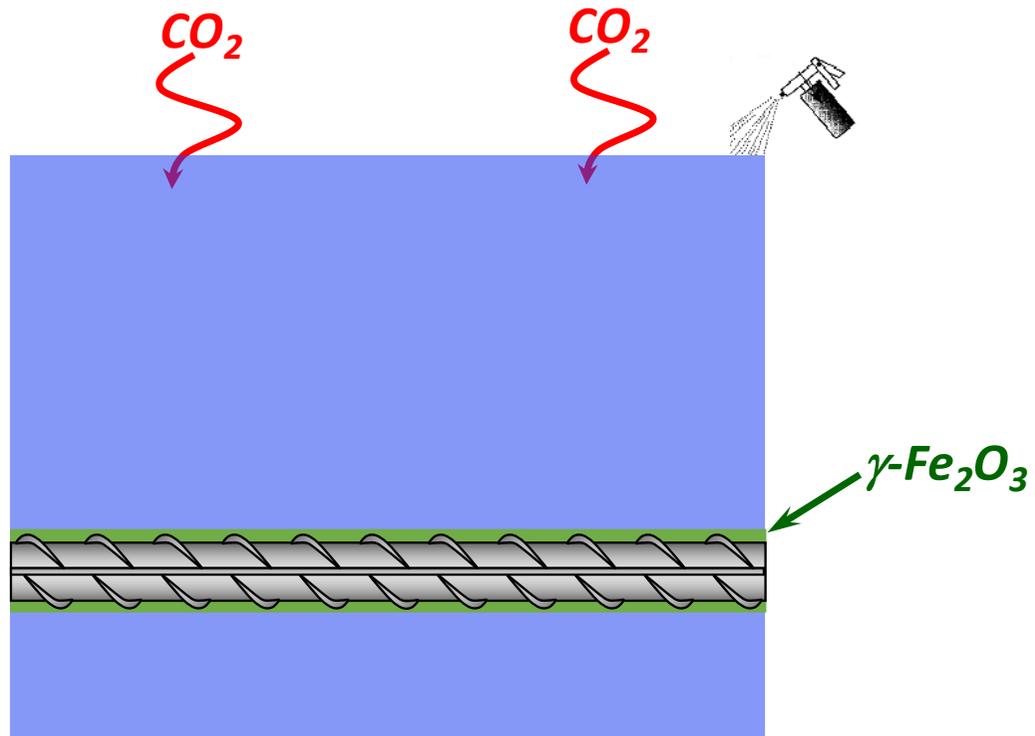
Indicateur pH : **Thymolphthaléine**

est utilisé pour mesurer la profondeur de carbonatation lorsqu'elle change de bleu à transparent :



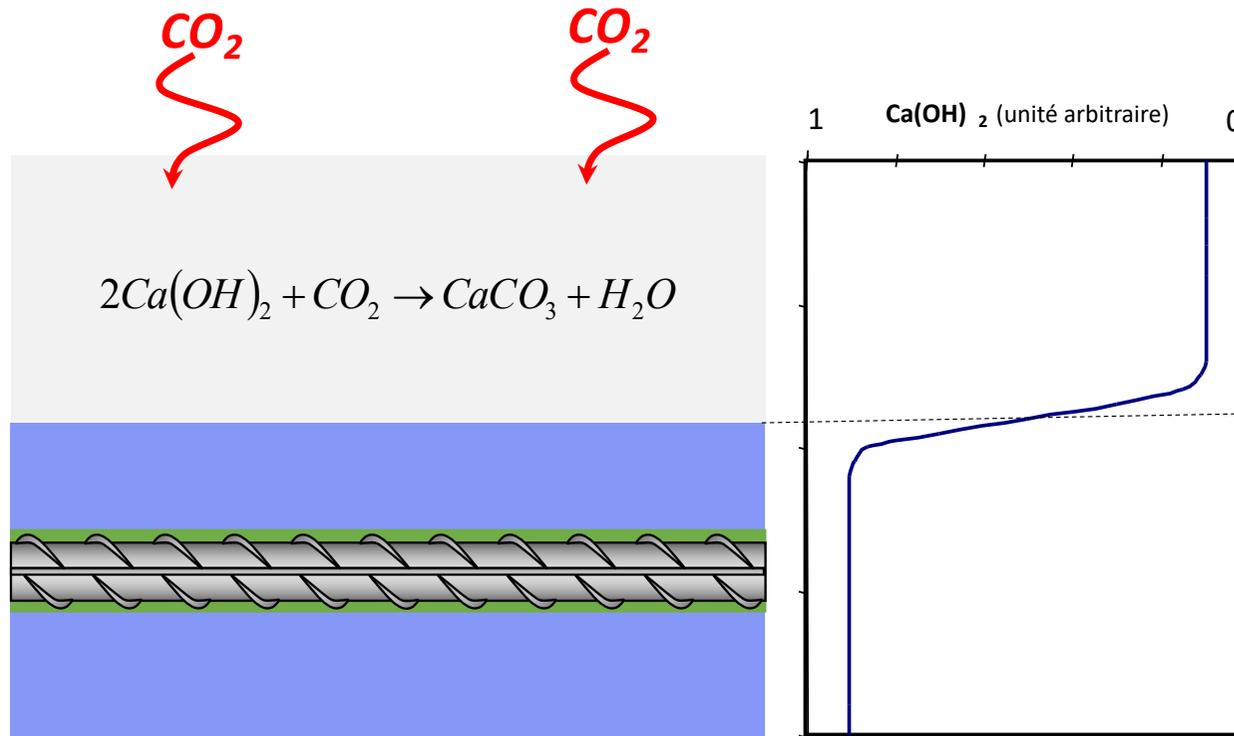
### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures



### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

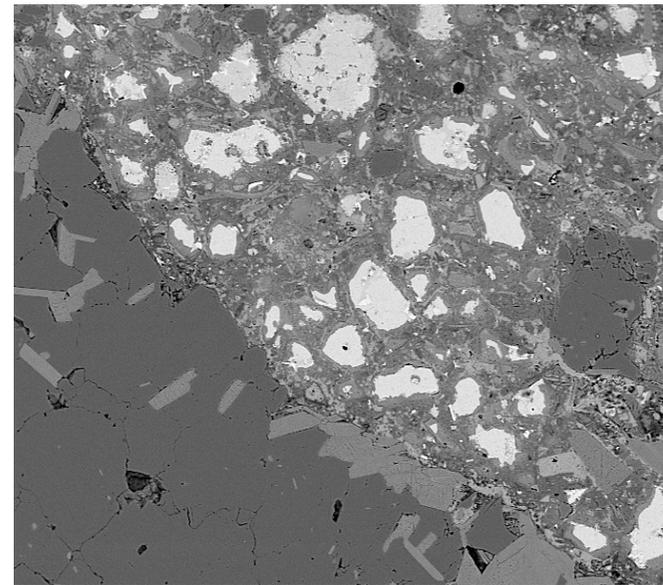
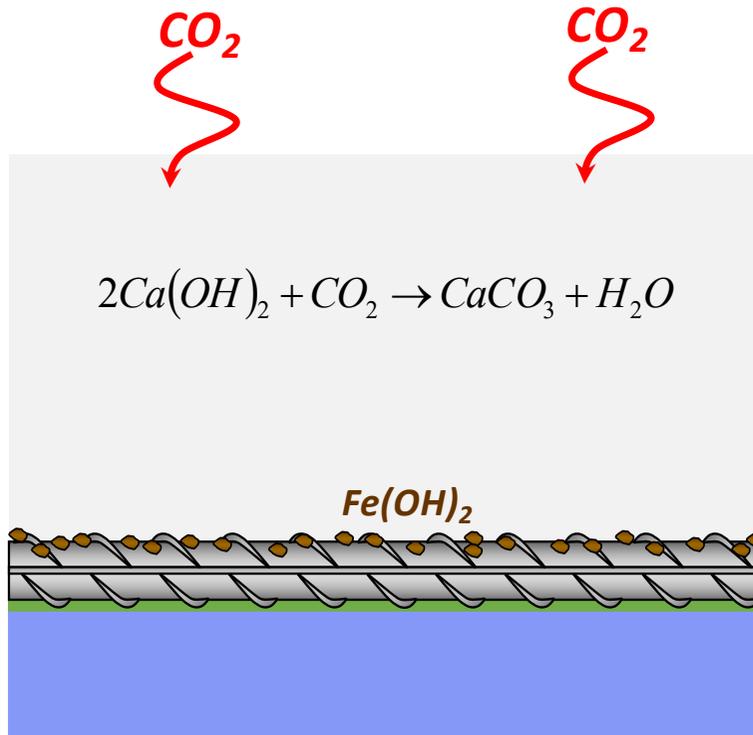
#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures



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

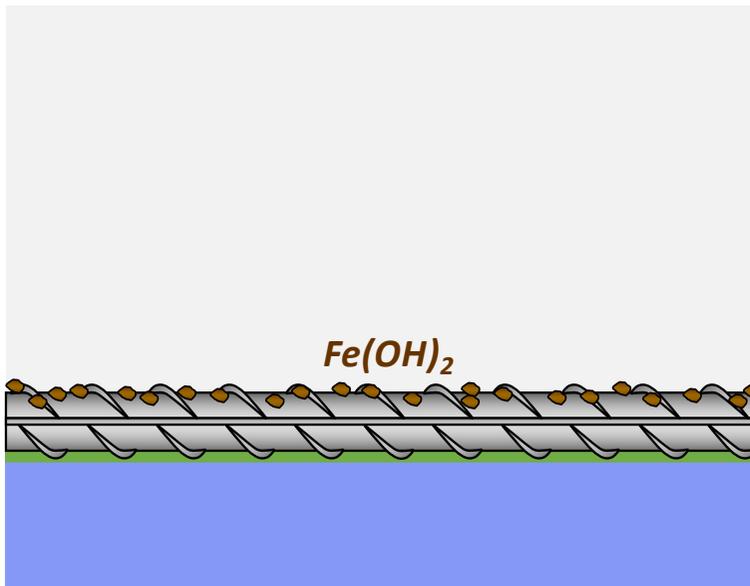
### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures



### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

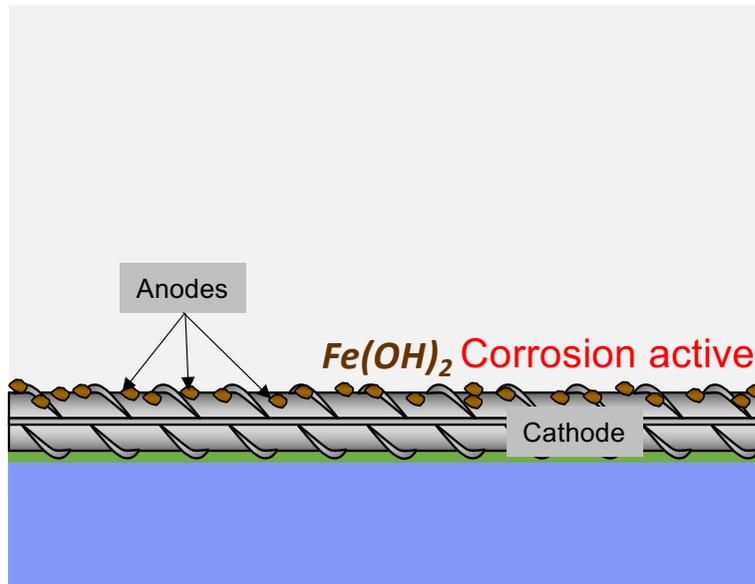


Lorsque le front de carbonatation arrive au **niveau de l'armature**, la **couche de passivation est détruite** par un manque d'alcalinité

→ La corrosion est relativement homogène sur l'ensemble de l'armature se trouvant dans du béton carbonaté

### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures



La vitesse de corrosion est contrôlée par :

- l'arrivée d'oxygène et d'humidité vers la cathode
  - perméabilité
  - diffusion
- Le transfert de ions OH<sup>-</sup> de la cathode à l'anode
  - résistivité

### **3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton**

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

**La cinétique d'initiation de la corrosion** des armatures due à la carbonatation du béton est influencée par :

#### **1. La vitesse de carbonatation**

**qui dépend de la qualité du béton**

- Rapport E/C (porosité)
- Degré d'hydratation (âge)
- Cure
- Composition du béton (type de ciment, additions minérales...)

**qui dépend de l'environnement**

- humidité relative

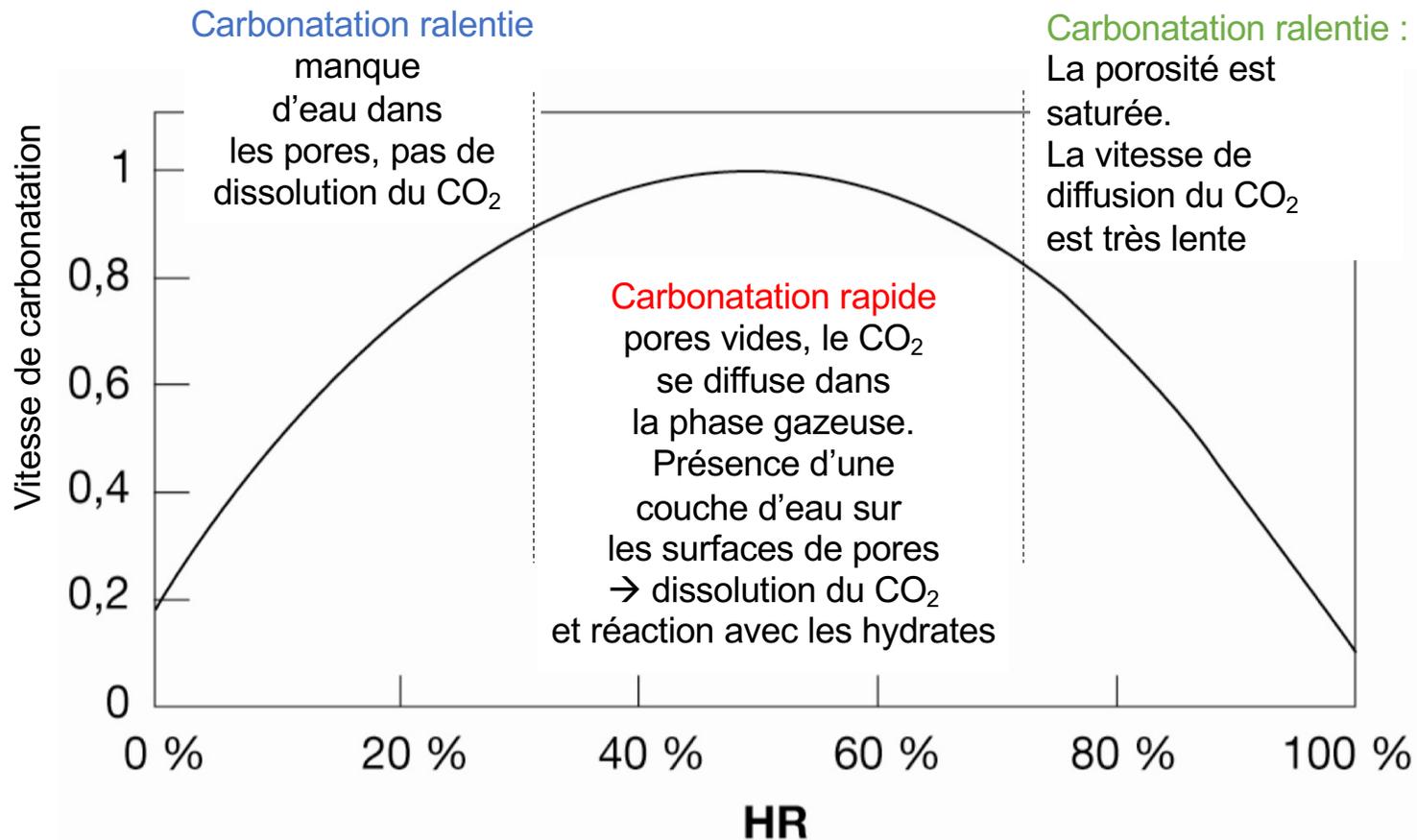
#### **2. La conception de l'élément**

**qui dépend de l'enrobage minimal des armatures**

### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

Vitesse de carbonatation du béton

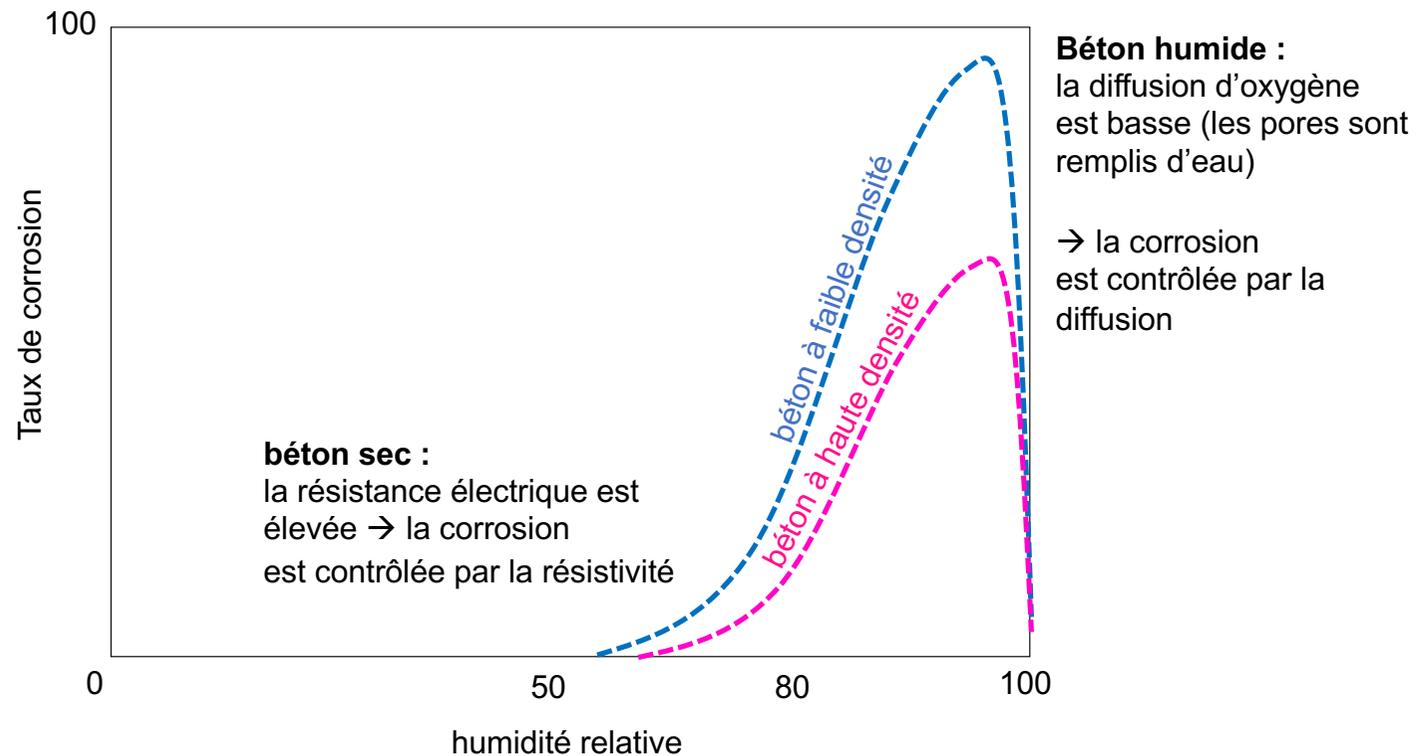


L'humidité relative joue un rôle important dans la vitesse de carbonatation d'un béton

### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

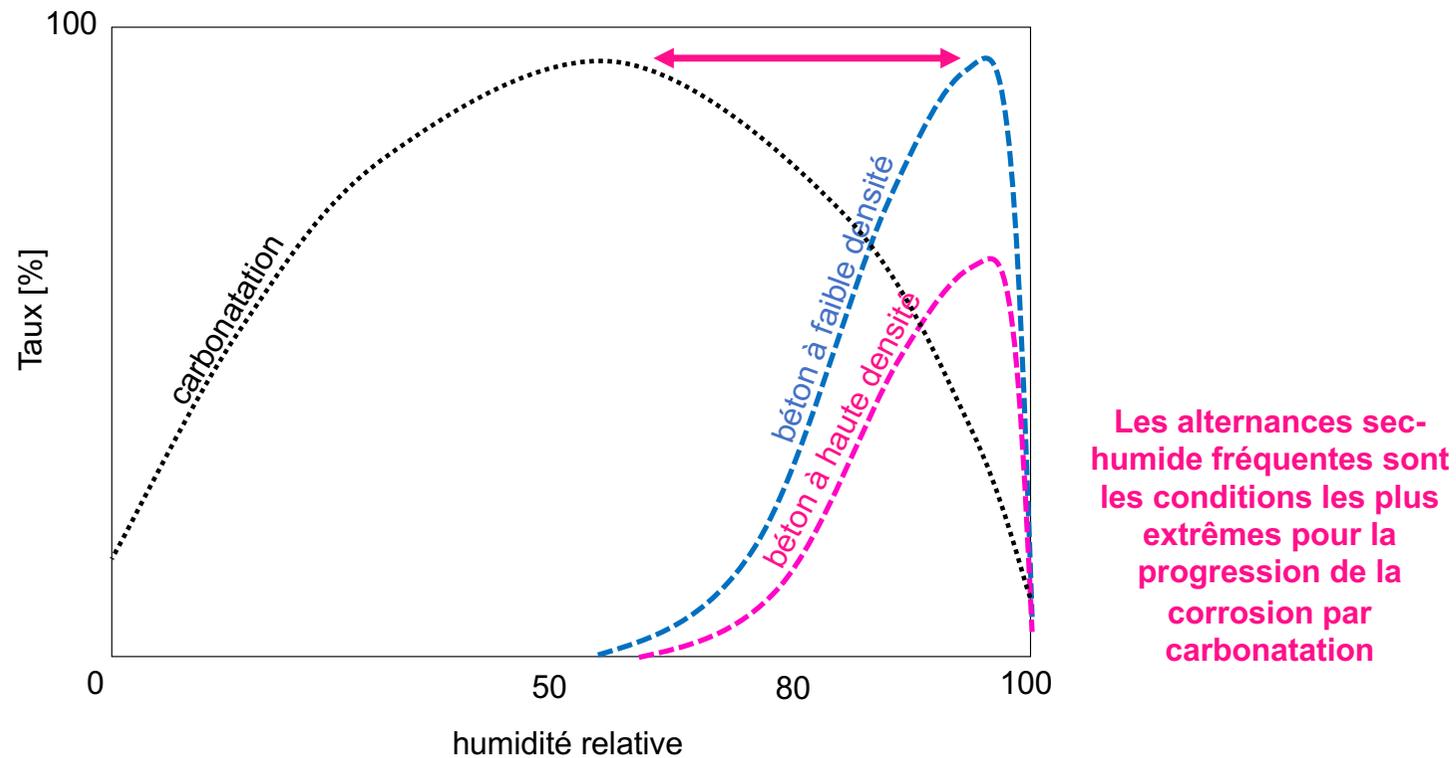
Vitesse de corrosion de l'armature dans un béton carbonaté (donc dépassivé)



### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures

Vitesse de corrosion de l'armature dans un béton carbonaté (dépassivé)



Un béton peut être carbonaté jusqu'au niveau de l'armature sans qu'elle corrode!

Even in carbonated concrete few cases of active corrosion

### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.2. prévention

De manière générale, pour les nouvelles constructions, pour réduire le risque de corrosion par carbonatation :

- Augmenter l'enrobage des armatures
- Penser à la géométrie de détail d'un ouvrage! →
- Diminuer la perméabilité du béton
- Tester la recette de béton (attention aux ciments composés!)
- En fonction de l'exposition, maîtriser soit la vitesse de carbonatation soit la vitesse de corrosion



### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 3.3. Les classes d'exposition selon SN EN 206



Example of very low cover depth, which should not happen

### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

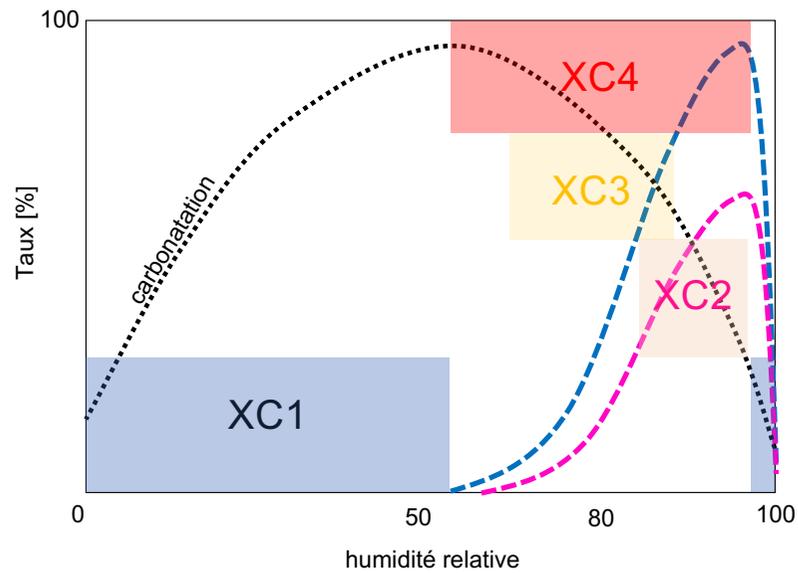
#### 3.3. Les classes d'exposition selon SN EN 206

<b>2. Corrosion induite par carbonatation</b>		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les différentes classes d'exposition sont classifiées ci après :		
NOTE On entend par condition d'humidité celle du béton recouvrant les armatures ou les pièces métalliques noyées, mais, dans de nombreux cas, cette humidité peut être considérée comme le reflet de l'humidité ambiante. Dans ces cas-là, une classification fondée sur les différents milieux ambiants peut être appropriée ; il peut ne pas en être de même s'il existe un barrière entre le béton et son environnement.		
<i>XC1</i>	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible.  Béton submergé en permanence dans de l'eau
<i>XC2</i>	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau.  Un grand nombre de fondations
<i>XC3</i>	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé.  Béton extérieur abrité de la pluie.
<i>XC4</i>	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition <i>XC2</i> .

# 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

## 3.3. Les classes d'exposition selon SN EN 206

Vitesse de corrosion de l'armature dans un béton carbonaté (dépassivé)



Classes d'exposition :

XC1: en permanence sec ou humide

XC2: humide, rarement sec

XC3: humidité modérée

XC4: alternance sec - humide



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

#### Sources externes de chlorures dans le béton :



#### **Salage** des routes en hiver

- Jusqu'à 350'000 tonnes de sel par an en suisse
- 50% de la production des salines de Bex est dédiée au salage hivernal



#### **Sel marins**

(ports, ponts côtiers, plateformes pétrolières, digues etc.)

#### **Mais également:**

- Piscines
- STEP (p.ex. chlorure ferrique pour traitement du phosphore)
- Eaux souterraines (pieux, fondations etc.)
- ...

## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

#### Sources internes de chlorures dans le béton :

- **Anciens accélérateurs de prise** ( $\text{CaCl}_2$ )
- **Eau de gâchage**  
→ contrôle de l'eau de gâchage selon SN EN 1008:2002
- **Granulats** (p. ex. granulats contenant des phases halite ou sable de mer ...)  
→ contrôle de production des granulats selon SN EN 1744-1

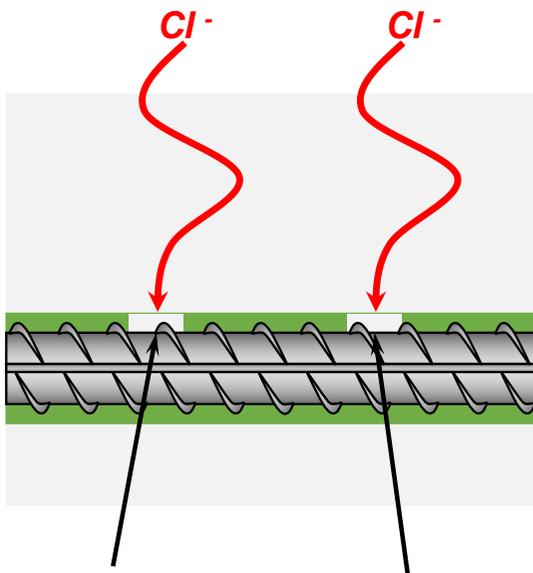
Selon SN EN 206, un béton ne doit pas dépasser 0.10% de teneur en chlorures

## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

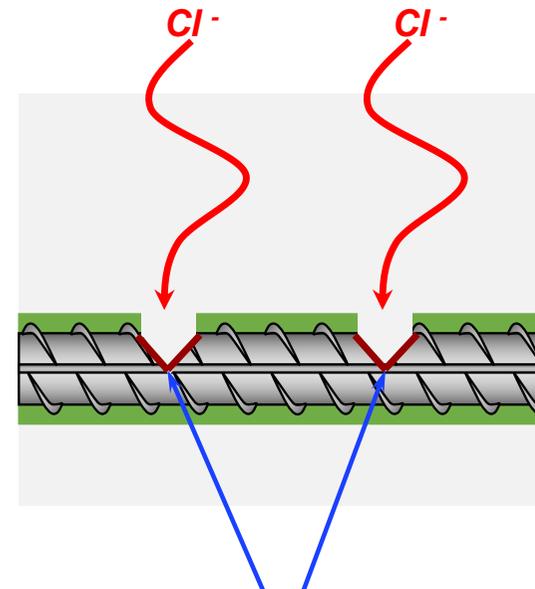
### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

Les ions  $Cl^-$  sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier  
Des imperfections dans la couche passive peuvent faciliter l'incorporation des ions chlorures

Phénomène local → **Corrosion par piqûre**



Destruction local de la couche passive par  $Cl^-$



Corrosion par piqûres

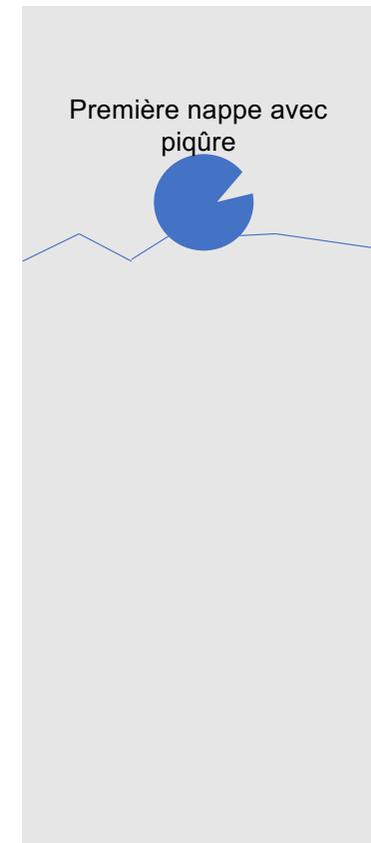
## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



Surface de dalle avec pénétration de chlorures



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.2. prévention

De manière générale, pour les nouvelles constructions, pour réduire le risque de corrosion par attaques aux chlorures :

- Augmenter l'enrobage des armatures
- Diminuer la perméabilité du béton
- Tester la recette de béton à la résistance aux chlorures (cf. 4.4)
- En fonction de l'exposition, maîtriser l'apport de chlorures sur la surface du béton

## **4. Corrosion des armatures due aux chlorures**

4.3. les classes d'exposition selon SN EN 206

## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.3. les classes d'exposition selon SN EN 206



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

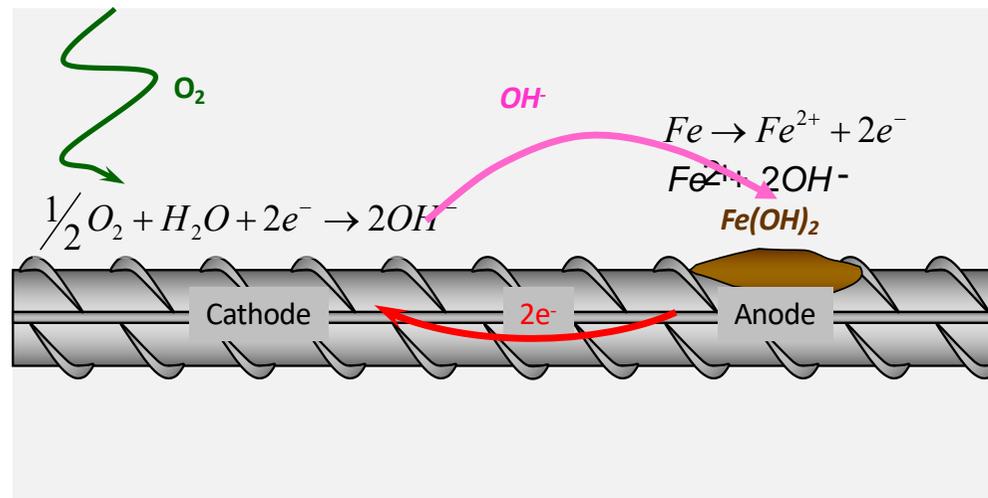
### 4.3. les classes d'exposition selon SN EN 206

<b>3. Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine</b>		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit :		
NOTE      A propos des conditions d'humidité, voir aussi la section 2 de ce tableau.		
<i>XD1</i>	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne
<i>XD2</i>	Humide, rarement sec	Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.
<i>XD3</i>	Alternance d'humidité et de séchage	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures; Chaussées. Dalles de parc de stationnement de véhicules.

## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.5. Cas de corrosion sur ouvrage : diagnostic et remise en état

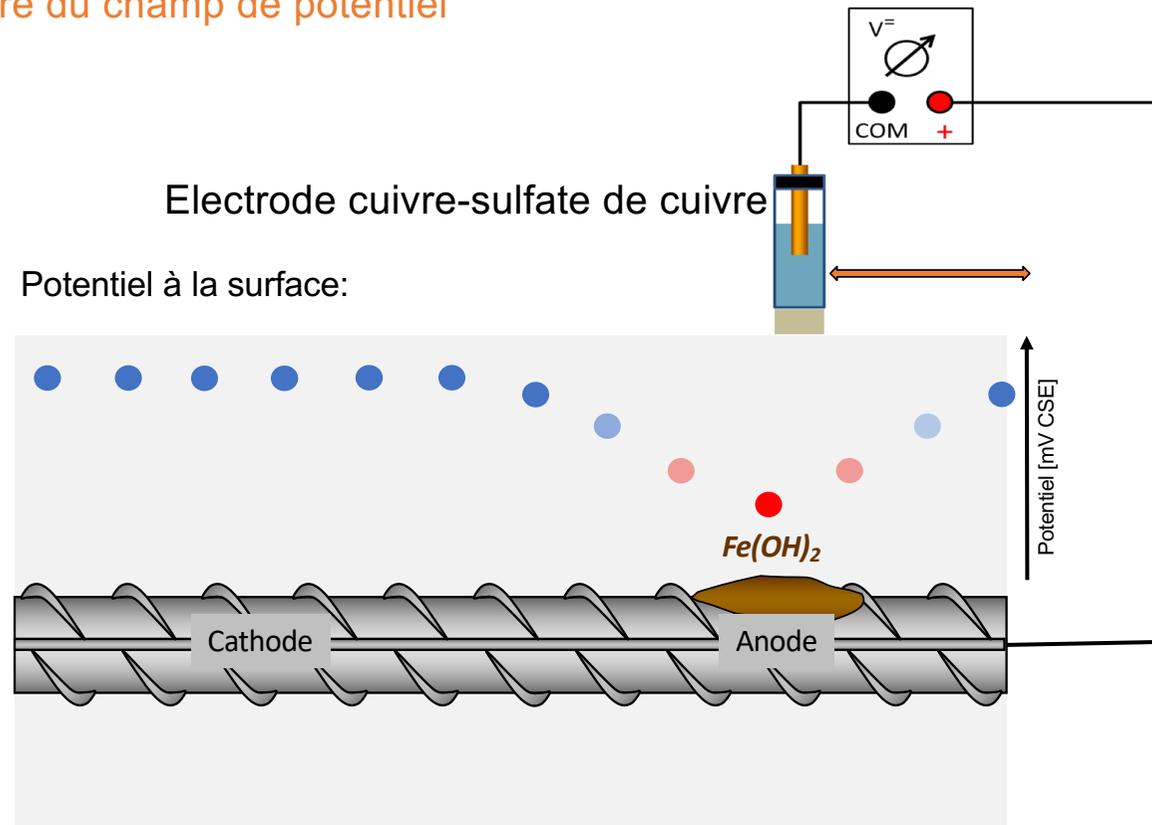
→ Mesure du champ de potentiel



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

### 4.5. Cas de corrosion sur ouvrage : diagnostic et remise en état

→ Mesure du champ de potentiel

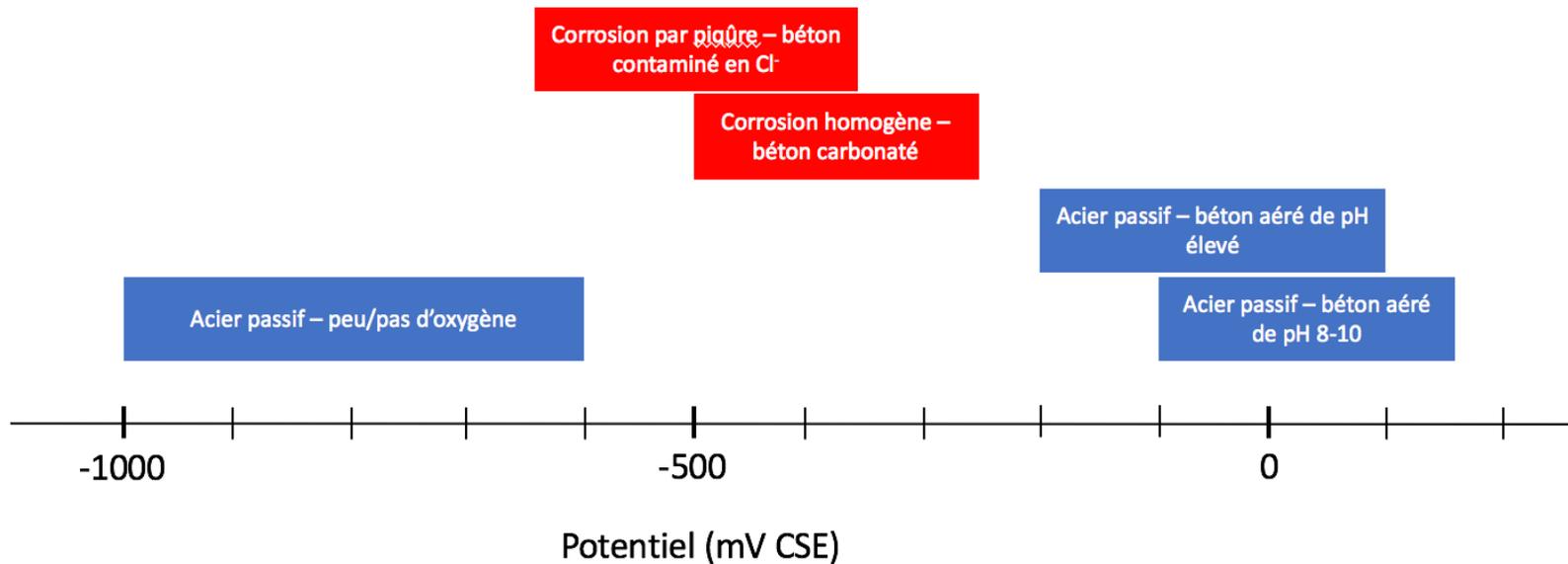


Le potentiel chute au niveau des piles de corrosion

## 4. Corrosion des armatures par attaque aux chlorures

### 4.5. Cas de corrosion sur ouvrage : diagnostic et remise en état

→ Mesure du champ de potentiel



→ **Attention:** les limites effectives de corrosion varient en fonction de l'ouvrage. Les facteurs tels que:

- humidité relative / humidité du béton
- perméabilité du béton
- défauts du béton
- courants secondaires
- température
- ...

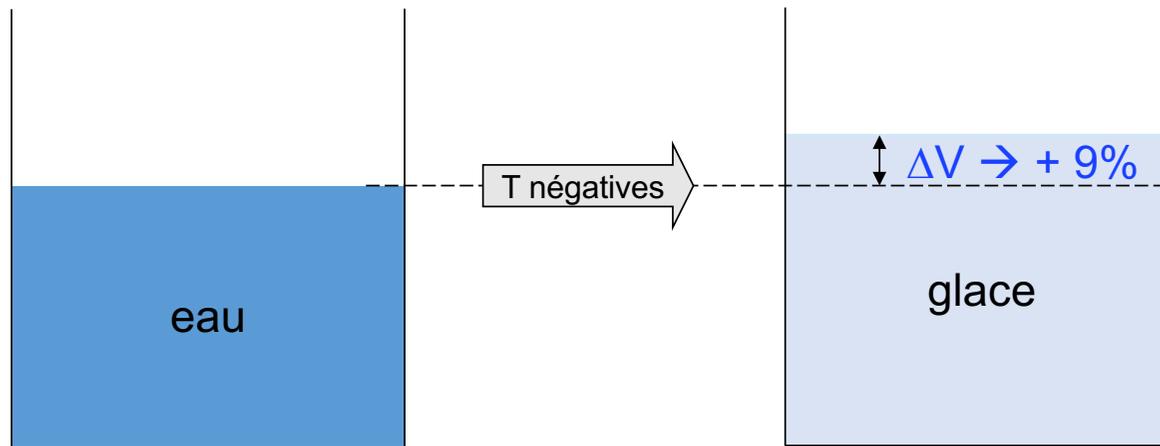
font varier les potentiels de corrosion. Chaque ouvrage nécessite une étude statistique afin de définir le seuil de potentiel de corrosion

## **5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel**

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton

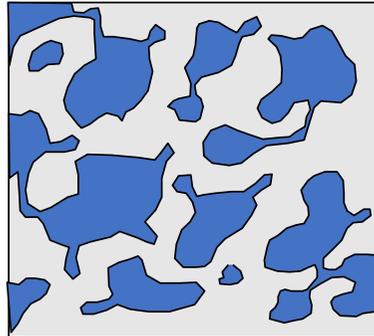
## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton



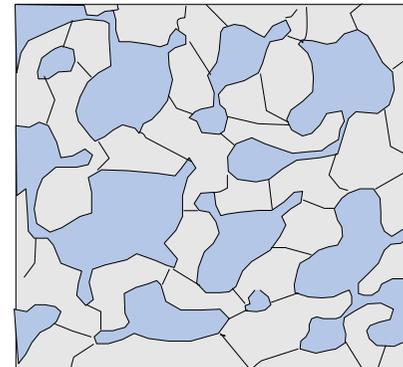
Dans le béton :

pores capillaires saturés



T négatives

fissuration de la pâte de ciment  
décohésion pâte-granulats

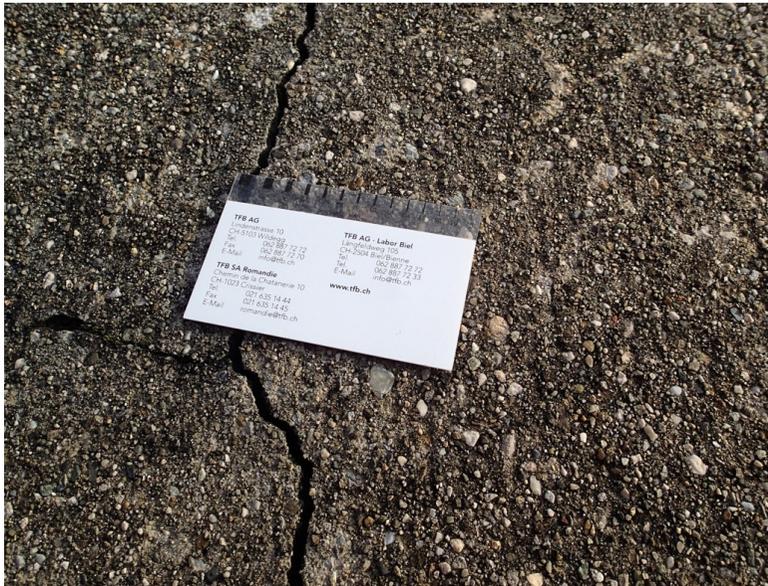


## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton

Les effets du gel-dégel sur le béton:

« sablage » de surface



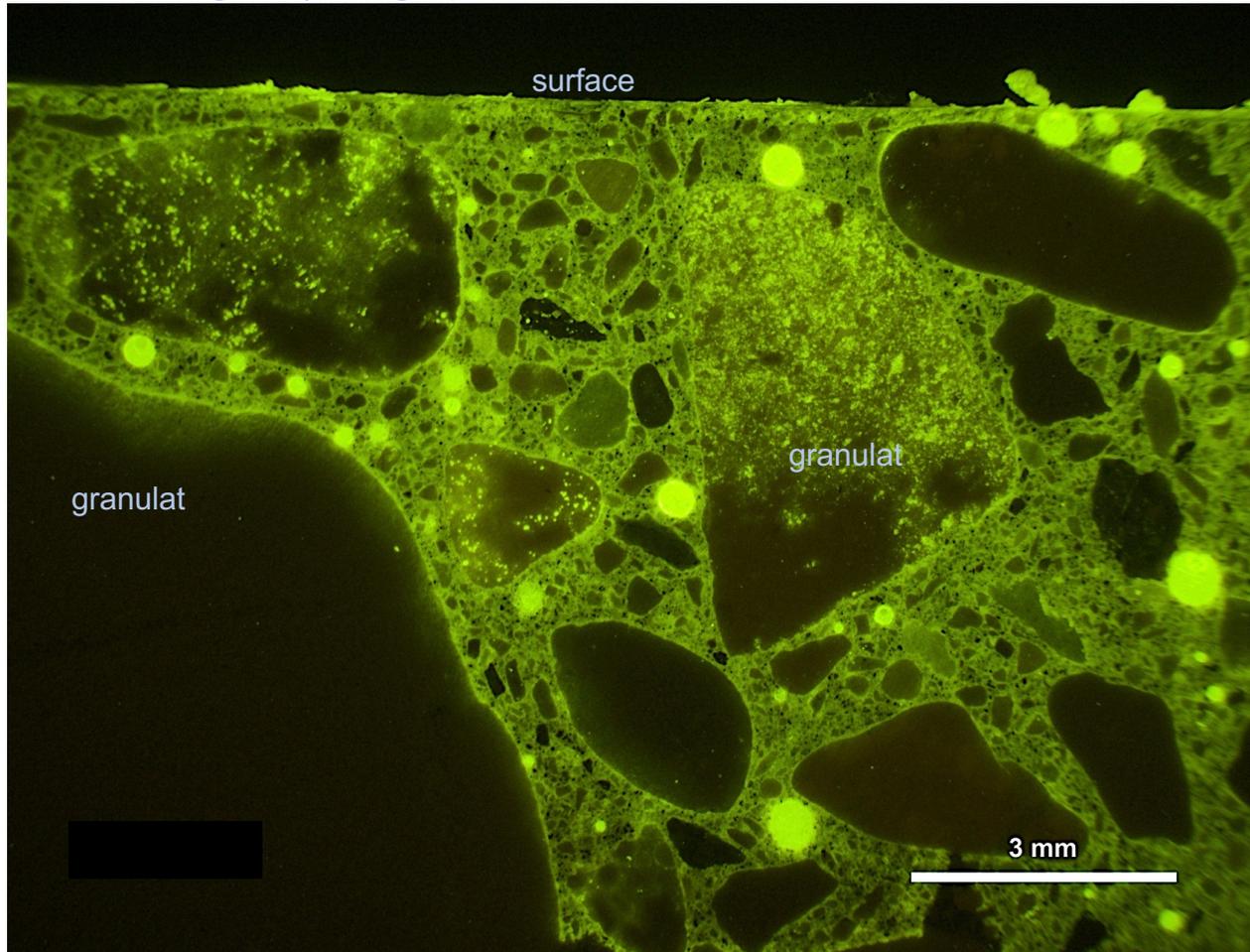
écaillage de surface



## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton

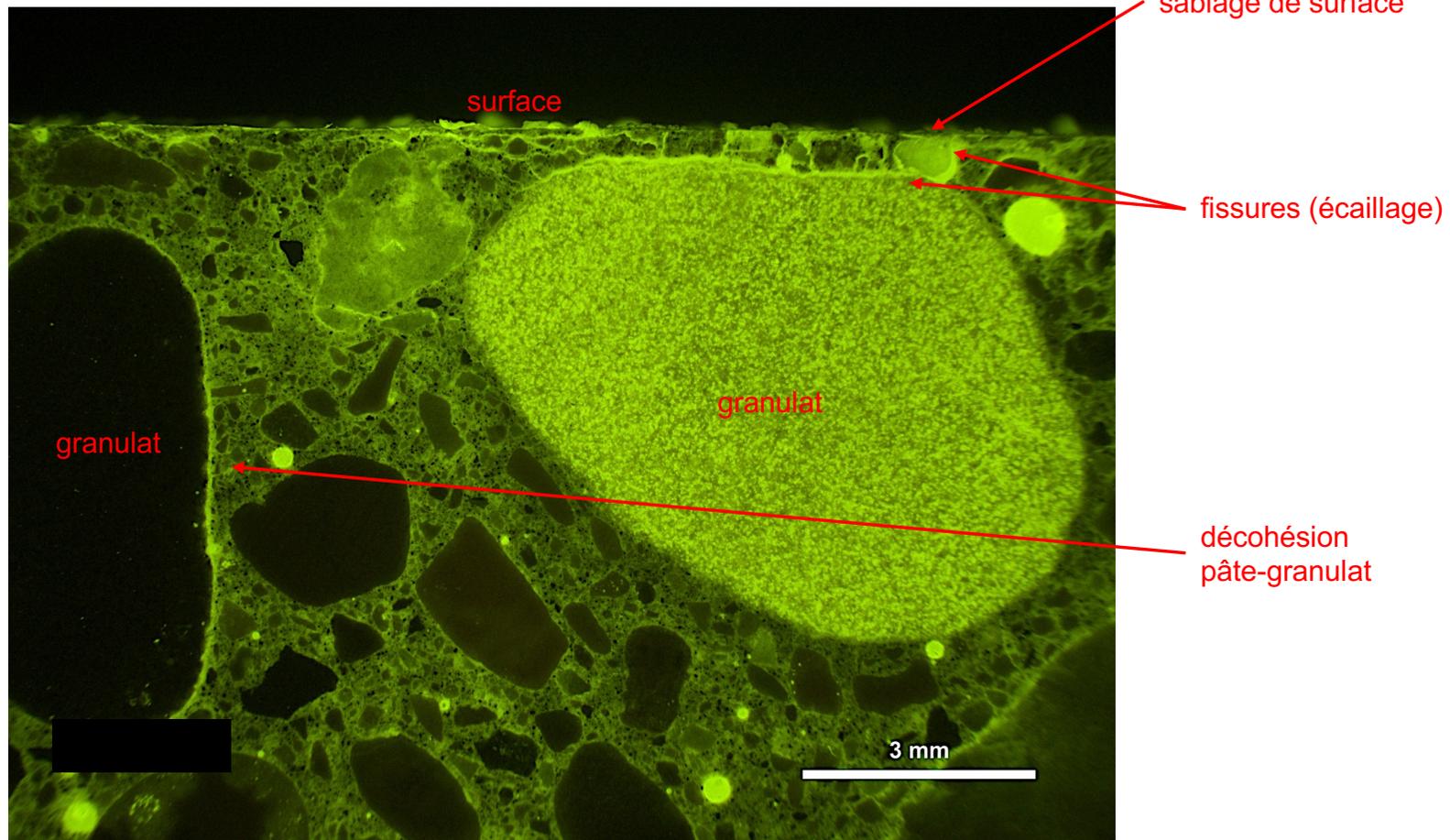
Béton non dégradé par le gel (béton imprégné. Coupe polie en lumière UV):



## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton

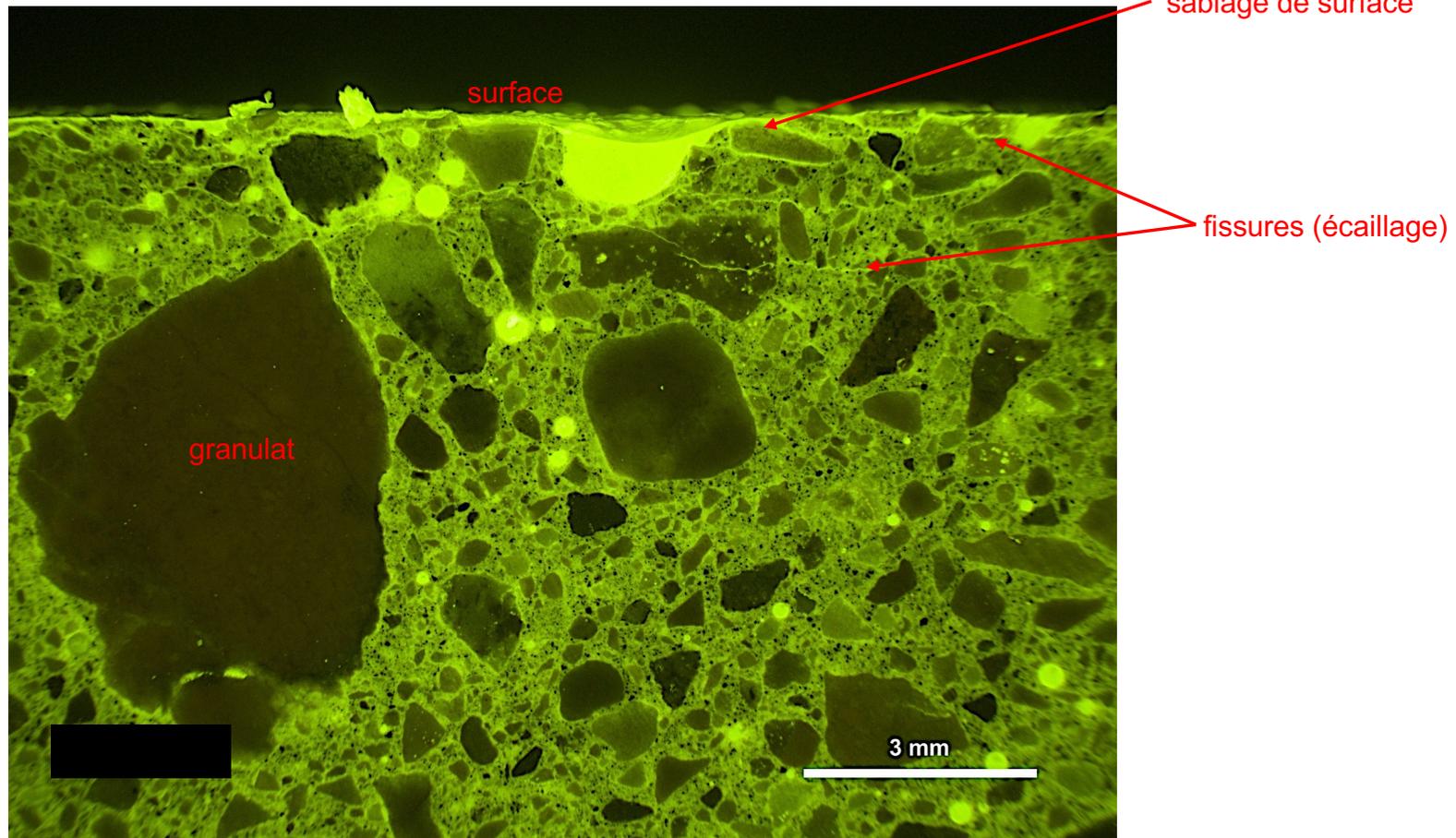
Béton dégradé par le gel:



## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton

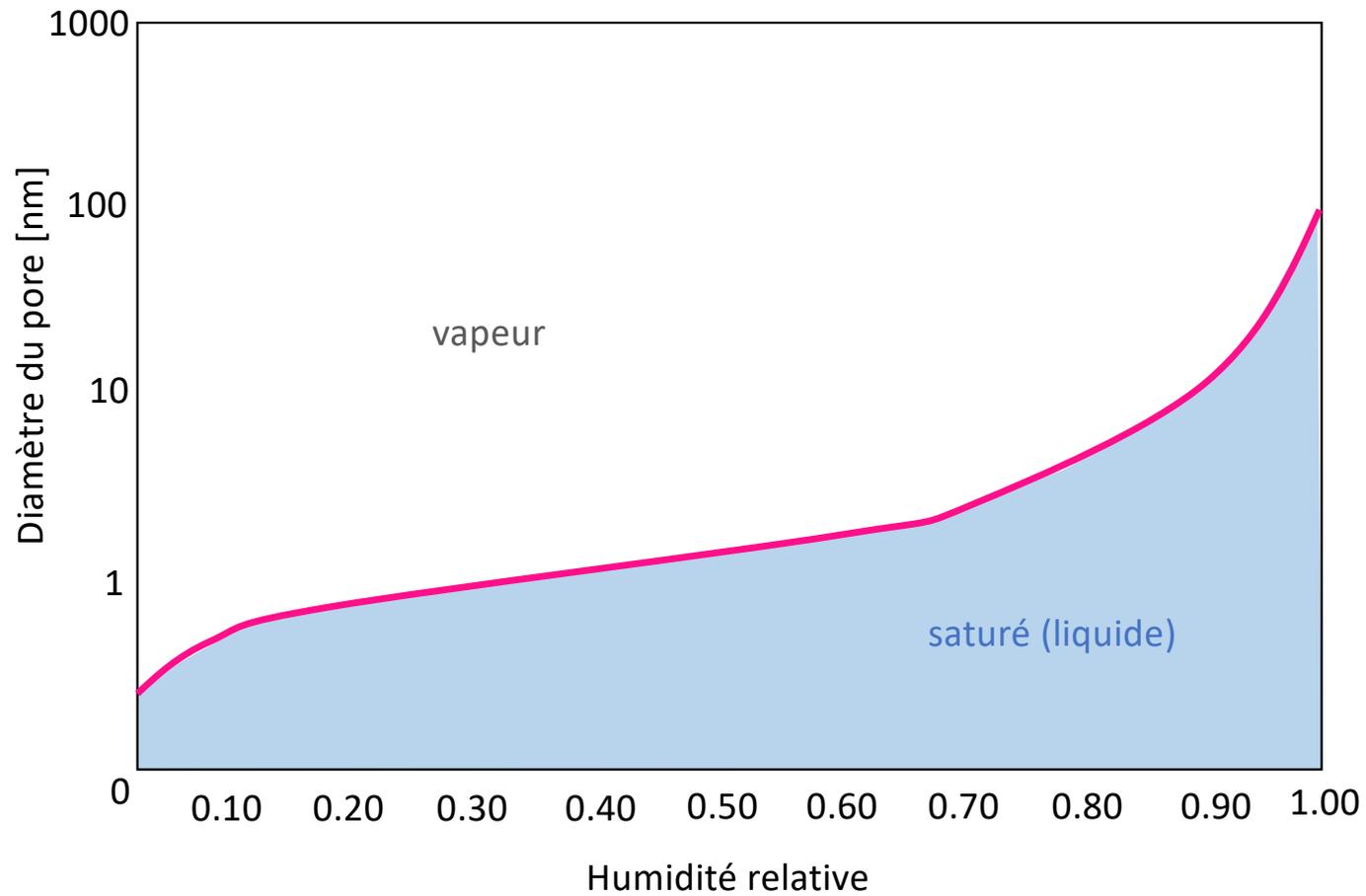
Béton dégradé par le gel:



## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.1. le phénomène de gel – dégel et son impact sur le béton

Loi Kelvin-Laplace :



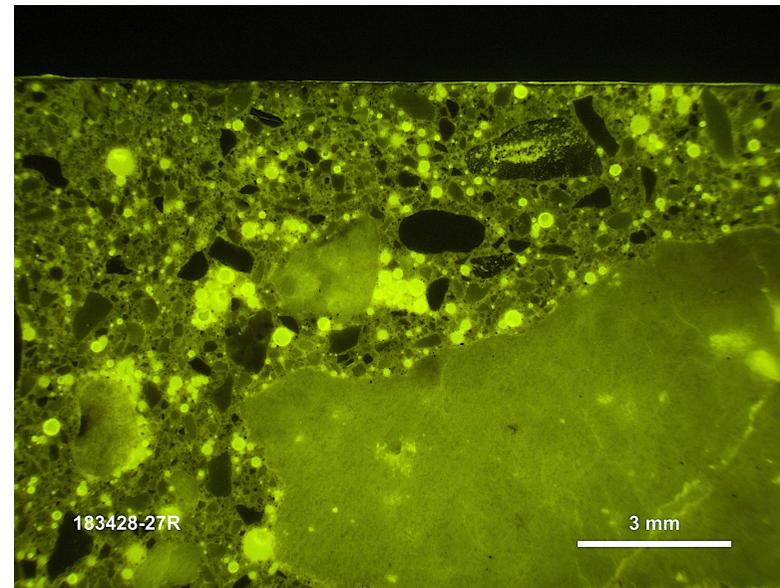
## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.2. prévention

Pour réduire les dommages lié au gel – dégel :

introduction de qq % de pores d'air dans la pâte de ciment :

- diamètre : 10 à 500 microns
- utilisation d'entraîneur d'air (adjuvants liquides)
- Attention à la baisse des propriétés mécaniques



**Il est également possible de réduire la perméabilité à l'eau du béton (réduction du e/c)**

## **5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel**

5.3. les classes d'exposition selon SN EN 206

## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.3. les classes d'exposition selon SN EN 206



## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

### 5.3. les classes d'exposition selon SN EN 206

5. Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage		
Lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé, les différentes classes d'exposition sont :		
<i>XF1</i>	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons exposées à la pluie et au gel
<i>XF2</i>	Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage
<i>XF3</i>	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces horizontales de bétons exposées à la pluie et au gel
<i>XF4</i>	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage et surfaces de bétons verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel : Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.

## 5. Dégradation par le p

### 5.4. essais en laboratoire

Tableau NA.9 Prescriptions pour les essais de perméabilité à l'eau, de la résistance à la carbonatation, aux chlorures et au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage

	Perméabilité à l'eau	Résistance à la carbonatation	Résistance aux chlorures	Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage	
				moyenne	élevée
Essai selon Norme SIA 262/1	Annexe A	Annexe I	Annexe B	Annexe C	
Essai à réaliser pour les classes d'exposition	XC3 <sup>1)</sup>	XC3, XC4, XD1, XD2a, XF1	XD2b, XD3	XF2, XF3	XF4
L'essai doit être réalisé pour les sortes de béton selon tableau NA.2	Sorte B	Sortes B, C, D et E	Sortes F et G	Sortes D et F	Sortes E et G
Valeur limite pour la valeur moyenne	$q_w \leq 10$ g/m <sup>2</sup> h	$K_N \leq 5.0$ mm/y <sup>1/2</sup> <sub>2,3,4)</sub>	$D_{Cl} \leq 10 \cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s	$m \leq 1'200$ g/m <sup>2</sup>	$m \leq 200$ ou $m \leq 600$ g/m <sup>2</sup> et $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_8 + \Delta m_{14})$
Valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible	$q_w \leq 12$ g/m <sup>2</sup> h	$K_N \leq 5.5$ mm/y <sup>1/2</sup> <sub>3,4)</sub>	$D_{Cl} \leq 13 \cdot 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s	$m \leq 1'800$ g/m <sup>2</sup>	$m \leq 250$ ou $m \leq 800$ g/m <sup>2</sup> et $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_8 + \Delta m_{14})$
Fréquence d'essai pour les producteurs de béton <u>sans</u> expérience suffisante <sup>5)</sup>	au moins 4 par année ou tous les 500 m <sup>3</sup> , à partir de 4'000 m <sup>3</sup> tous les 1'000 m <sup>3</sup> , à partir de 30'000 m <sup>3</sup> tous les 1'500 m <sup>3</sup>		au moins 4 par année ou tous les 125 m <sup>3</sup> , à partir de 1'000 m <sup>3</sup> tous les 250 m <sup>3</sup> , à partir de 2'000 m <sup>3</sup> tous les 500 m <sup>3</sup>		
Fréquence d'essai pour les producteurs de béton <u>avec</u> expérience suffisante <sup>5)</sup>	au moins 2 par année ou tous les 1'000 m <sup>3</sup> , à partir de 4'000 m <sup>3</sup> tous les 2'000 m <sup>3</sup> , à partir de 30'000 m <sup>3</sup> tous les 3'000 m <sup>3</sup>		au moins 2 par année ou tous les 250 m <sup>3</sup> , à partir de 1'000 m <sup>3</sup> tous les 500 m <sup>3</sup> , à partir de 2'000 m <sup>3</sup> tous les 1'000 m <sup>3</sup>		

1) voir tableau NA.3, note e).

2) Les valeurs indiquées sont valables pour un enrobage d'armature  $c_{nom}$  selon SIA 262 et pour une durée de service prévue de 50 ans.

3) Pour XC3 et une durée de service prévue de 100 ans:  $K_N \leq 4.0$  mm/y<sup>1/2</sup> (valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible: 4.5 mm/y<sup>1/2</sup>). Si l'enrobage d'armature est augmenté de 35 mm (valeur de la norme SIA 262) à 45 mm, les valeurs ci-après sont valables pour un béton classé XC4 (note 4).

4) Pour XC4 et une durée de service prévue de 100 ans:  $K_N \leq 4.5$  mm/y<sup>1/2</sup> (valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible: 5.0 mm/y<sup>1/2</sup>).

5) L'introduction de l'essai de résistance à la carbonatation n'a aucune répercussion sur la distinction entre un producteur sans ou avec expérience suffisante, c'est-à-dire la distinction entre un producteur sans et avec suffisamment d'expérience reste inchangé.

## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

5.5. cas de gel dégel sur ouvrage : diagnostic et remise en état

### Balcon dans un chalet

**Constat:** éclatement du béton de surface, sablage:



- Âge du béton 1 an
- béton de sorte G (XF4 – E/C:0.45 – C:320kg/m<sup>3</sup>)

# 1. Introduction

## 1.3. Principales causes de dégradation des bétons

### Corrosion des armatures

(Ch. 2, 3, 4)

~ 90%



Carbonatation  
du béton

Pénétration  
des chlorures

### Gel / dégel (Ch. 5)

~ 5%



### RAG : réaction alcali granulat (Ch. 6)

~ 5%



### Attaque acide (Ch. 7)

Attaque sulfatique

Usure mécanique

## **6. Réaction Alkali Granulat (RAG)**

### 6.1. RAG : mécanisme

## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



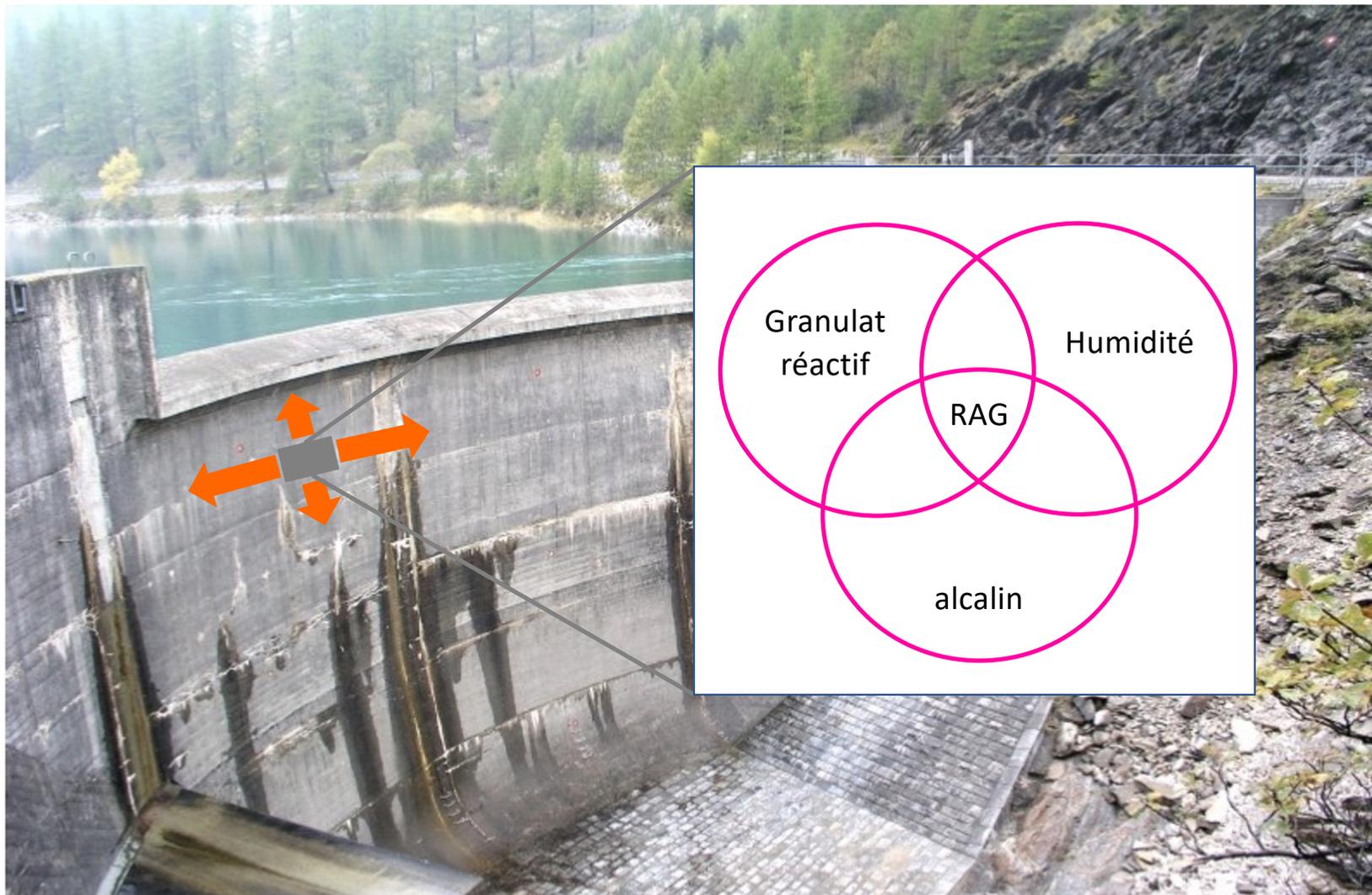
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



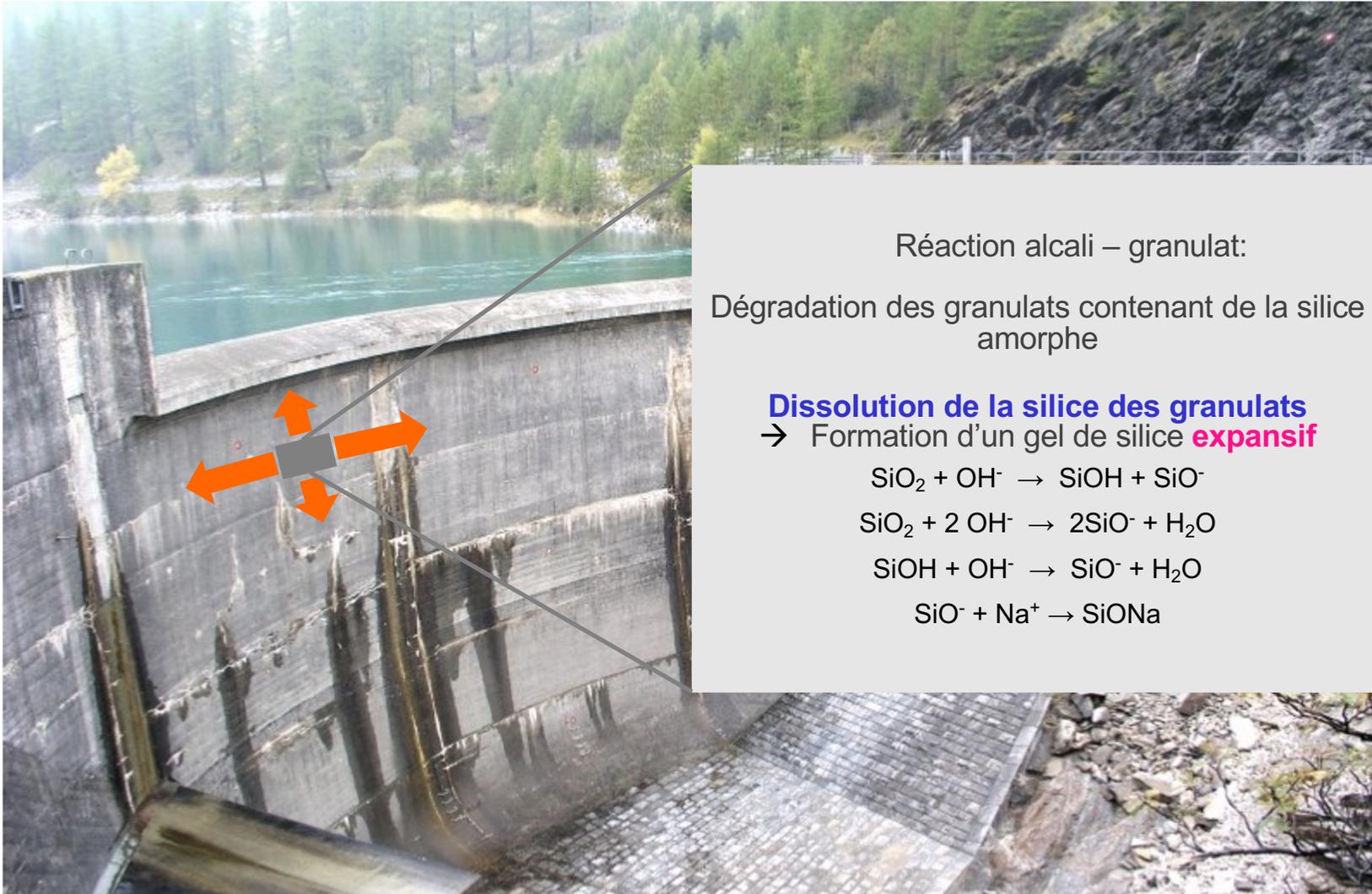
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



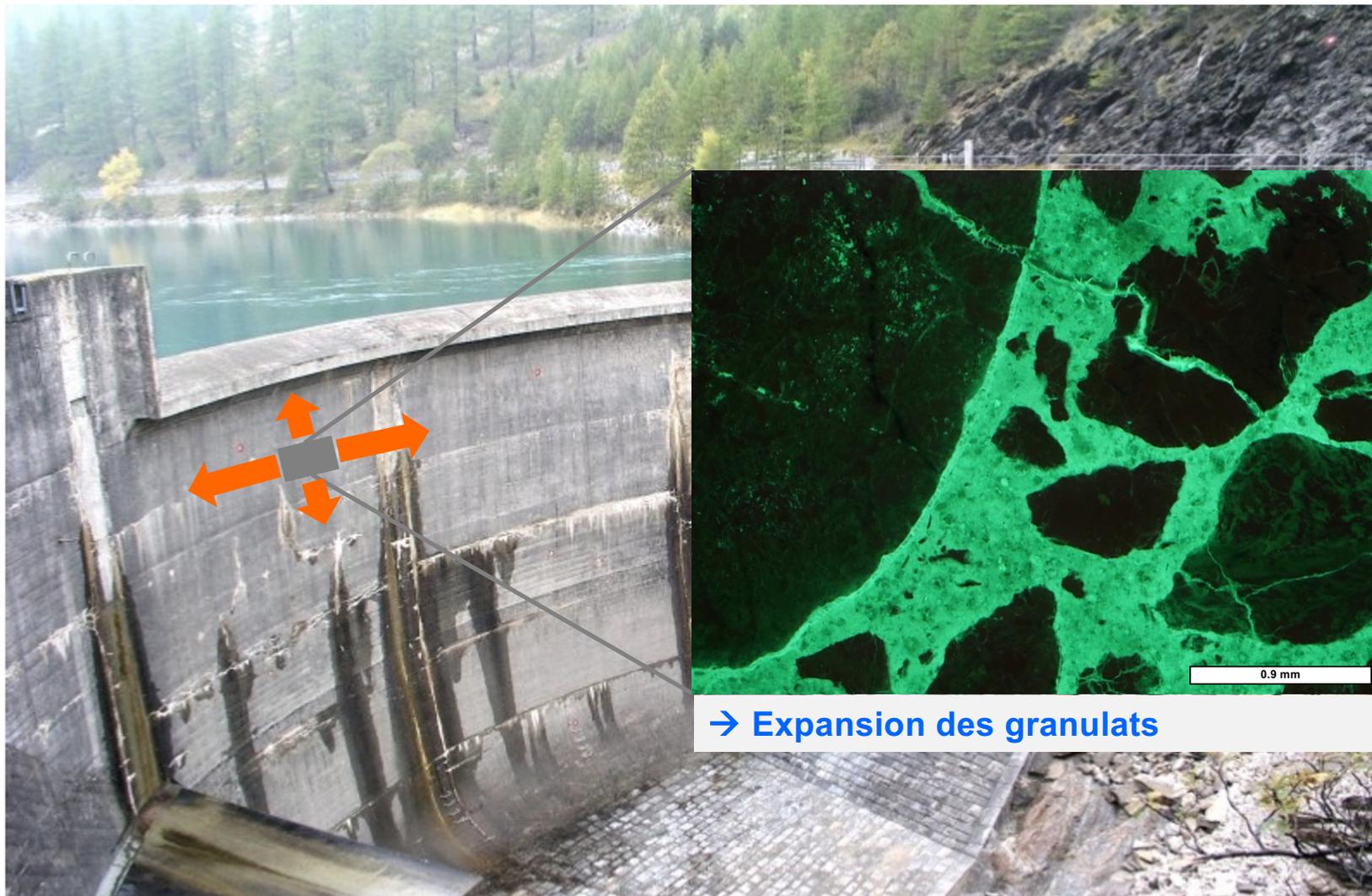
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



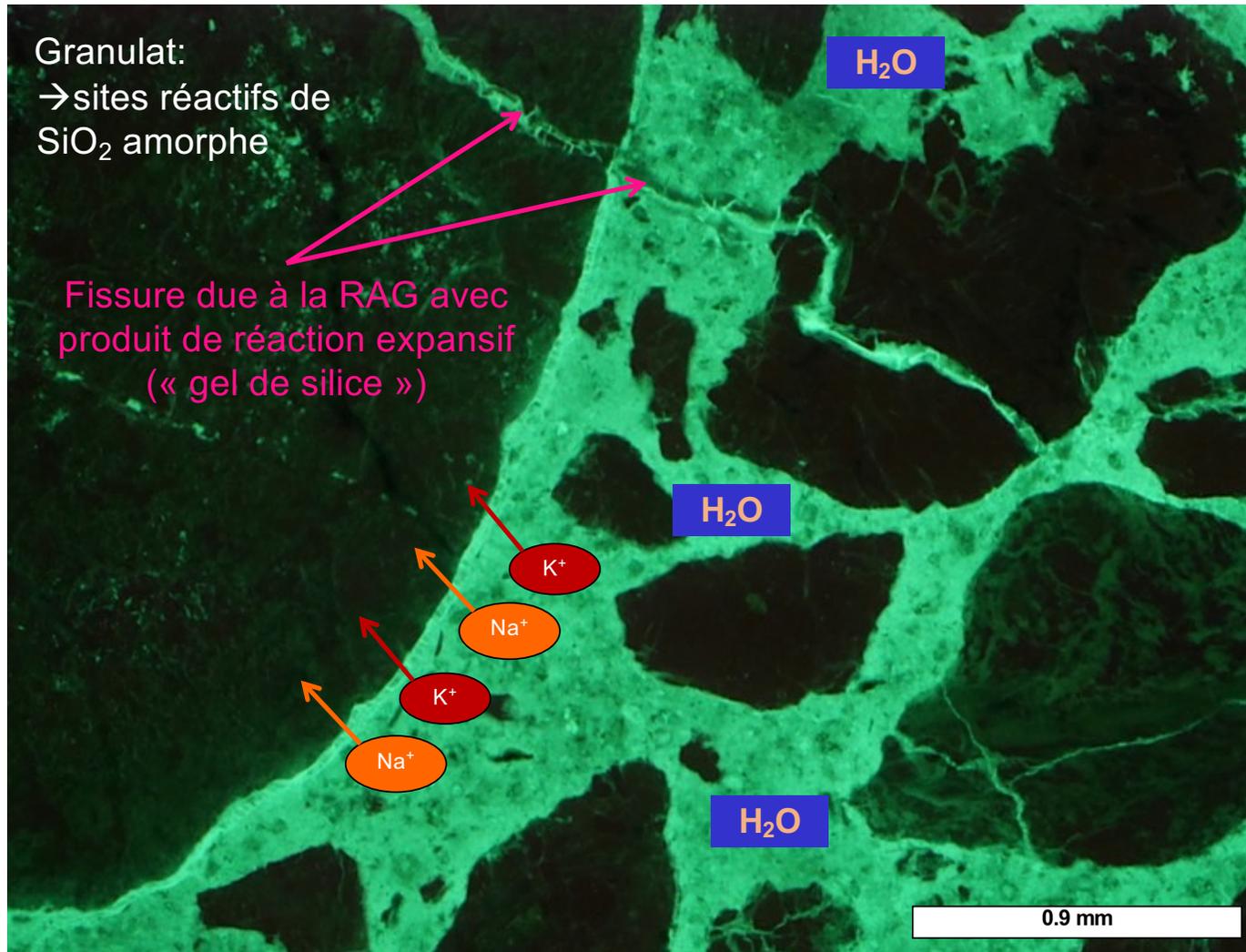
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



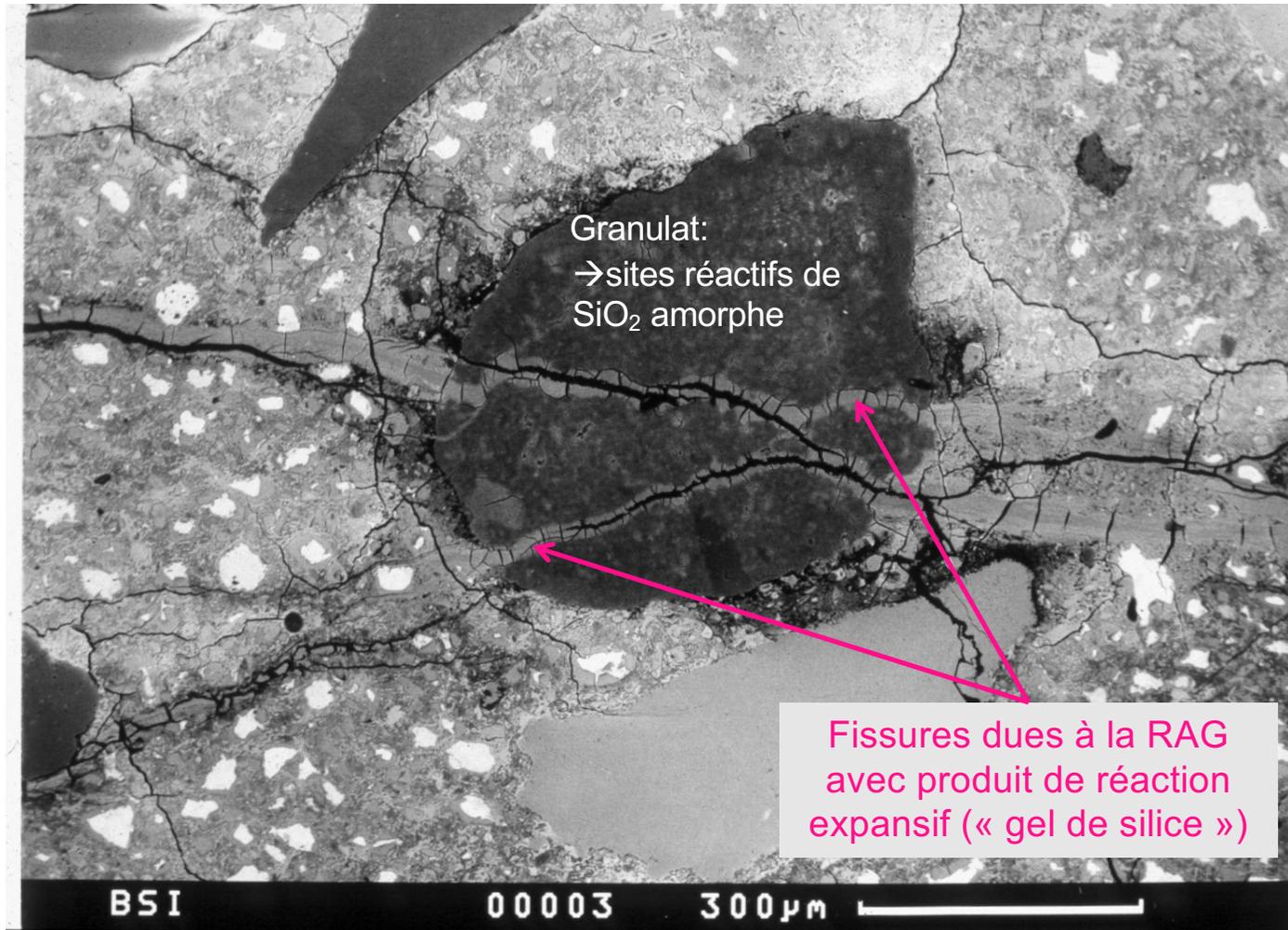
## 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



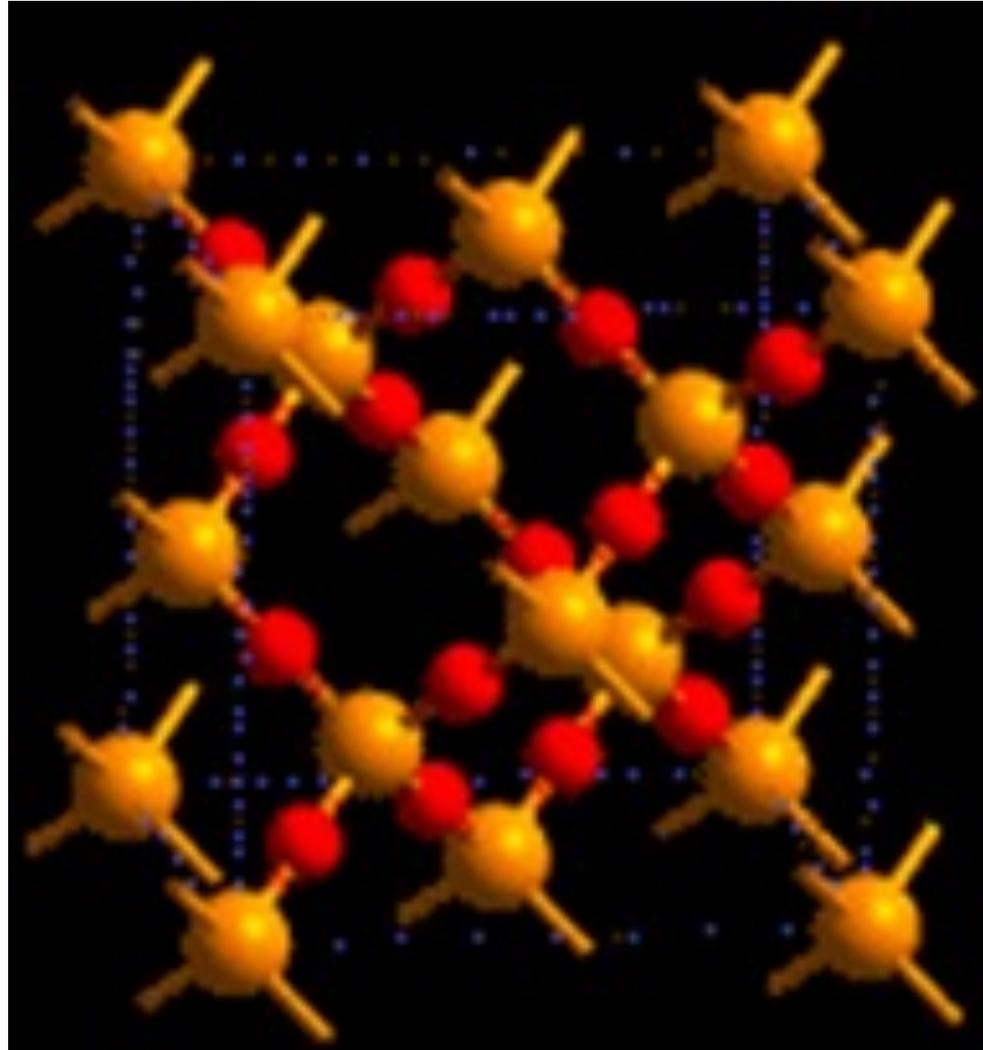
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme

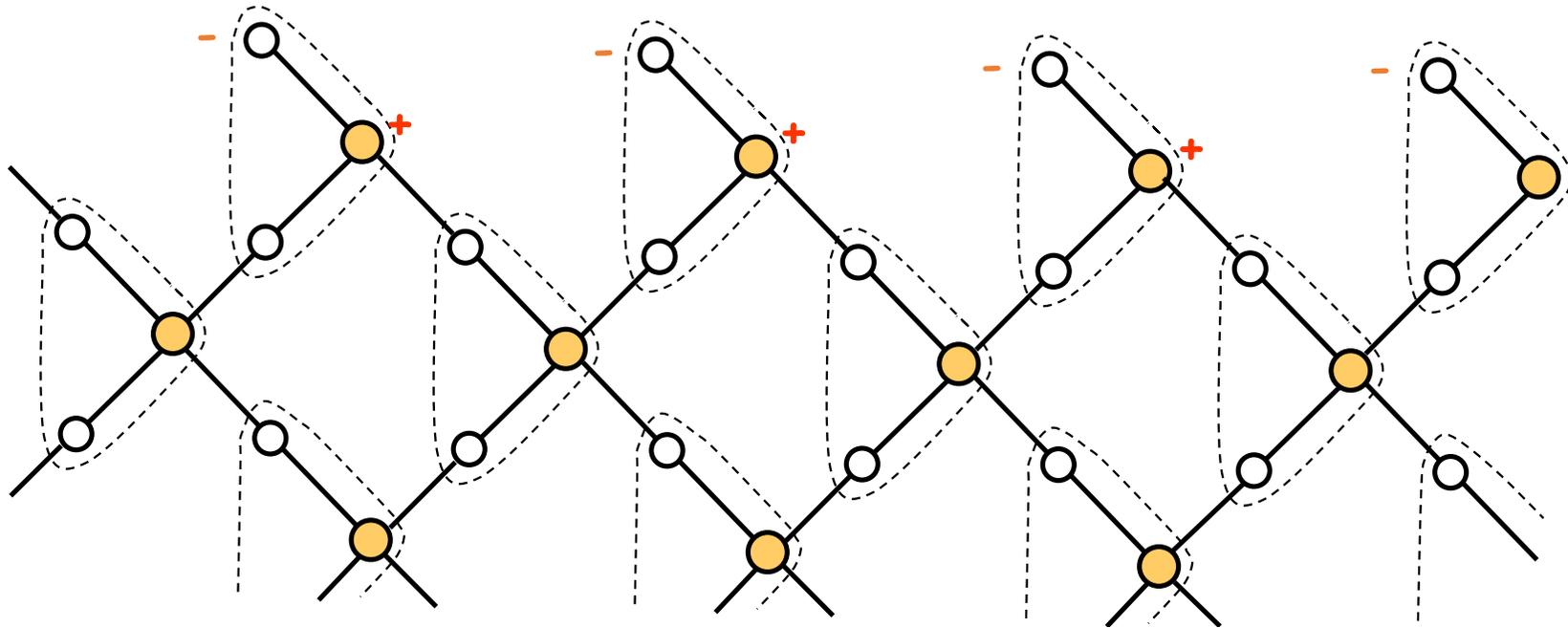


# Les mécanismes de la réaction

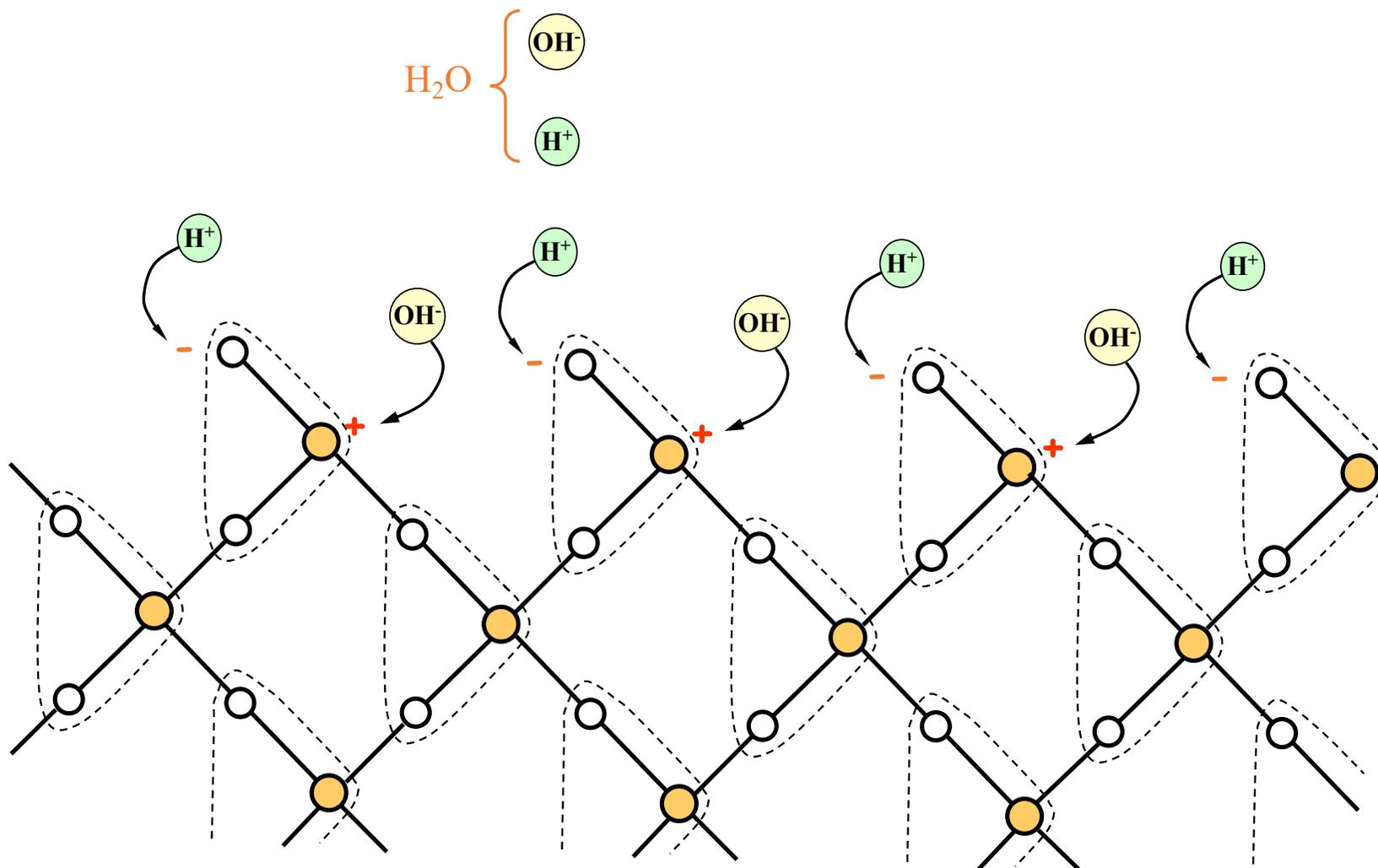
La silice cristallisée est composée de tétraèdres ordonnés

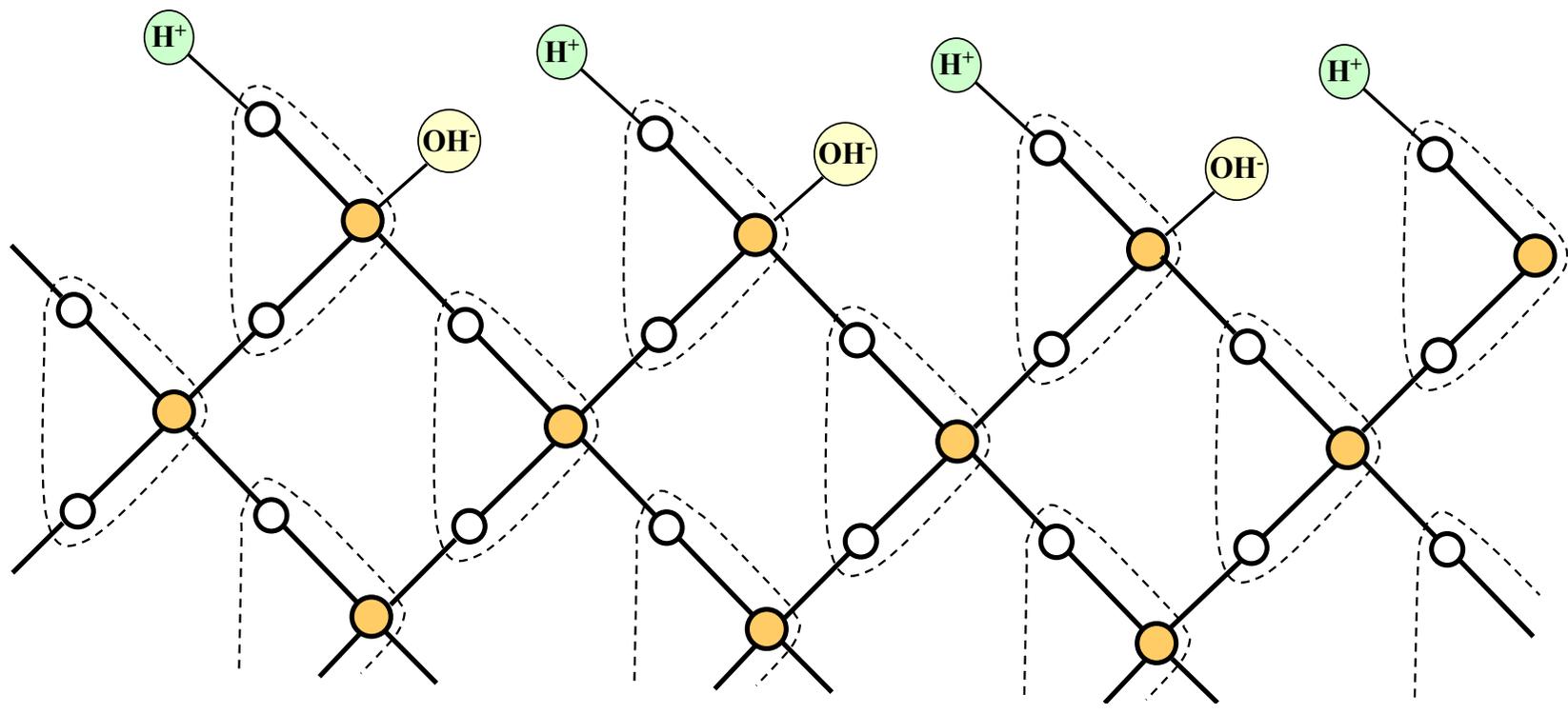
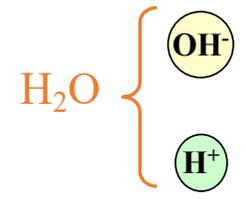


Les tétraèdres incomplets à la surface sont chargés

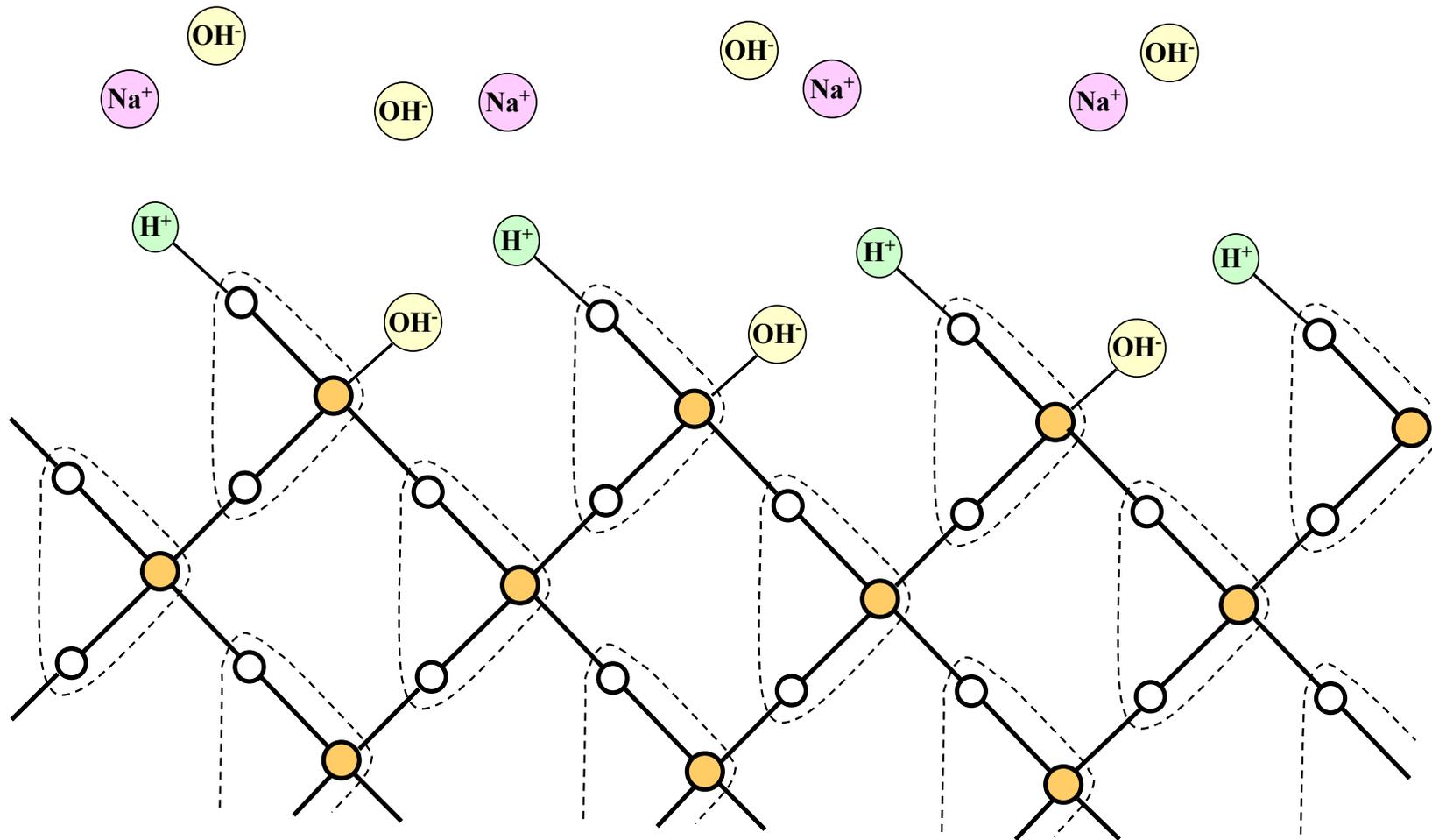


En présence d'eau,  
les ions sont adsorbés à la surface

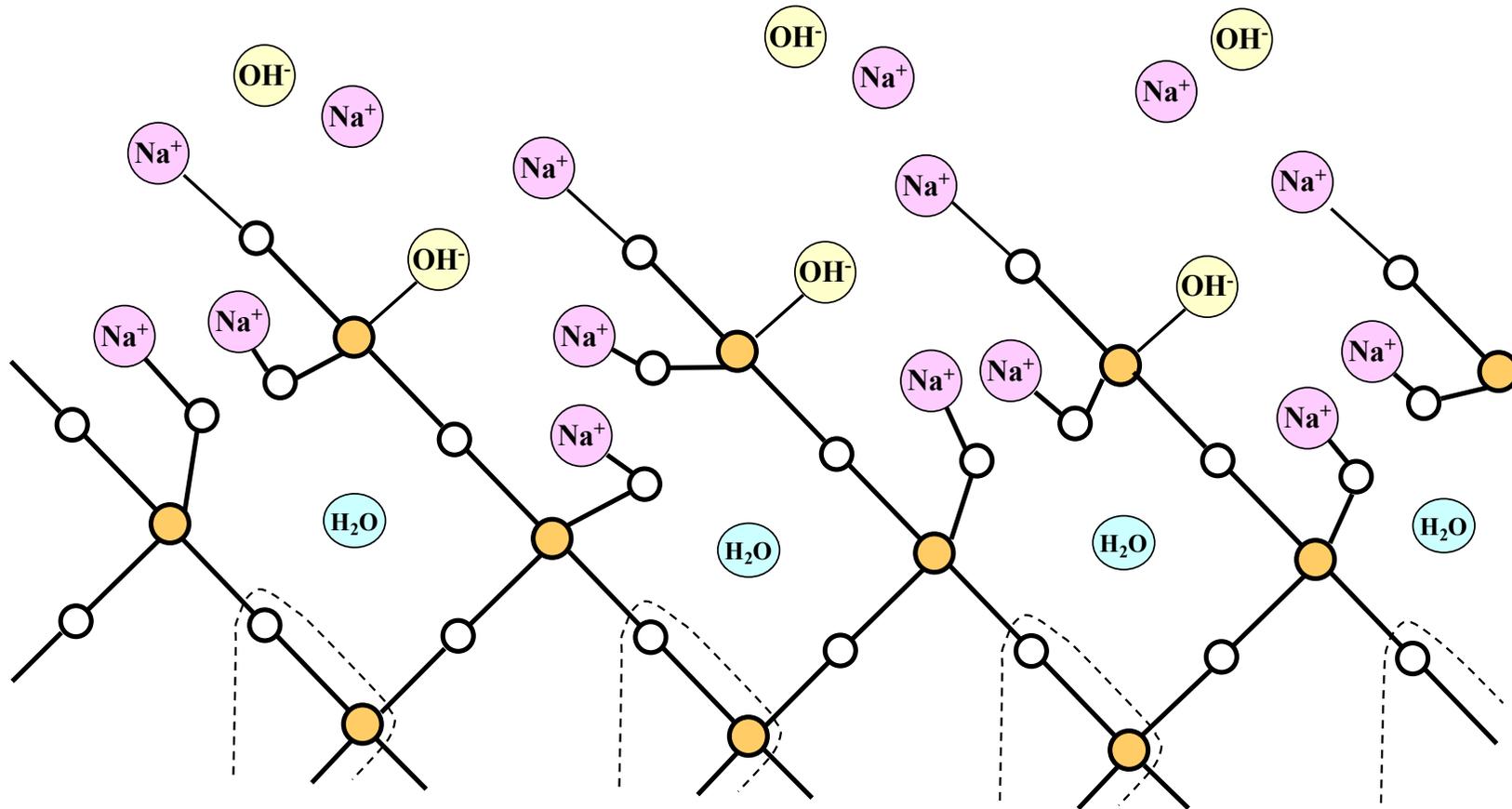




En solutions alcalines, les ions métalliques adsorbent

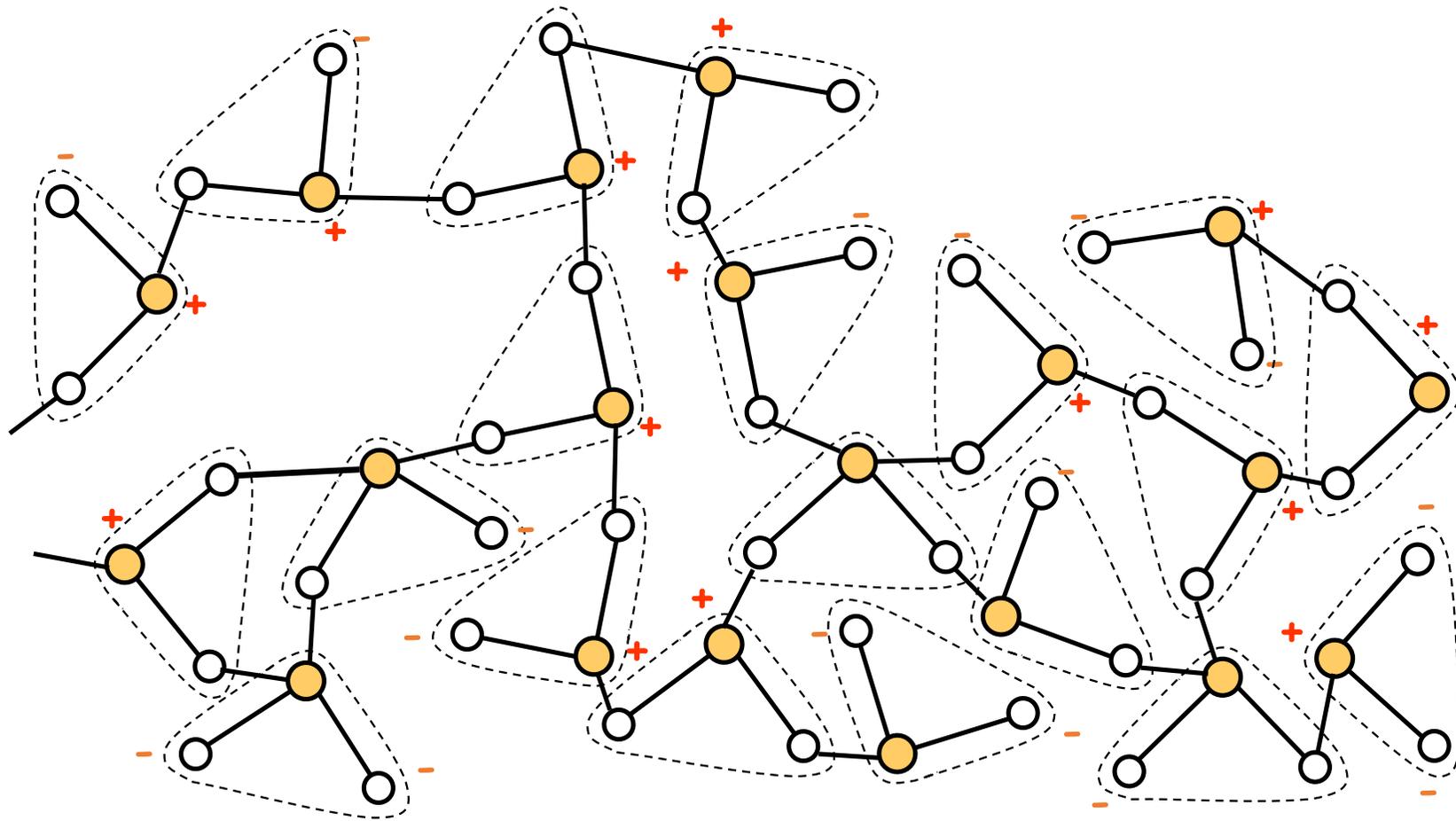


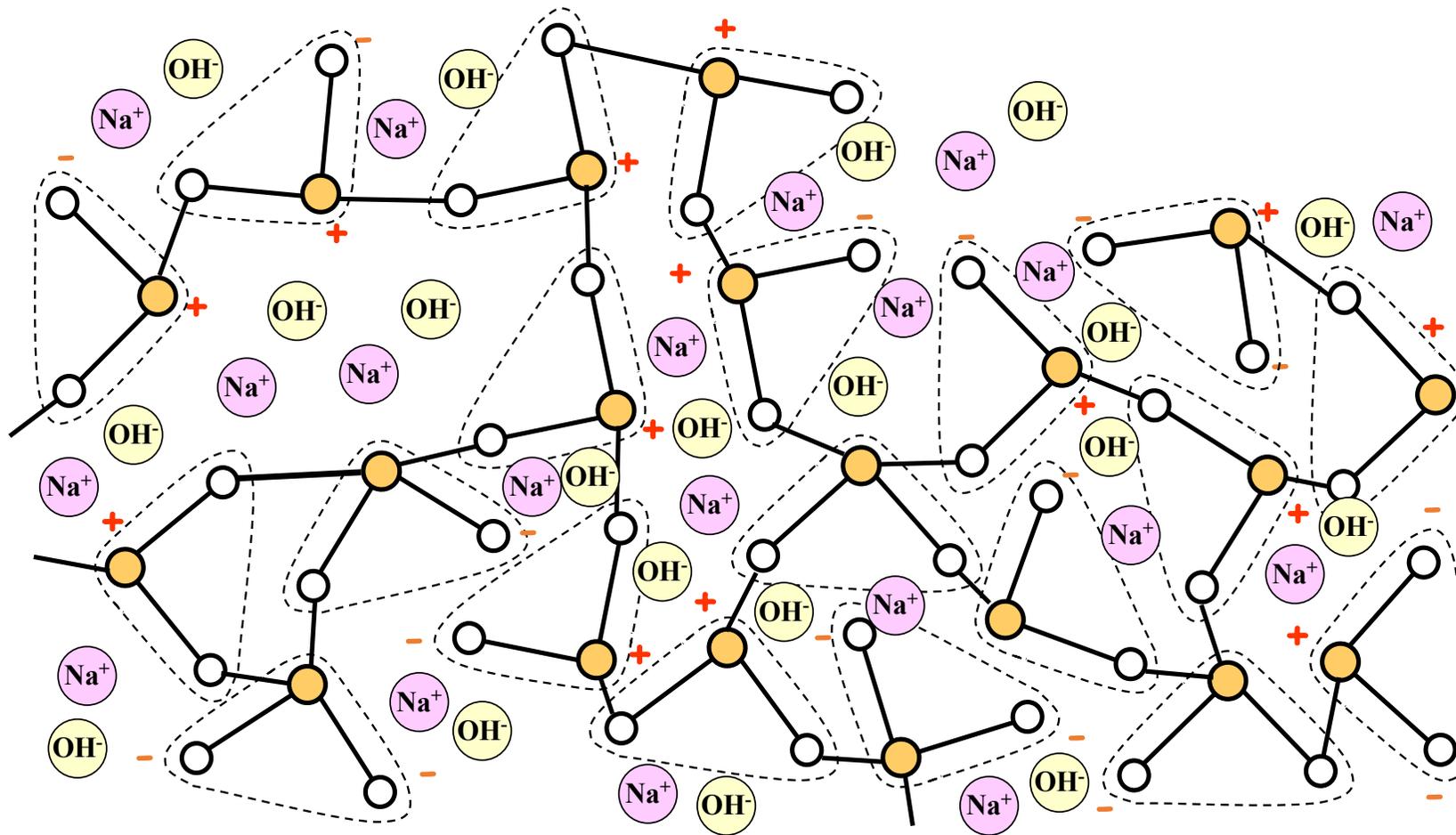
Ceci conduit à la rupture des liaisons silanol



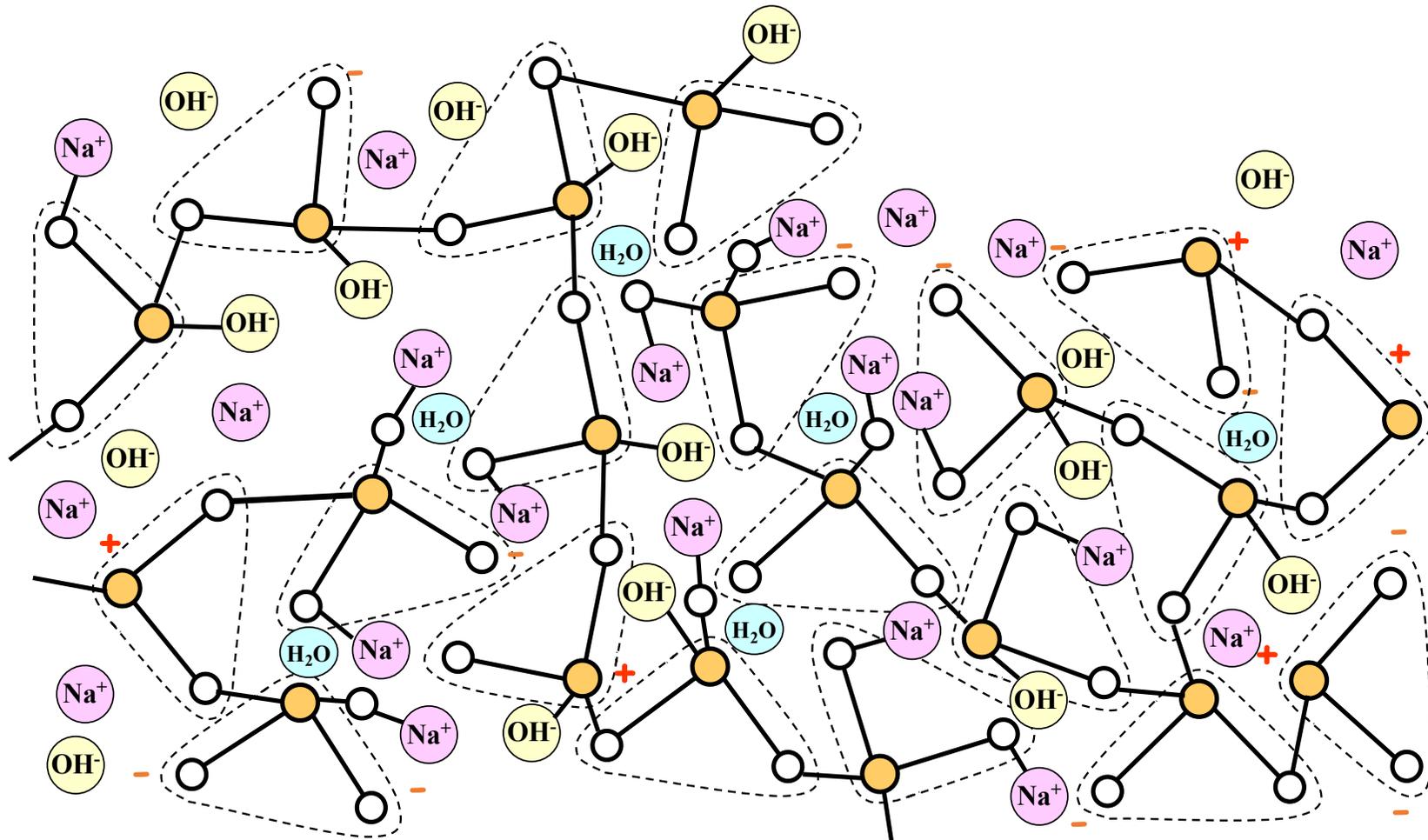
Dans les roches bien  
cristallisées,  
ceci apparaît seulement à  
la surface

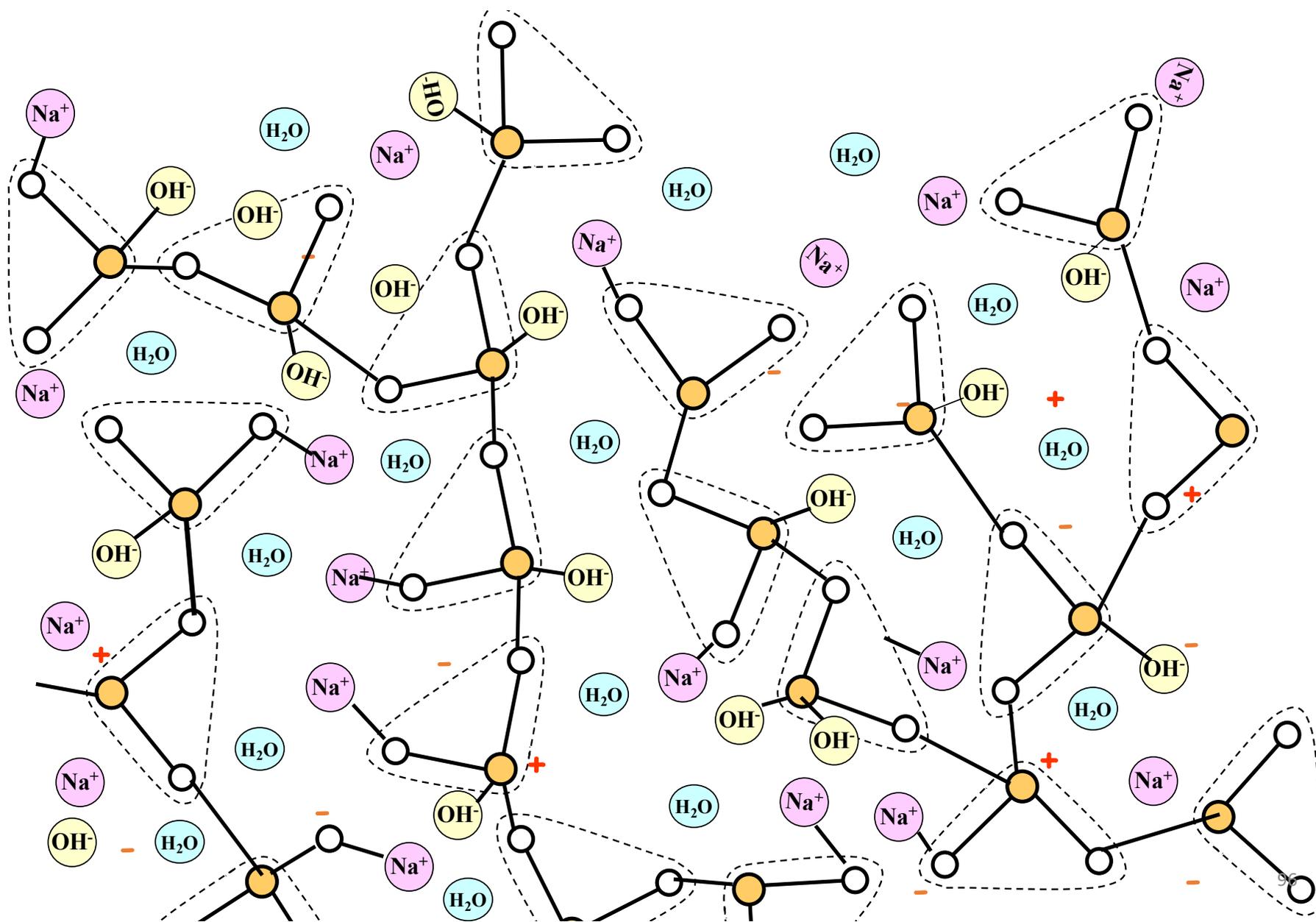
Dans les silices amorphes ou cristallisée les hydroxydes alcalins peuvent pénétrer dans le cristal

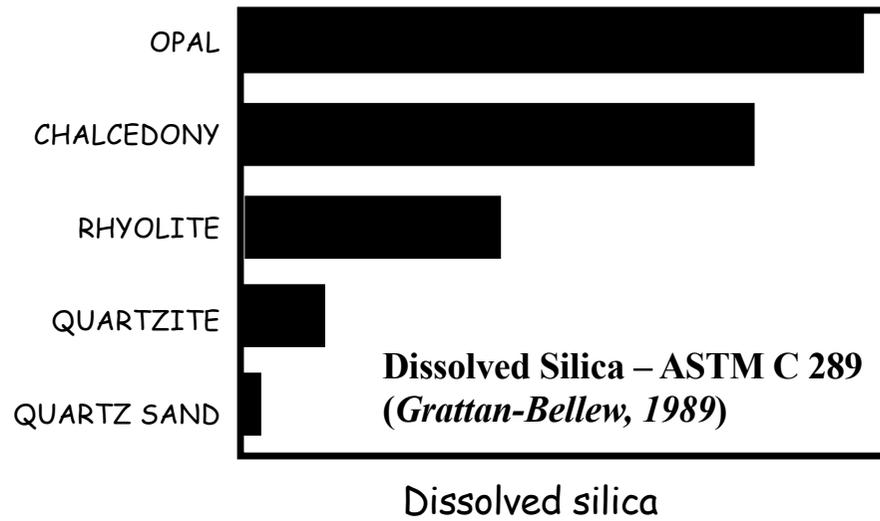




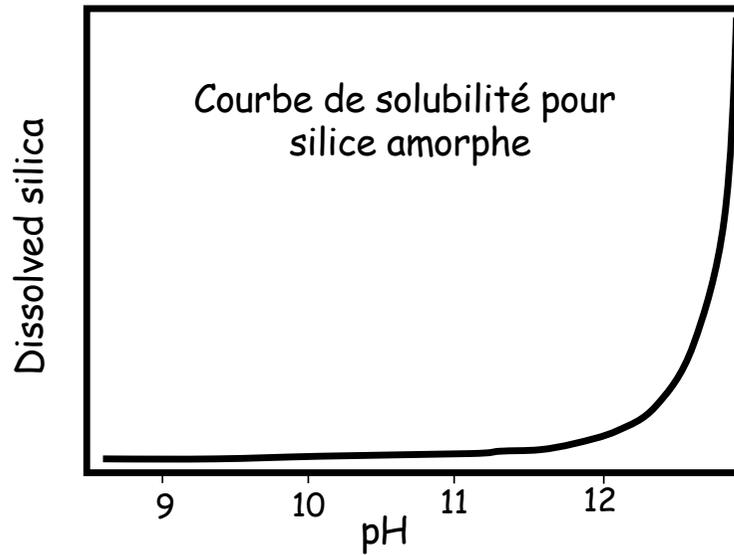
Plusieurs liaisons silanol rompues et l'eau entrante,  
signifie que la silice disloquée a un volume plus grand  
> EXPANSION







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 <sub>2</sub>	20,5	(19 – 21)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6	(4-7)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5	(2-3)
CaO	64	(62-65)
MgO	1,2	(1-4)
SO <sub>3</sub>	2,8	(2,5-3,2)
<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>0,5</b>	<b>(0,3-1)</b>
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>0,2</b>	<b>(0,2-0,5)</b>
PaF(LO)I	1	(1-2)
CaO libre	1	(0,5-1,5)
resid	0,3	(0,2-0,4)

insol

+Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CO<sub>2</sub>



Poids molaire  
Na<sub>2</sub>O

Poids molaire  
K<sub>2</sub>O

## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.2. RAG : prévention

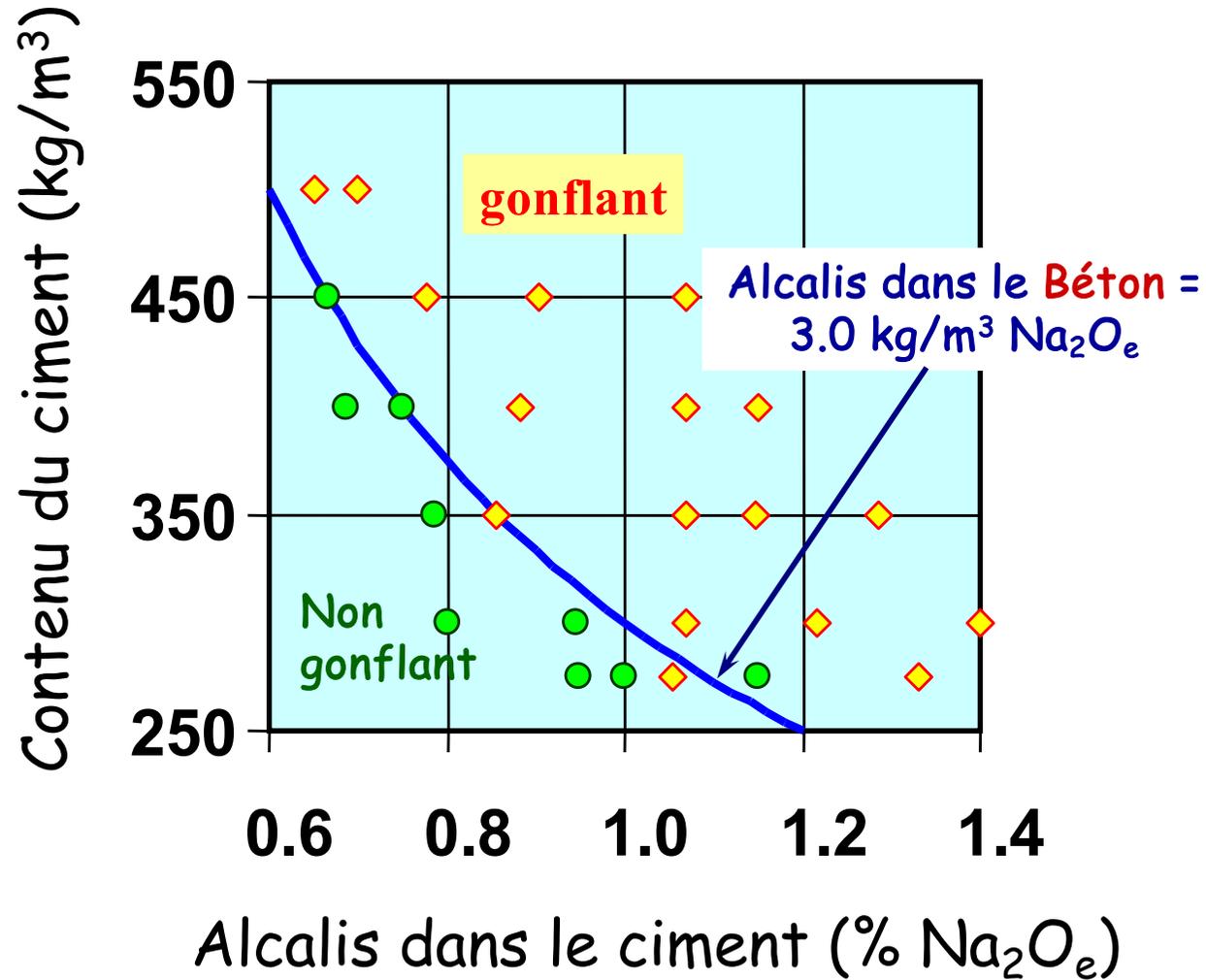
#### Quelques méthodes de prévention :

- (Eviter les granulats réactifs)
- Utiliser du ciment à basse teneur en alcalins (**attention! ralenti la réaction mais ne l'arrête pas**)
- Utiliser du ciment avec des laitiers, cendres volantes ou argiles calcinées

→ Ces modifications de la recette de béton doivent être testées et validées en laboratoire!

- Maîtriser l'apport d'eau
- Prendre en considération la durée de service de l'ouvrage!

## Effet des alcalis du ciment sur l'expansion

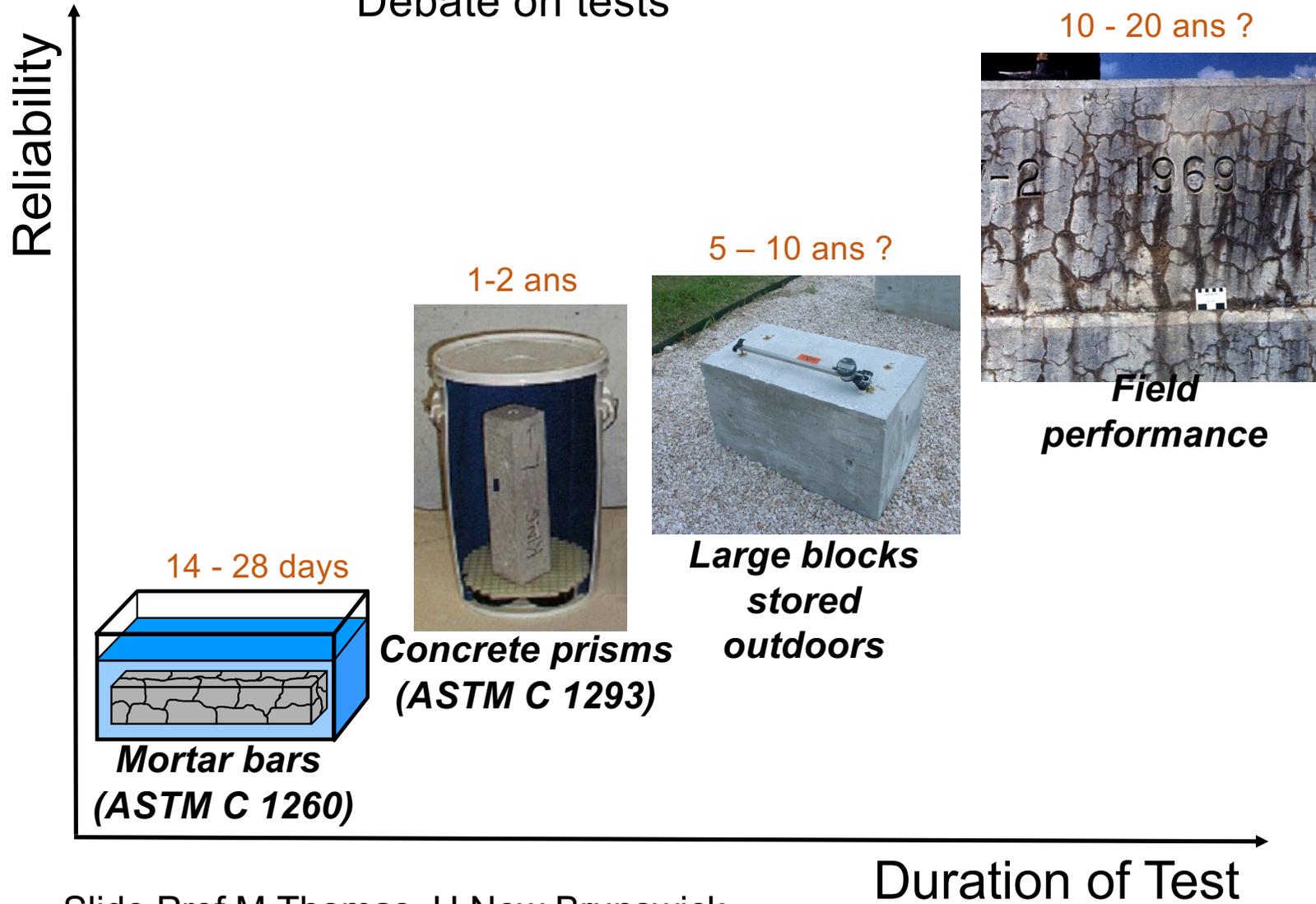


Seuil pour ASR  $\sim 3\text{kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_e$

Ciment à basse teneur en alcali:  
 $\text{Na}_2\text{O}_e < \sim 0.7 \%$

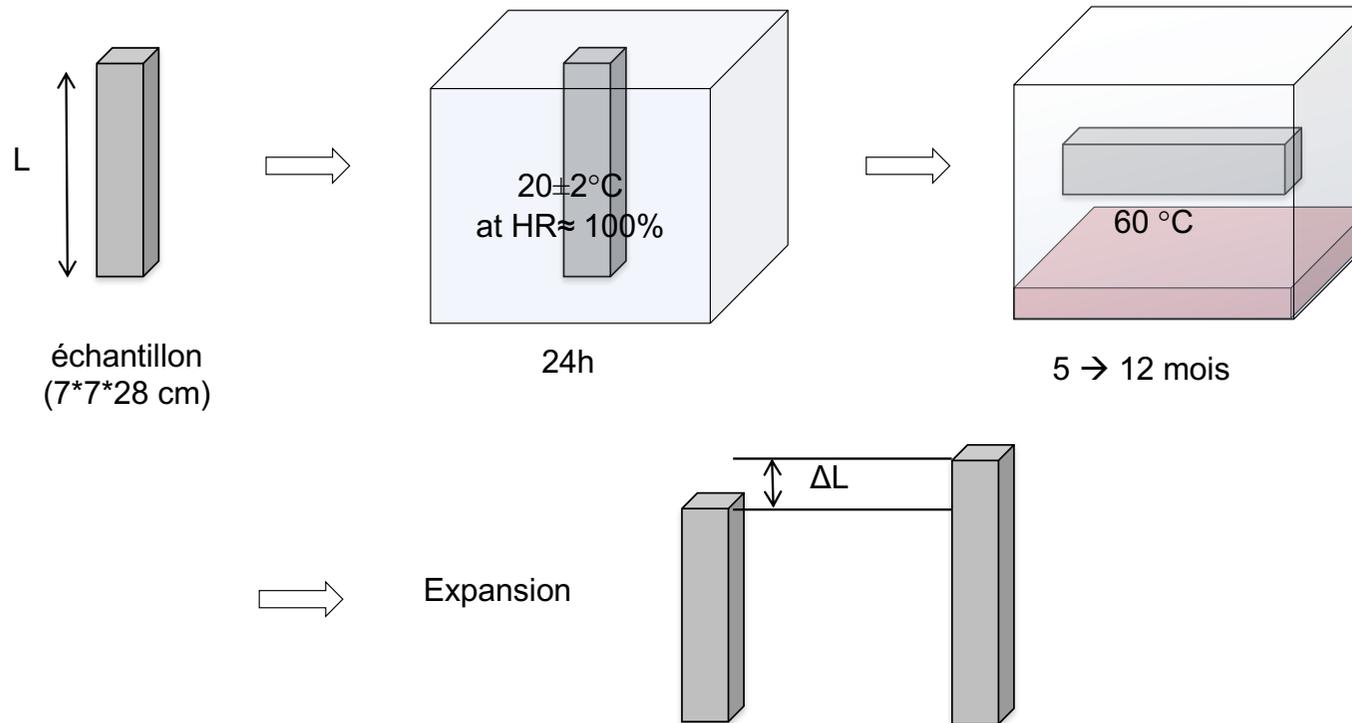
**MAIS: il y a évidence maintenant que  
cette approche n'est pas fiable**

# Debate on tests



## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.3. essais en laboratoire



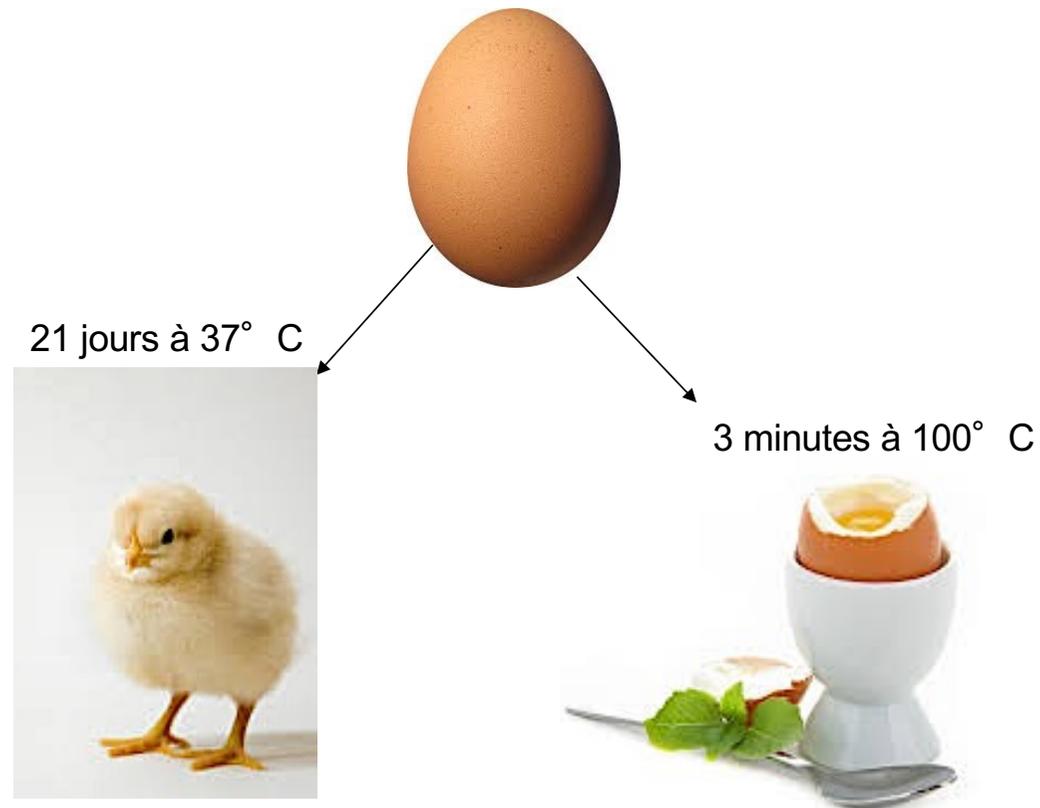
Autres essais: p. ex. essai microbar pour évaluation de la réactivité des granulats  
Prismes 1x1x6 cm dans solution KOH à  $150^\circ\text{C}$

## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.3. essais en laboratoire

La RAG progresse sur plusieurs années (décennies)

Il est difficile de reproduire exactement les mêmes conditions en laboratoire sur seulement quelques mois!



## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état

### Exemple 1:

-Socle de téléphérique: signes de RAG (début des symptômes)

→ Pose d'un enduit étanche pour éviter les arrivées d'eau (tentative de modification de l'exposition)

5 ans seulement après l'application de l'enduit :



## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état

Exemple 2:

Barrage

## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état

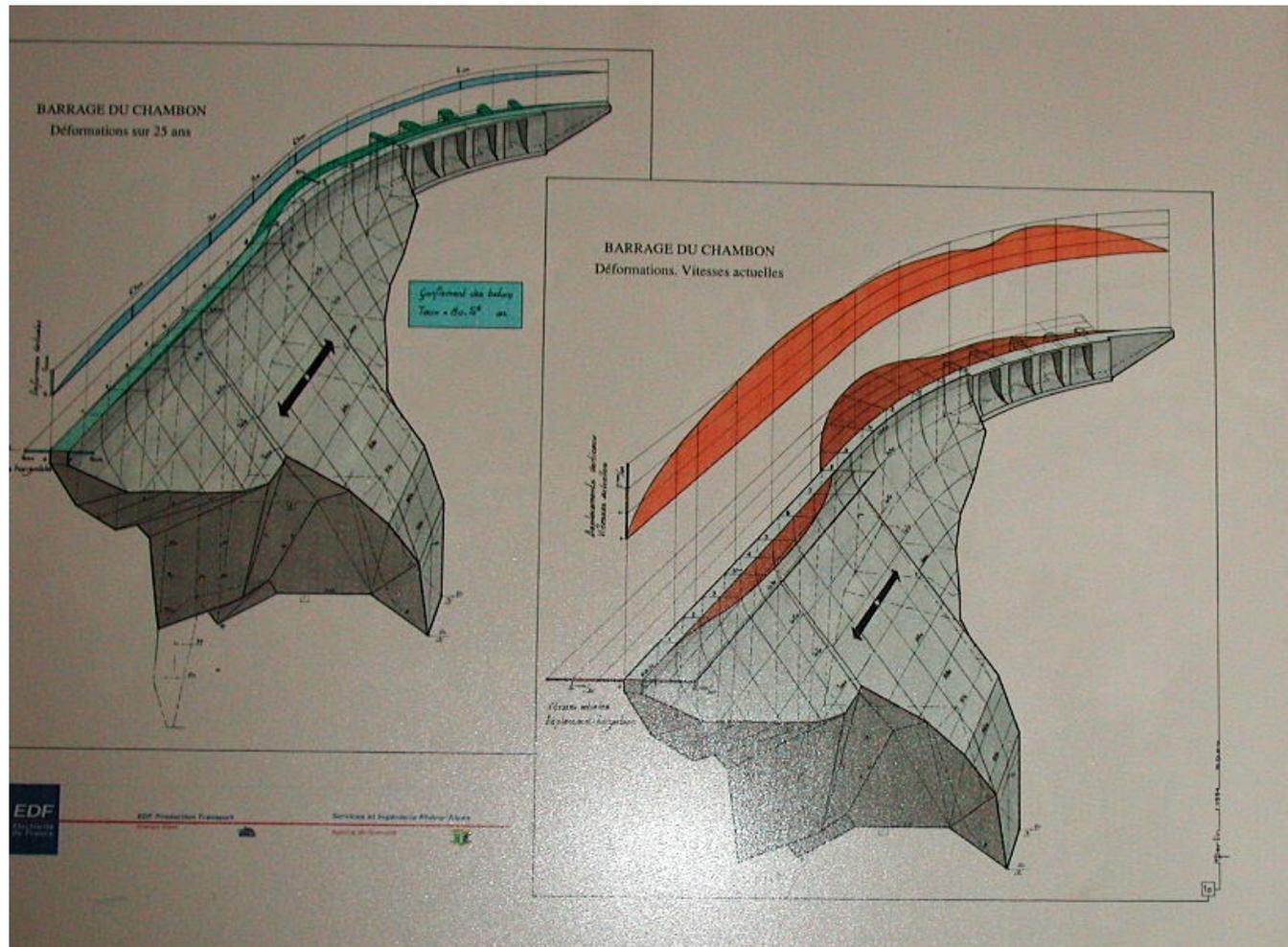
Dans les barrages, l'expansion peut engendrer des problèmes structuraux avant la fissuration ou la perte de performance mécanique :

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

## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état

Barrage de Chambon, France



## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

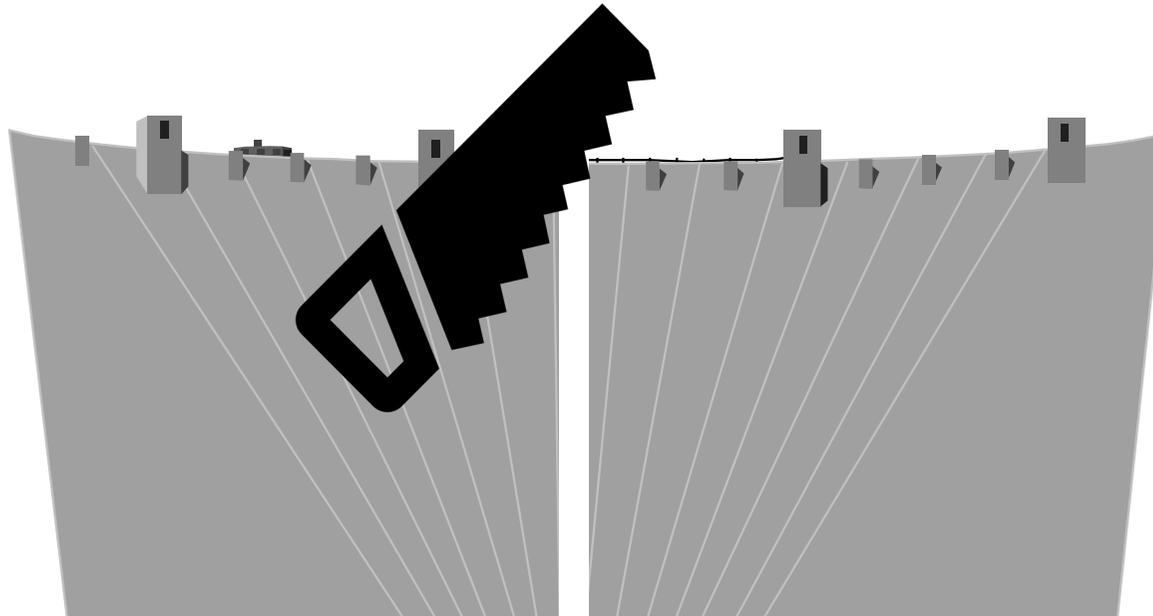
### 6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état

Barrage de Chambon, France



## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état



- Découpe au diamant
- **But** : relâcher les contraintes engendrées par l'expansion du béton (élément confiné)

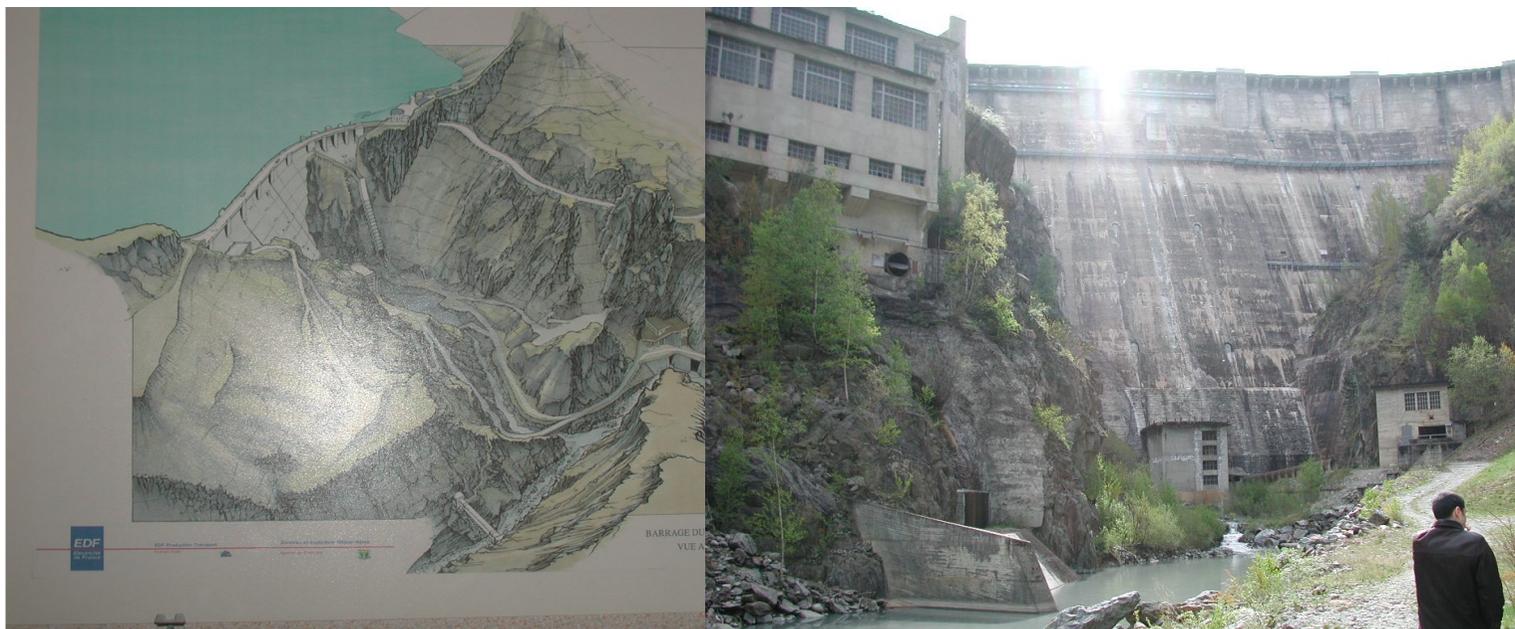
# 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état



## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état



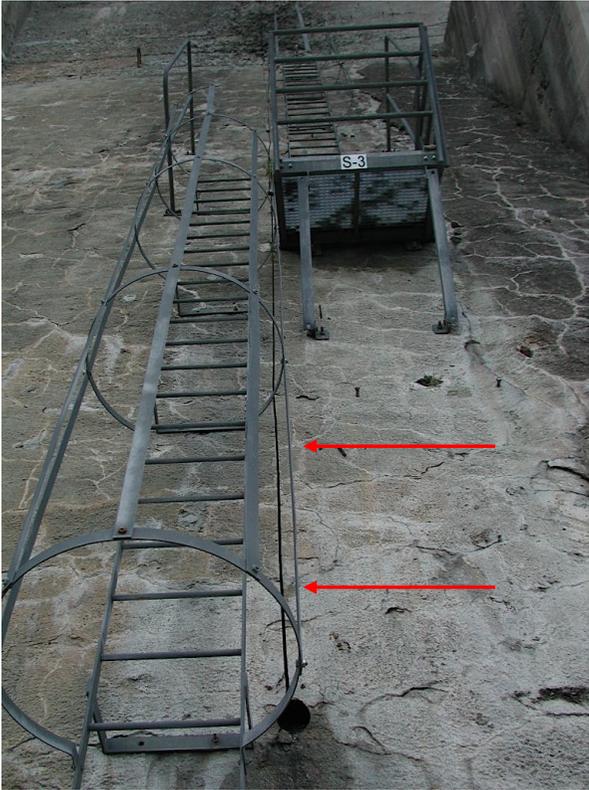
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état



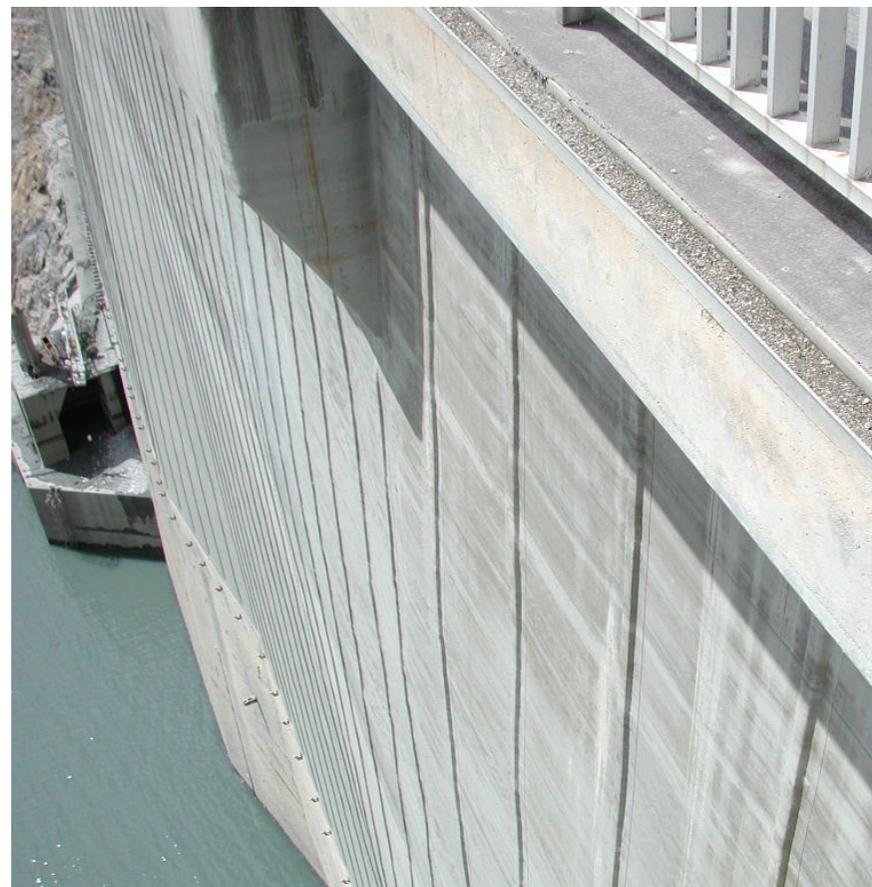
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état

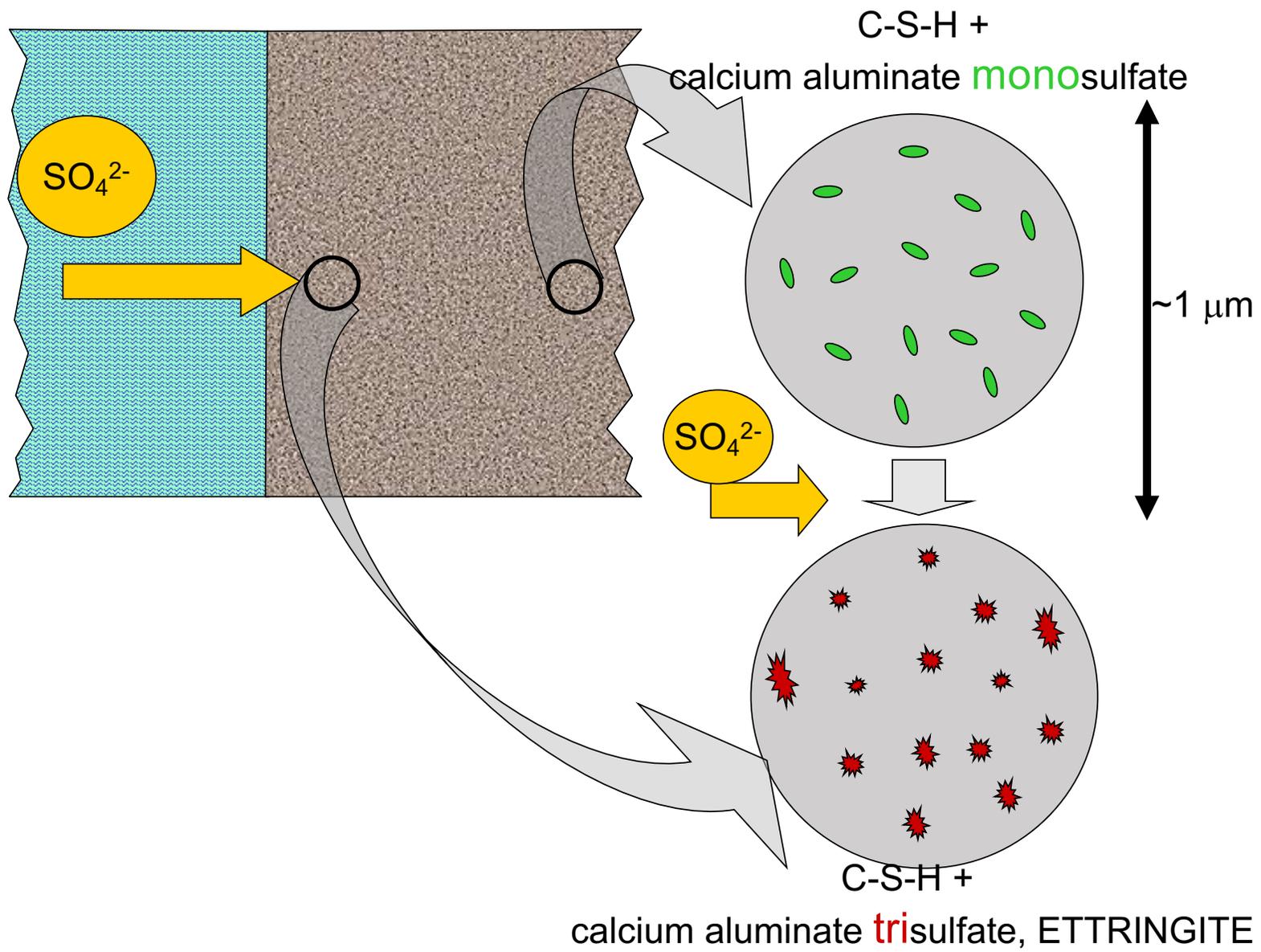


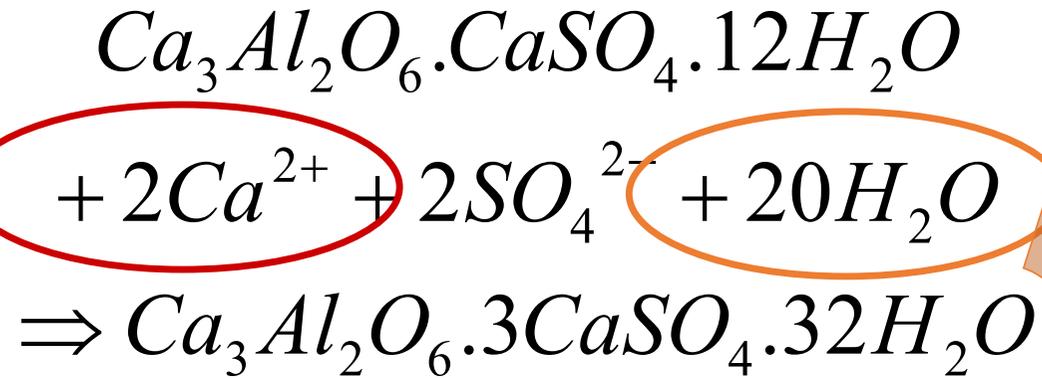
## 6. Réaction Alkali Granulat (RAG)

### 6.4. cas de RAG sur ouvrage : diagnostic et remise en état



Attaque sulfatique  
+





Augmentation du volume  
 $\Rightarrow$  gonflement

Retrait 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  $C_3A$

## 8. L'essentiel – qq questions

- Quels paramètres influencent la durabilité d'un béton?
- Quels sont les 4 principaux phénomènes de dégradation d'un béton?  
Expliquez les mécanismes de dégradation
- De manière générale, comment augmenter la durabilité d'un ouvrage?
- Pourquoi les armatures ne corrodent-elles pas dans un béton sain?
- Pourquoi un béton carbonaté jusqu'à l'armature n'engendre pas nécessairement une corrosion des armatures?
- Quel type de corrosion les ions chlorures engendrent-ils? Pourquoi?
- Expliquez le phénomène de dégradation par gel-dégel dans un béton
- Quels facteurs doivent être réunis pour initier une réaction alcali-granulats?