



# La durabilité du béton

Matériaux GC BA2

**iTEC**

Institute of Construction and  
Environmental Technologies

Dr Julien Ston, ing. Sc. Mat. Dipl. EPFL

# 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 Alcali 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



Effondrement du pont Morandi, Gênes – Le Monde



Effondrement du pont Morandi, Gênes – Le Point

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

→ **Manque de durabilité**

### La durabilité

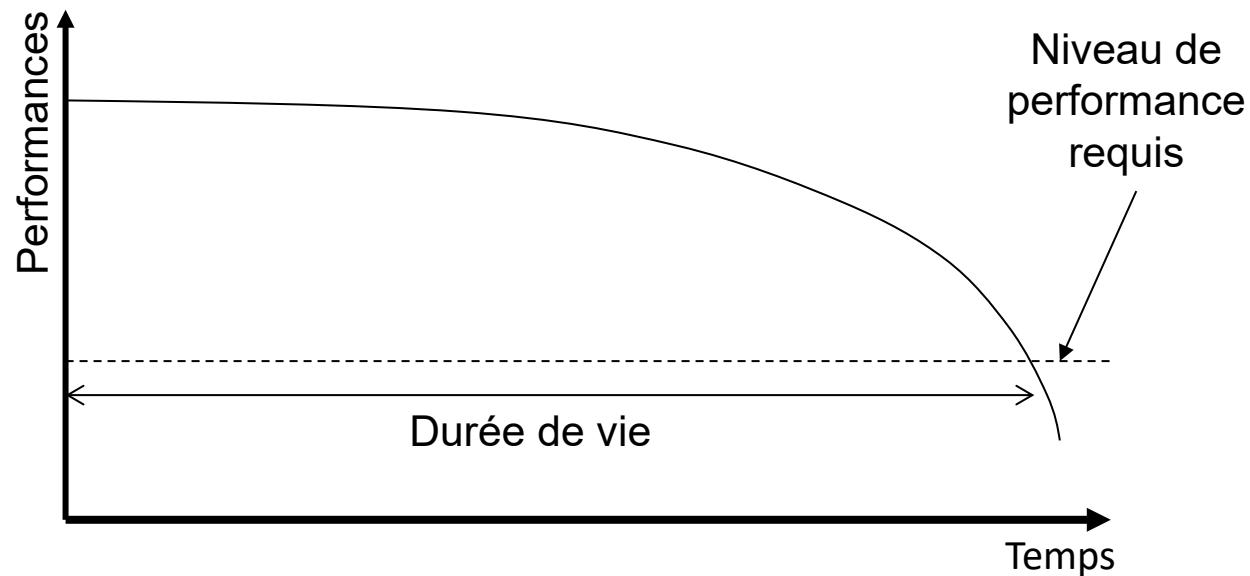
Définit la durée d'utilisation d'une structure.

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 structures 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.

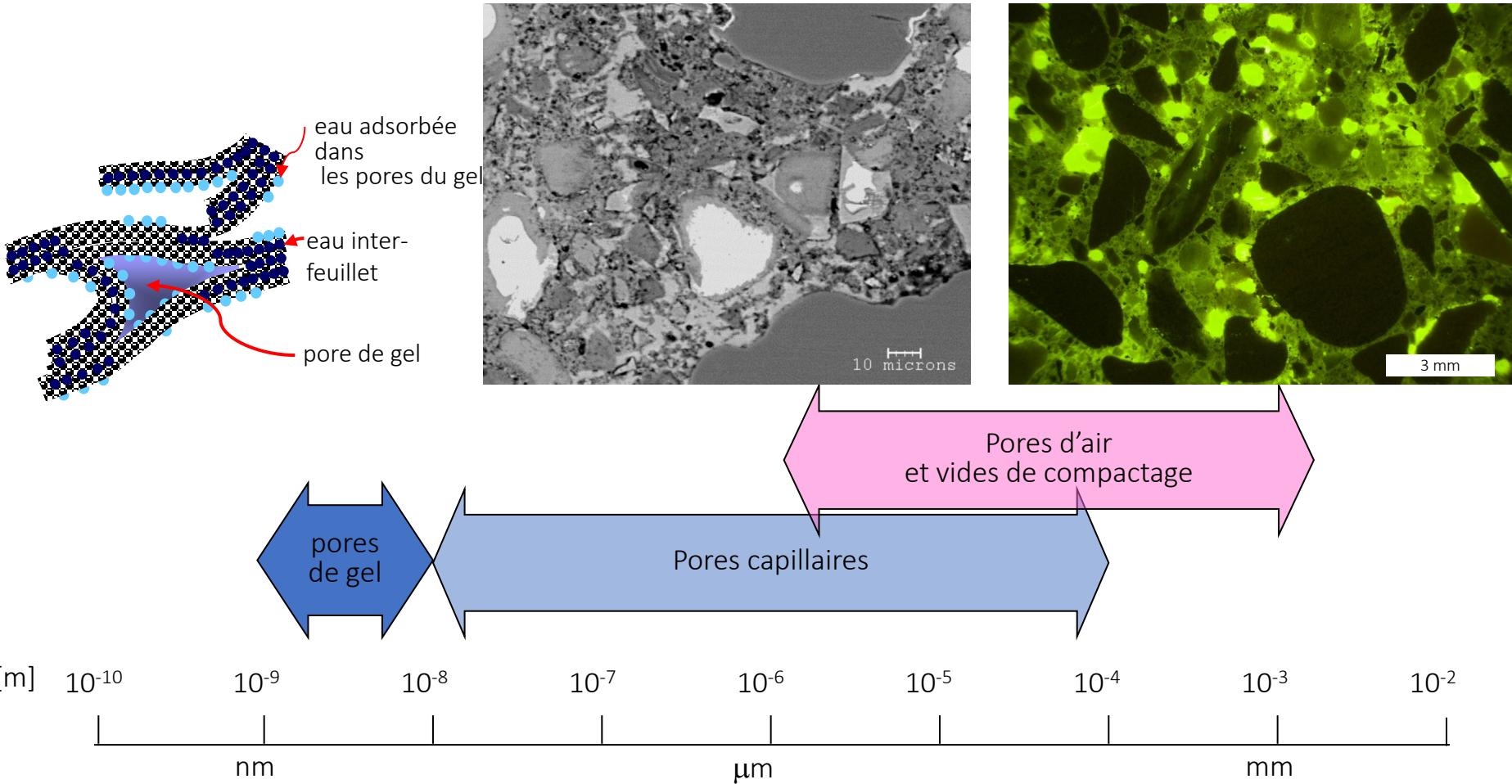
En Suisse l'OFROU dispose d'un fonds annuel de 3 milliards de CHF pour les projets routiers, dont 1.2 milliard CHF pour l'entretien des routes nationales. Le réseau routier « vaut » 140 milliards de CHF.



# 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



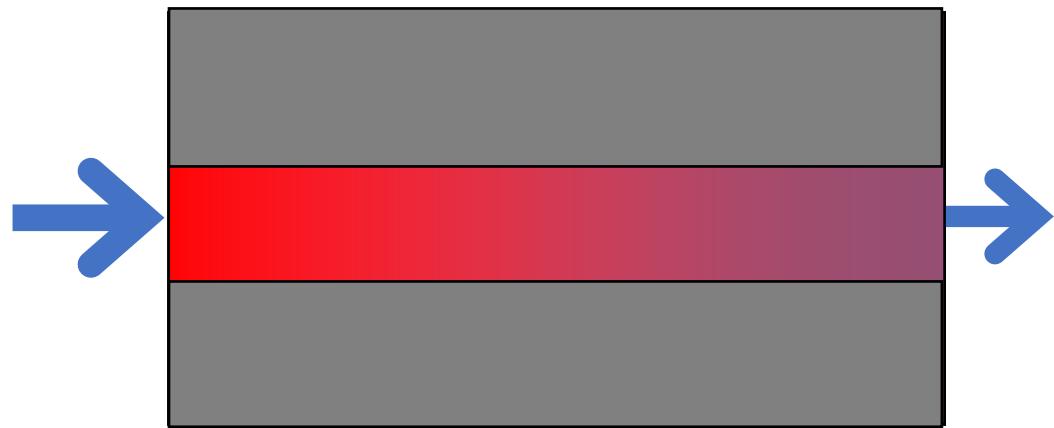
**Porosité basse**

Résistance au flux élevée

# 1. Introduction

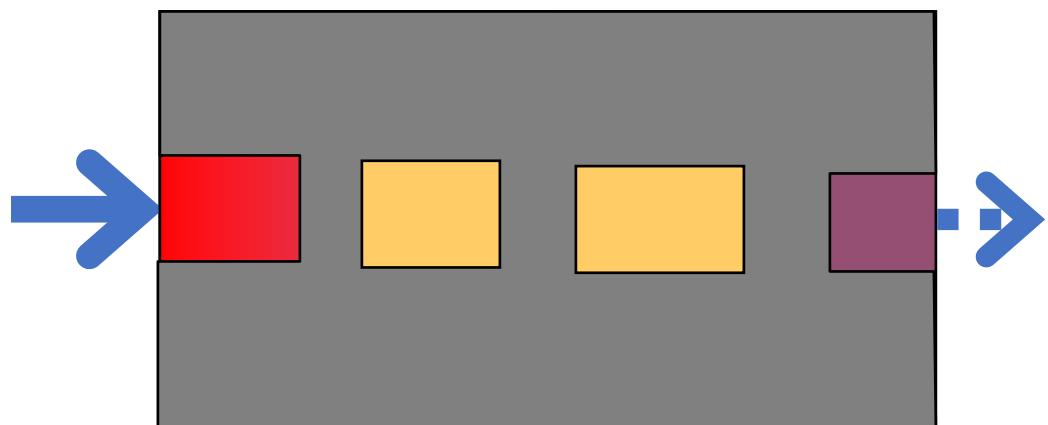
## 1.2. Phénomènes de diffusion

### 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

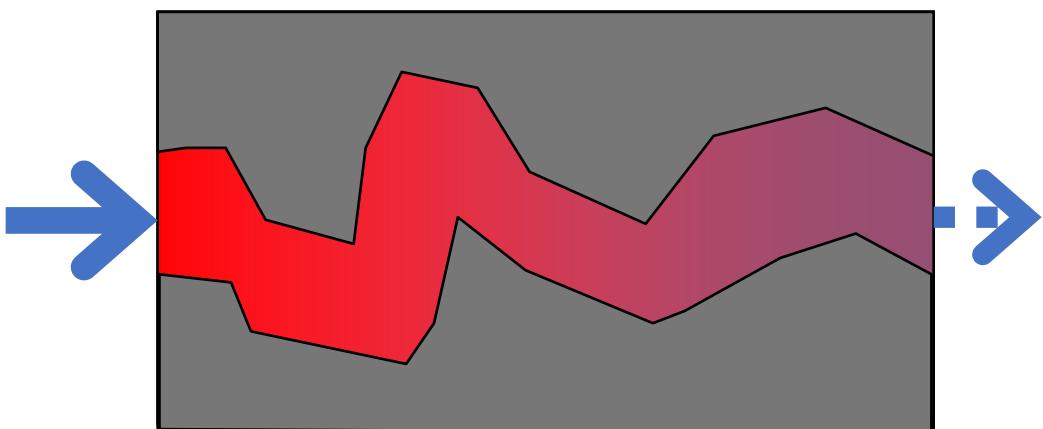
## 1.2. Phénomènes de diffusion

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 modifier la pâte de ciment

### En améliorant 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.)

### En réduisant la quantité de pâte de ciment :

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

### En améliorant la mise en place du béton :

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

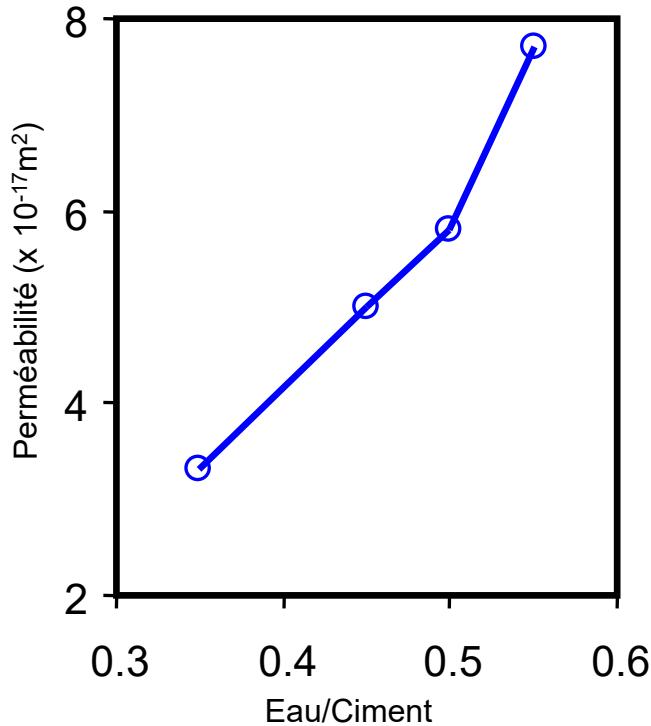
# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

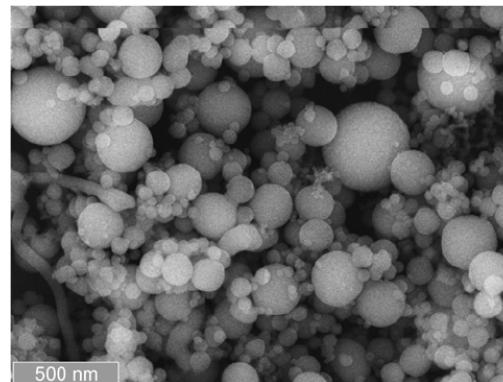
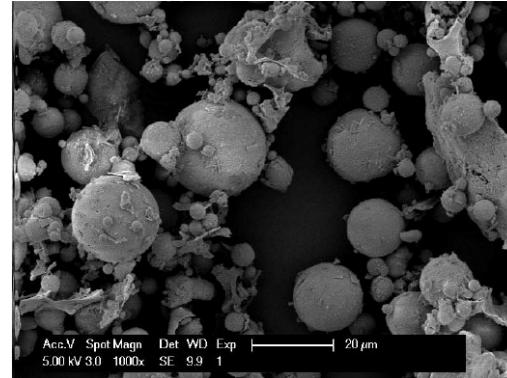
### En améliorant la qualité de la pâte de ciment :

- 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:



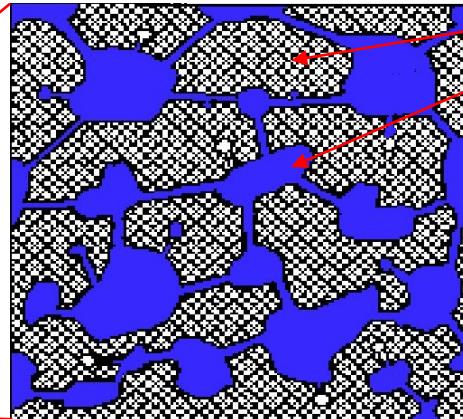
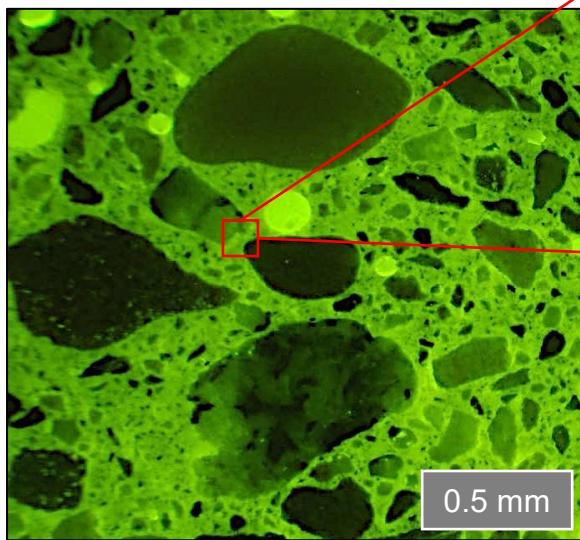
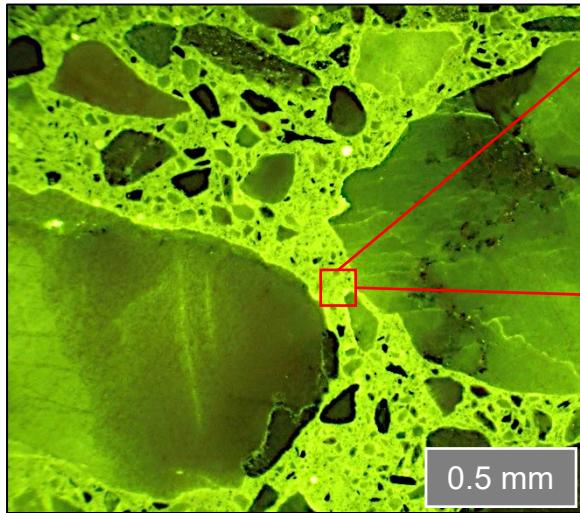
Effet des additions minérales:



# 1. Introduction

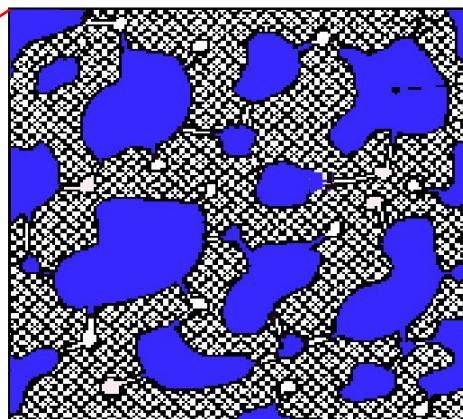
## 1.2. Phénomènes de diffusion

### Effet du rapport e/c



Structure C-S-H  
Porosité capillaire

- porosité capillaire  
élevée



- porosité capillaire  
basse

# 1. Introduction

## 1.2. Phénomènes de diffusion

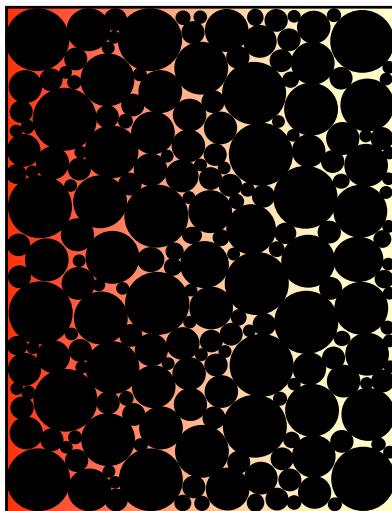
### En réduisant la quantité de pâte de ciment :

- Diminuer le rapport eau / ciment
- Améliorer la composition granulométrique (cf. cours mise en œuvre)



• Bonne granulométrie

faible perméabilité

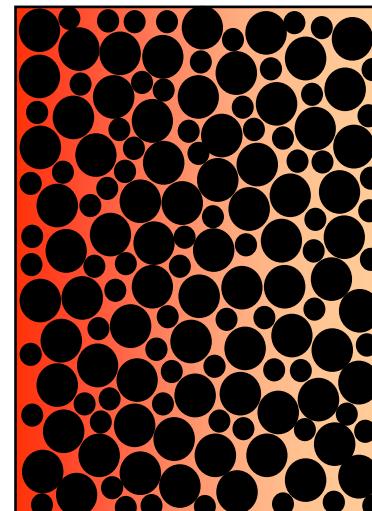


← même e/c →



Mauvaise granulométrie

perméabilité élevée



# 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

Les oxydes de fer sont thermodynamiquement plus stables que le métal

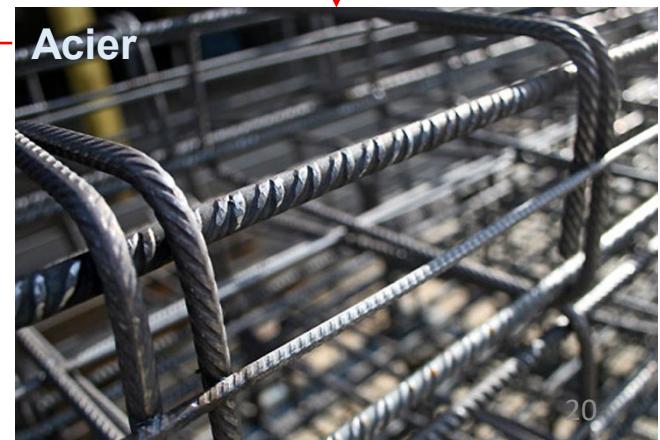
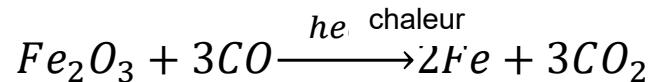
minéral de fer (Hématite)  $Fe_2O_3$



haut fourneau



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



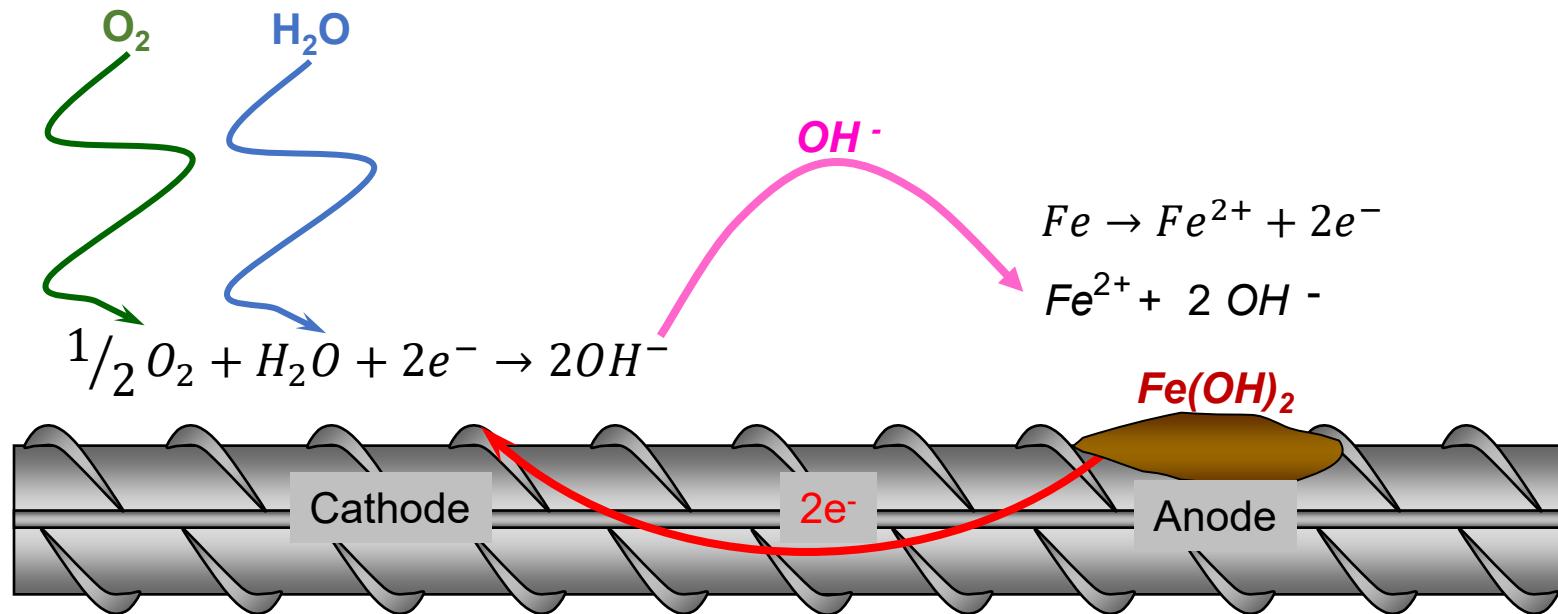
Problèmes liés au processus d'oxydation des armatures dans le béton :

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

## 2. La corrosion des aciers

### 2.1. Mécanisme de corrosion des aciers

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



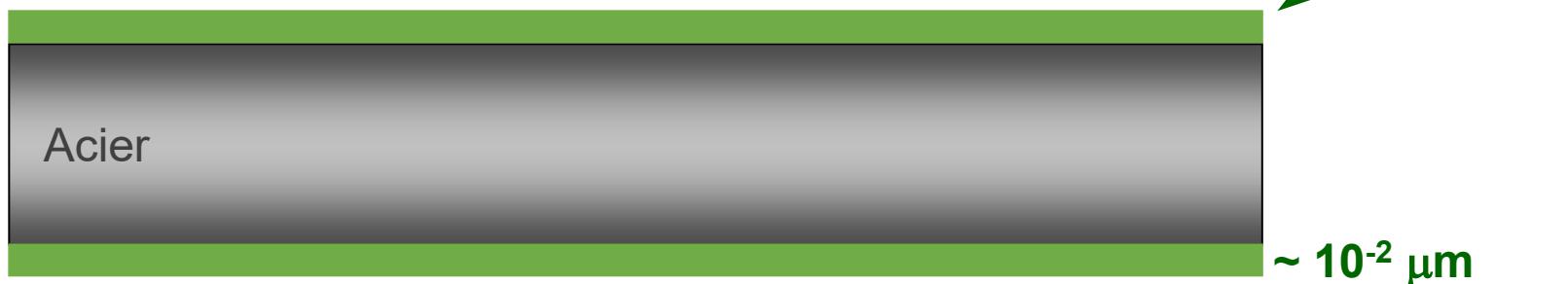
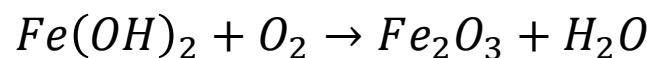
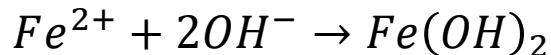
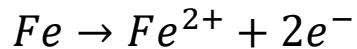
Pourquoi tous les aciers ne sont pas corrodés dans le béton?

## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures

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 alcalin 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.

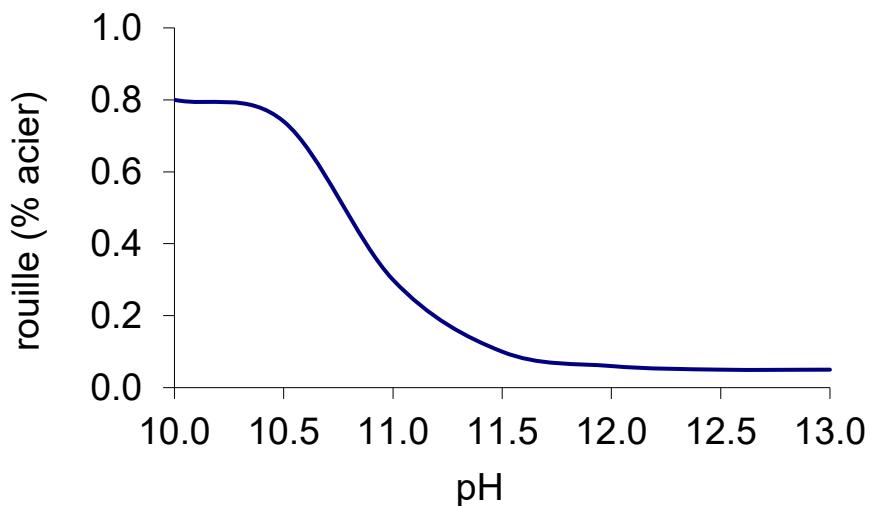
**Pour que la couche passive reste efficace, elle doit former une couche dense, continue, uniforme, très adhérente sur la surface de l'acier**

**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

Effet 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>

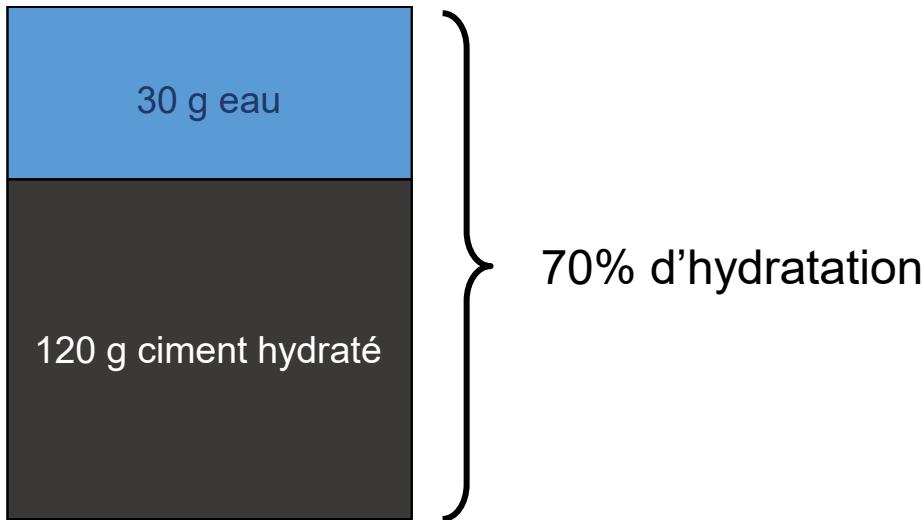
## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures



## 2. La corrosion des aciers

### 2.2. La passivation des armatures



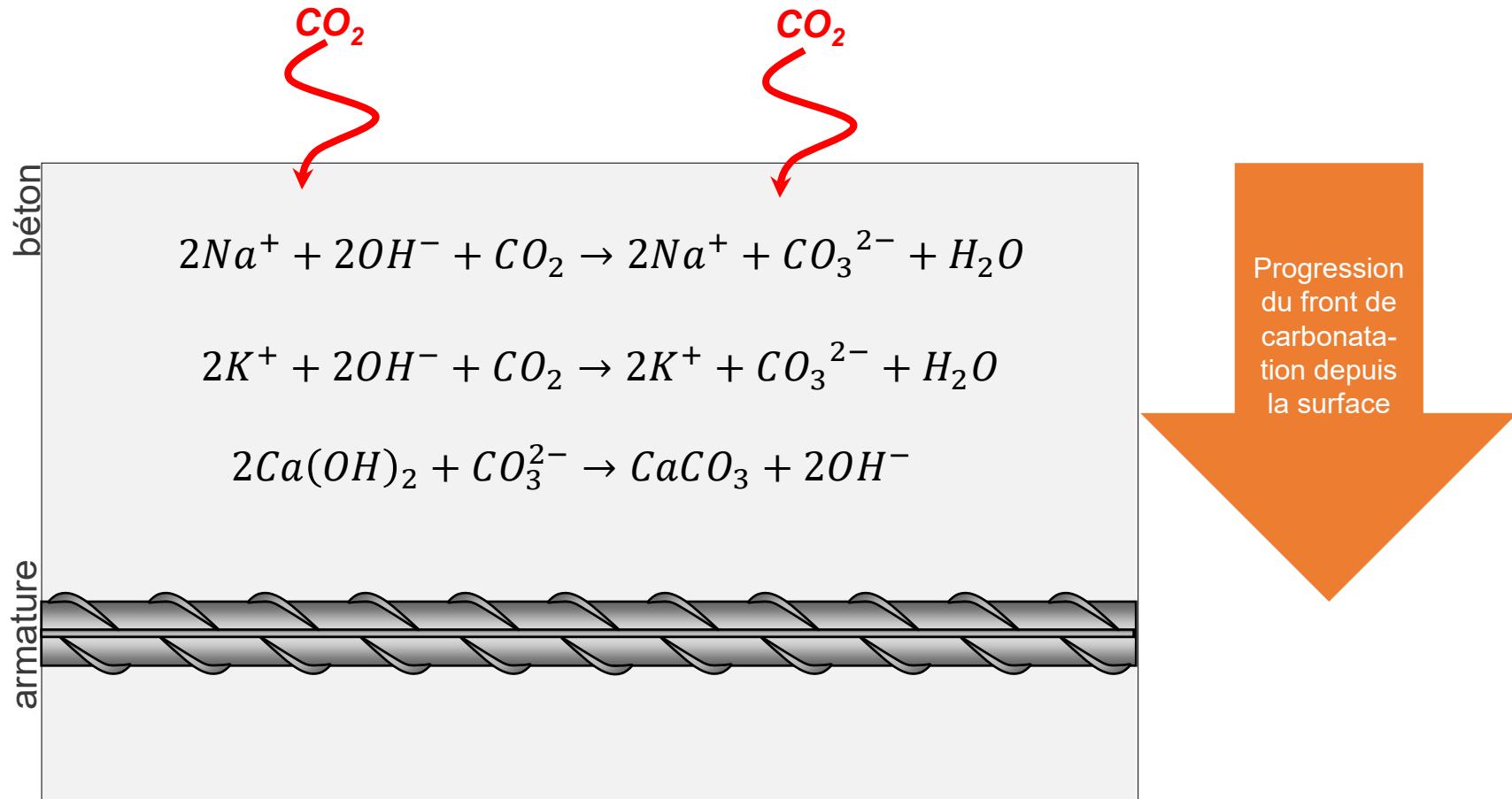
En admettant que 70% des alcalins sont dissous

- 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

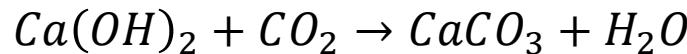
$0.36 + 0.11 = 0.47$  mol  $OH^-$  par litre d'eau associée avec les alcalis;  
ce qui correspond à  $pH = 14 + \log [0.47] = 13.67$

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

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



Réaction globale :



Remarque: d'autres hydrates (C-S-H) carbonatent aussi <sup>28</sup>

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

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

Le béton **carbonaté** a un pH < 9.0

Indicateur pH : **Thymolphthaleine**

est un moyen pratique pour mesurer la profondeur de carbonatation lorsqu'elle change de magenta à transparent :



pH > 9.3-10.5 (bleu)

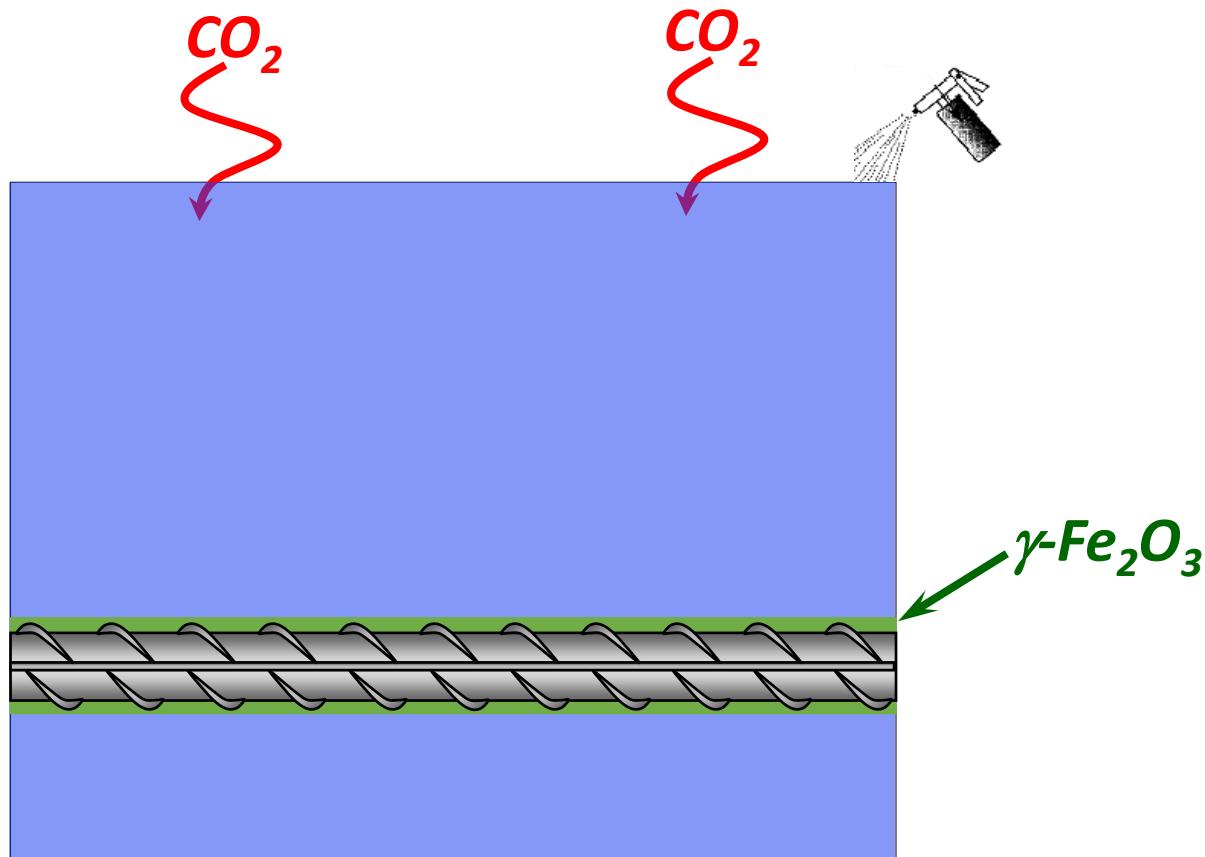


pH < 9.3 (transparent)



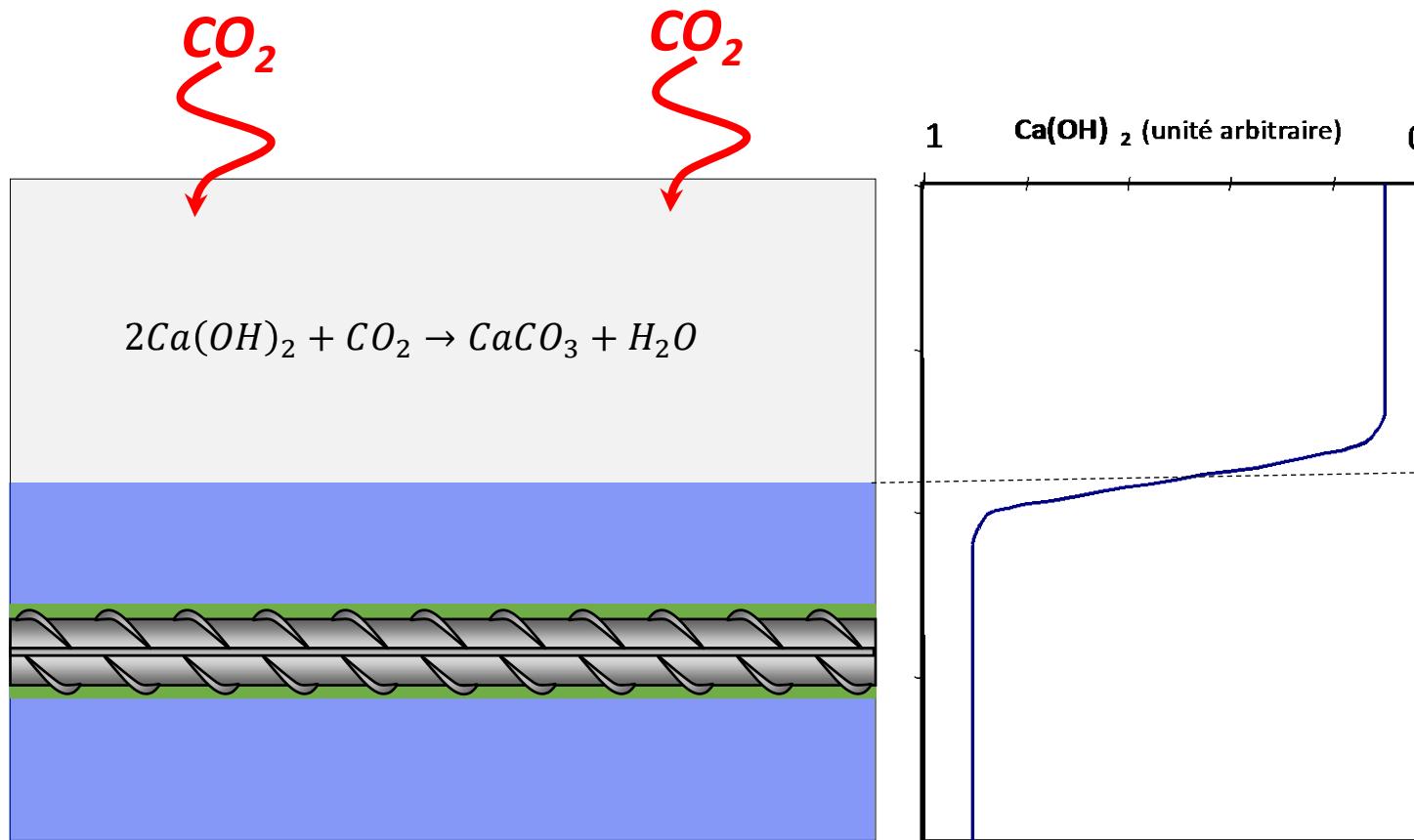
### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

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



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

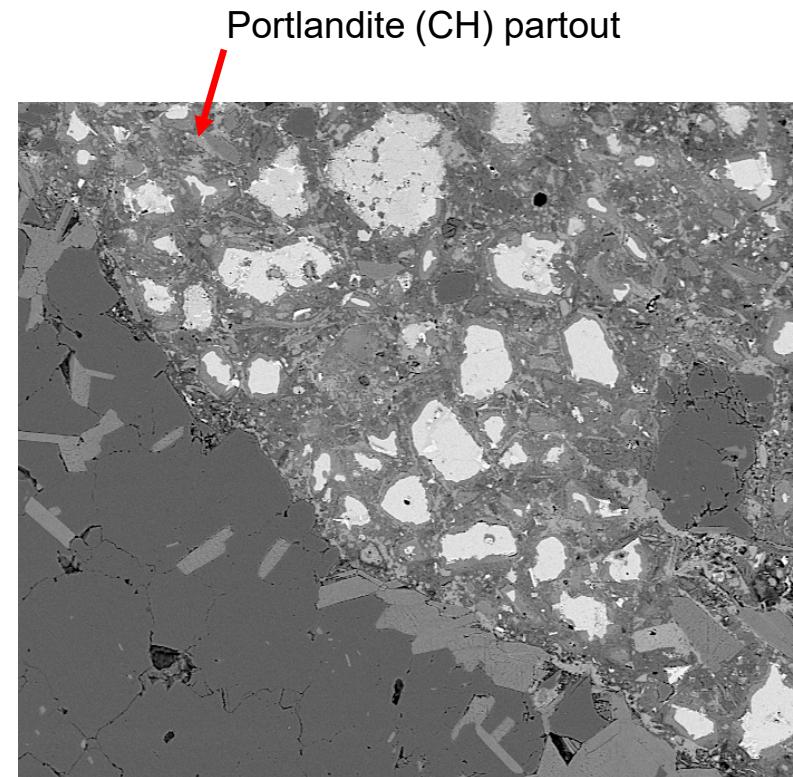
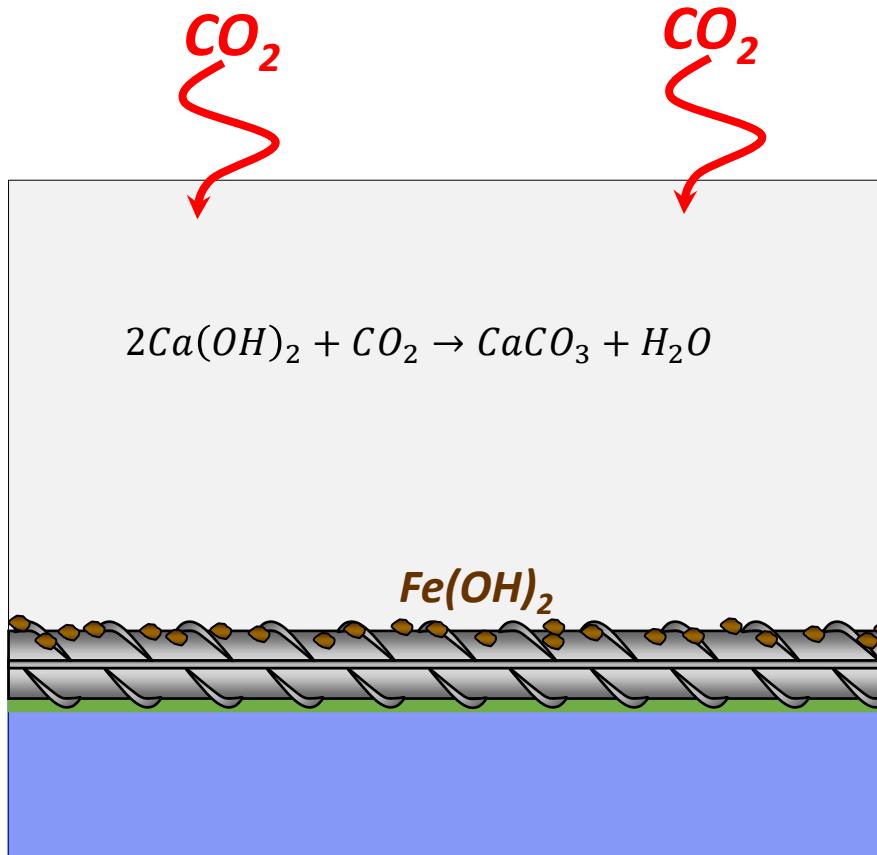
#### 3.1. la carbonatation du béton et la corrosion des armatures



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

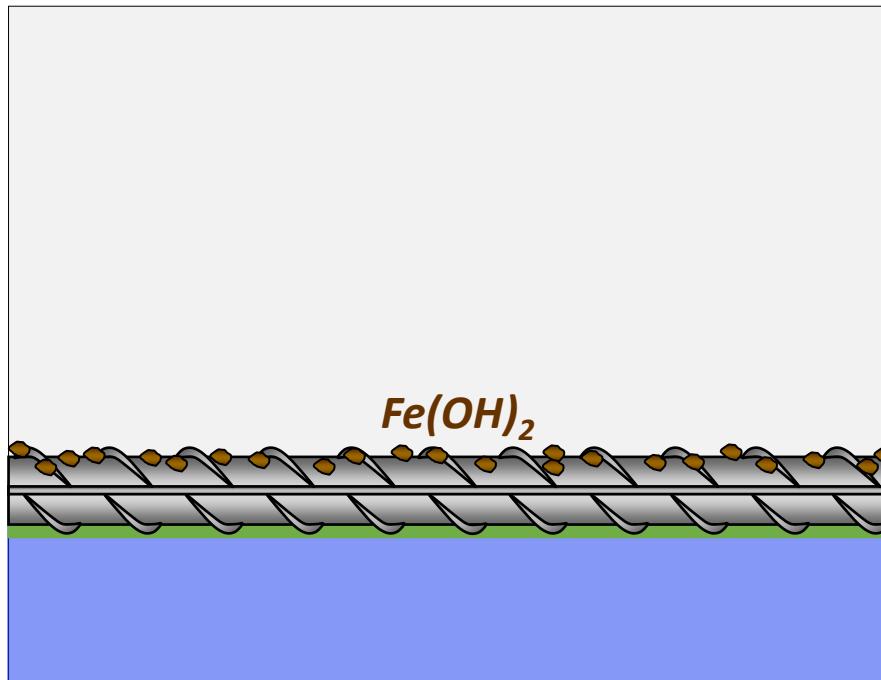
### 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

#### 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

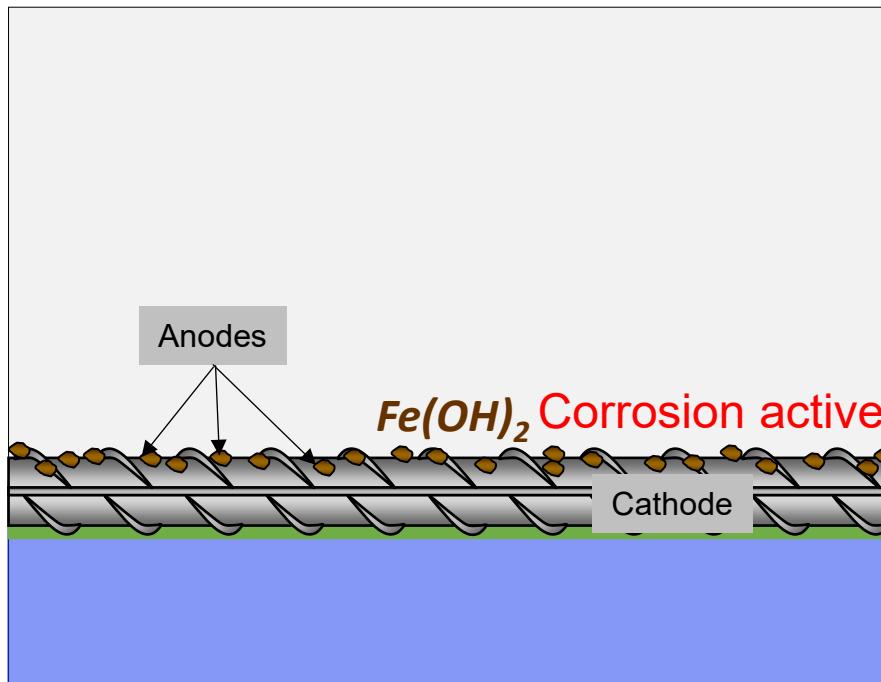


Lorsque le front de carbonatation arrive au **niveau de l'armature**, la **couche de passivation est détruite** par un manque d'alcalinité

→ 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 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 par carbonatation 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

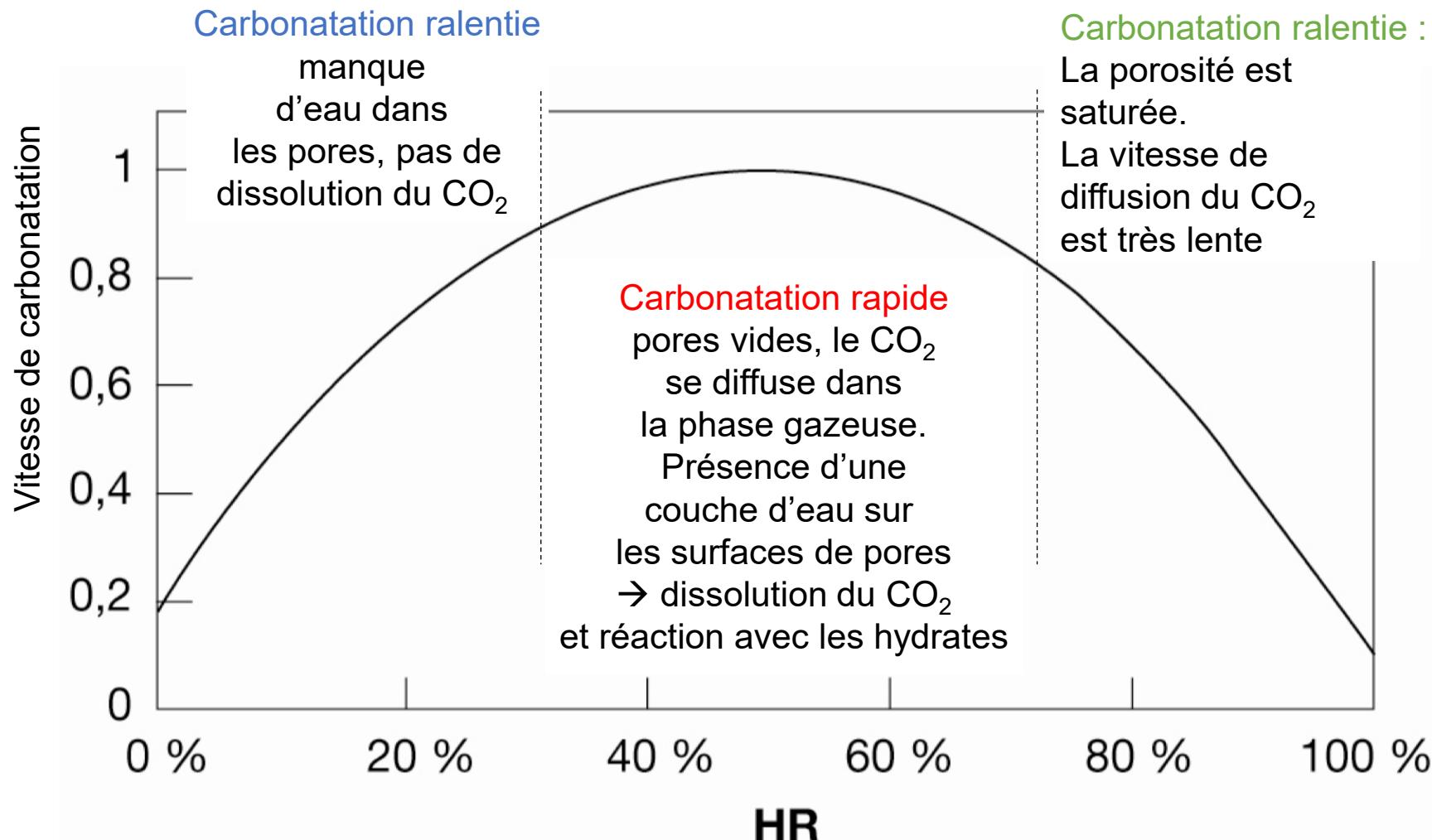
##### 2. La conception de l'élément

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

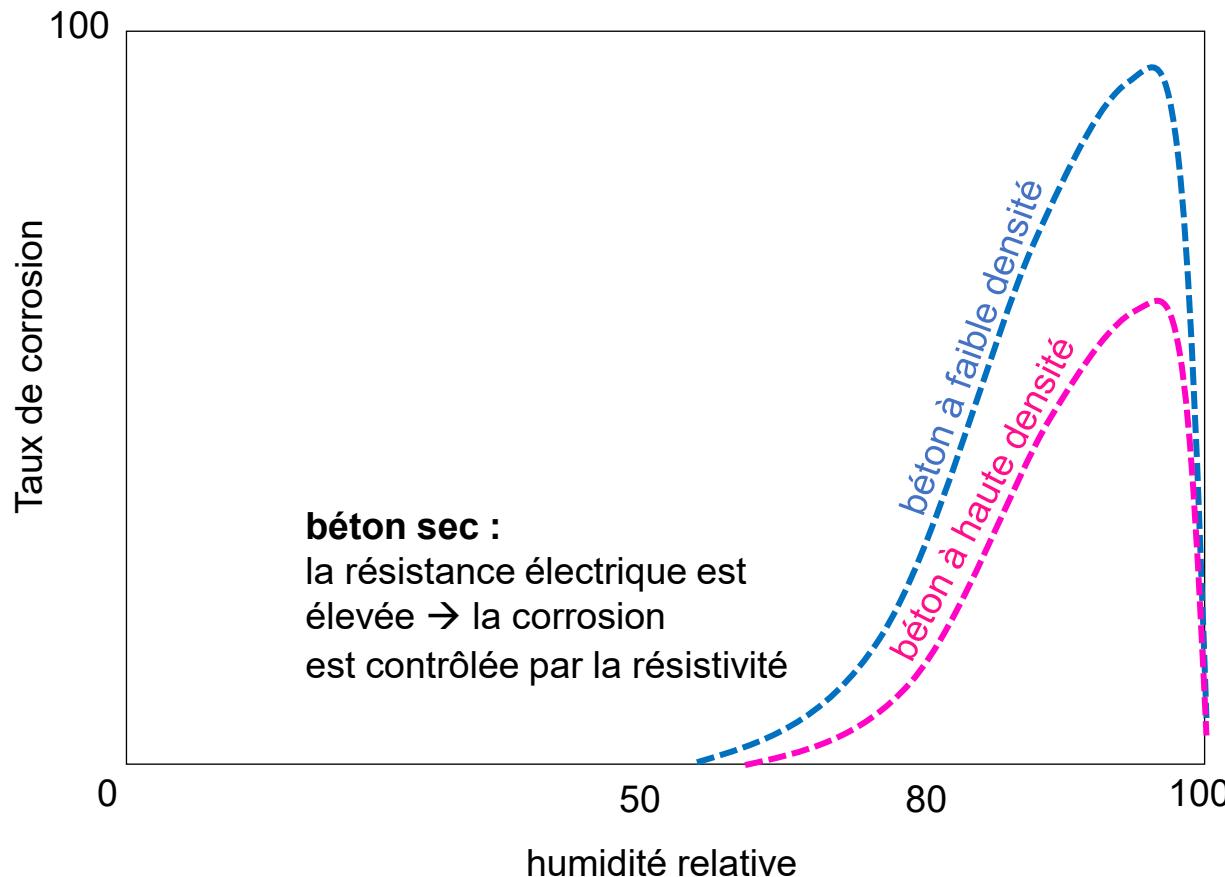


L'humidité relative joue un rôle important dans la vitesse de carbonatation d'un béton

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

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

Vitesse de corrosion des armature dans un béton carbonaté (dépassivé)



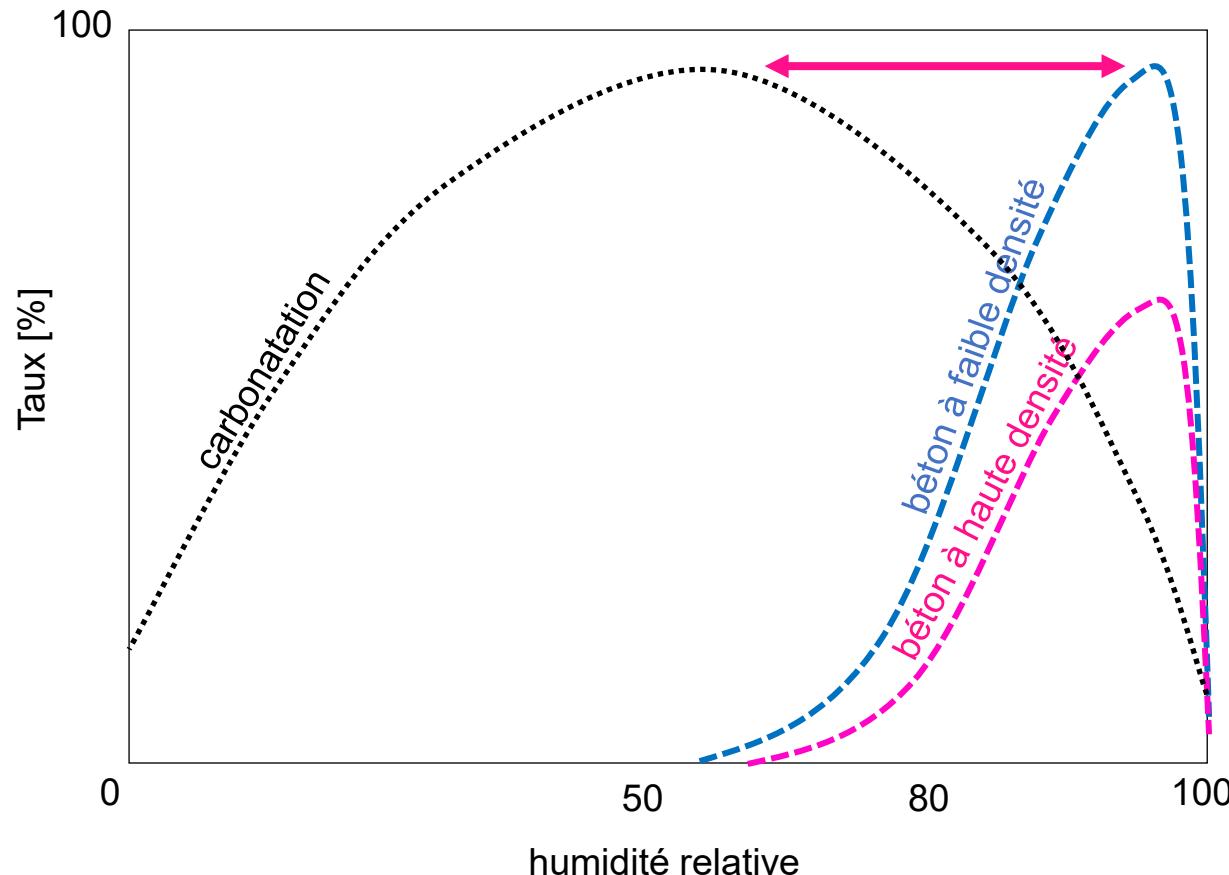
**Béton humide :**  
la diffusion d'oxygène  
est basse (les pores sont  
remplis d'eau)

→ la corrosion  
est contrôlée par la  
diffusion

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

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

Vitesse de corrosion des armature dans un béton carbonaté (dépassivé)



Les alternances sec humides fréquentes sont les conditions les plus extrêmes pour la progression de la corrosion par carbonatation

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

### 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



### 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 ambients 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

#### 3.4. Essais en laboratoire

Les bétons mis en place dans un environnement pouvant contenir du CO<sub>2</sub> ambiant doivent respecter les exigences de la norme **SIA 262/1:2013 – Annexe I**

#### Principe

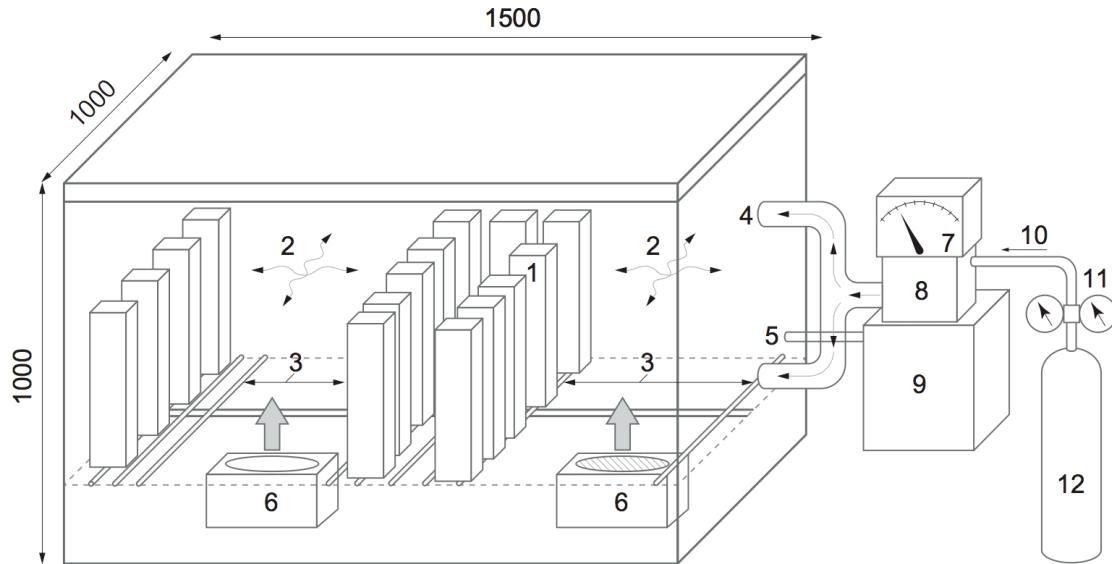
La carbonatation d'un béton est accélérée dans une chambre avec une teneur en CO<sub>2</sub> dans l'air augmentée. La résistance à la carbonatation est déterminée sur la base des profondeurs de carbonatation mesurées à différents instants sur les éprouvettes.

Des prismes (essai normatif dans le cadre du contrôle de conformité) ou des carottes prélevées sur des nouvelles ou anciennes structures en béton (assurance qualité, relevé d'état) sont utilisés. Les carottes ne doivent pas contenir des segments de barre d'armature et doivent être sans fissures d'ouverture > 0,05 mm.

# 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

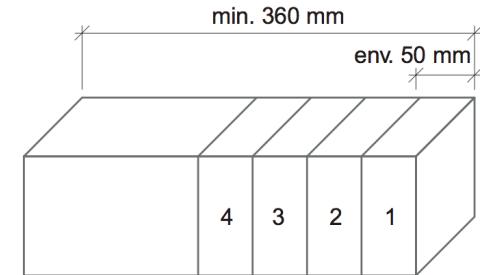
## 3.4. Essais en laboratoire

Figure 4: Exemple d'un montage d'une enceinte de carbonatation accélérée avec stockage vertical des éprouvettes selon FprCEN/TS 12390-12:2010 (schématique)



- |   |                           |    |                               |
|---|---------------------------|----|-------------------------------|
| 1 | Éprouvettes               | 7  | Contrôleur de CO <sub>2</sub> |
| 2 | Écoulement turbulent      | 8  | Boîte de commande             |
| 3 | Plateforme en bois        | 9  | Déshumidificateur             |
| 4 | Entrée de CO <sub>2</sub> | 10 | Alimentation en gaz           |
| 5 | Entrée vapeur             | 11 | Régulateur                    |
| 6 | Ventilateur               | 12 | Bouteille de CO <sub>2</sub>  |

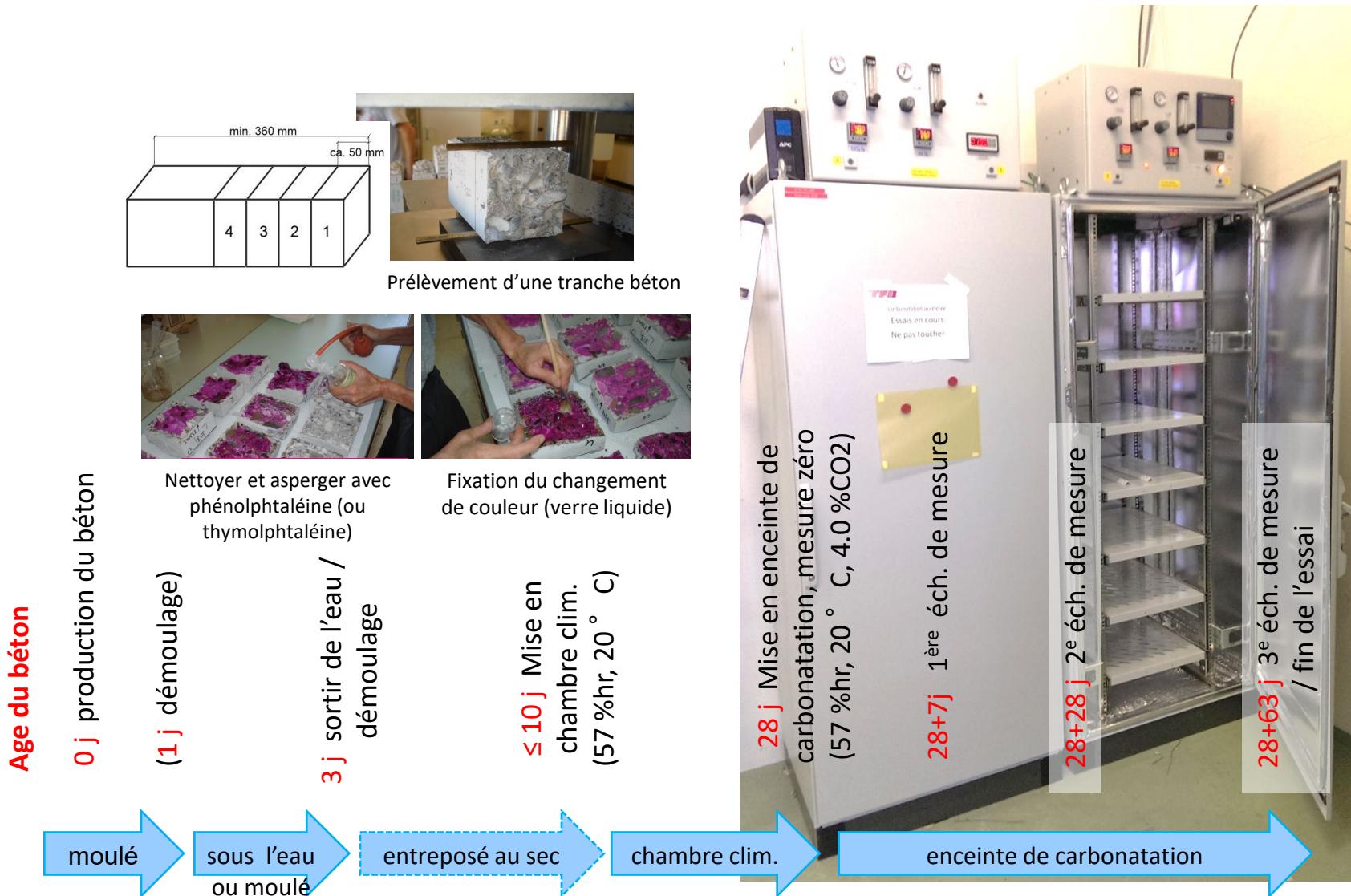
Figure 5: Prélèvement des tranches par fendage



28 jours après production - échéances à 0, 7, 28, 63 jours

# 3. Corrosion des armatures par carbonatation du béton

## 3.4. Essais en laboratoire



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

#### 3.4. Essais en laboratoire



### 3. Corrosion des armatures

#### 3.4. 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

Essai selon Norme SIA 262/1	Annexe A	Perméabilité à l'eau	Résistance à la carbonatation	Résistance aux chlorures	Résistance au gel/dégel en présence de sels de déverglaçage	
					moyenne	élevée
Essai à réaliser pour les classes d'exposition	XC3 <sup>1)</sup>	XC3, XC4, XD1, XD2a, XF1	Annexe I	Annexe B	Annexe C	
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	$q_w \leq 10 \text{ g/m}^2\text{h}$	$K_N \leq 5.0 \text{ mm/y}^{1/2}$ 2,3,4)	$D_{Cl} \leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$m \leq 1'200 \text{ g/m}^2$	$m \leq 200$ ou $m \leq 600 \text{ g/m}^2$ et $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$	
Valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible	$q_w \leq 12 \text{ g/m}^2\text{h}$	$K_N \leq 5.5 \text{ mm/y}^{1/2}$ 3,4)	$D_{Cl} \leq 13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$m \leq 1'800 \text{ g/m}^2$	$m \leq 250$ ou $m \leq 800 \text{ g/m}^2$ et $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$	
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:  $K_N \leq 4.0 \text{ mm/y}^{1/2}$  (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:  $K_N \leq 4.5 \text{ mm/y}^{1/2}$  (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.

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

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



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

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

Exemple:

Parapets de balcons préfabriqués

→ Éclatements du béton d'enrobage



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

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

Exemple:

Mesure de la profondeur de carbonatation in-situ (faces et couronnements)



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

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

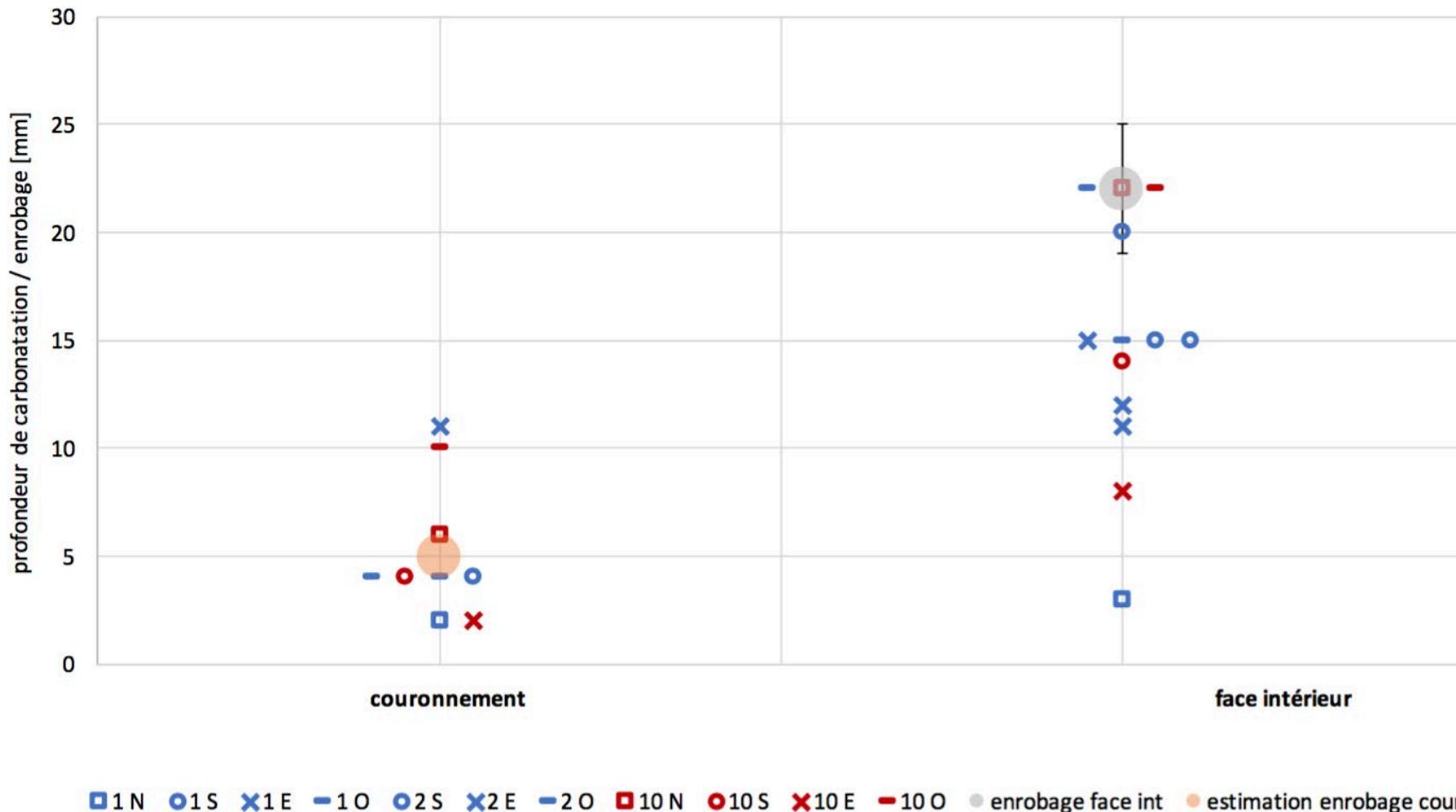


Figure 1 : Mesures de carbonatation sur les parapets (points rouges et bleus) et d'enrobage moyen (points gris et orange)

# 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

**Par exemple :** salines de Bex

- 50% de sa production est dédiée au salage hivernal



**Sel marins**  
(ports, ponts côtiers, plateformes pétrolières, digues etc.)

Experts-cebtpi.org

#### 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 (CaCl<sub>2</sub>)**
- **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

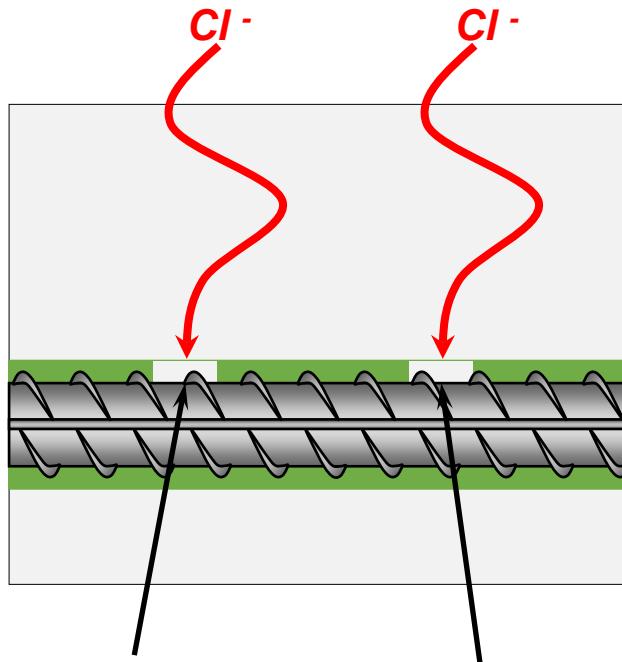
# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

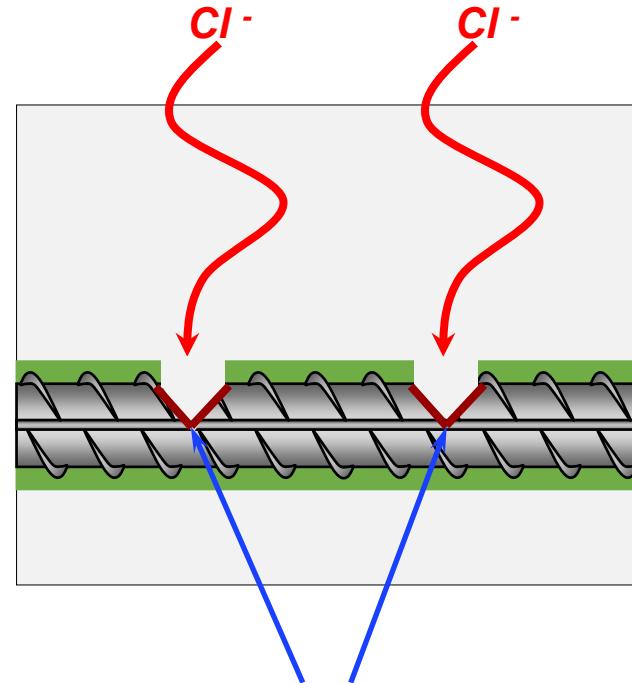
Les ions  $\text{Cl}^-$  sont rarement distribués de manière homogène à la surface de l'acier

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  $\text{Cl}^-$



Corrosion par piqûres

## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

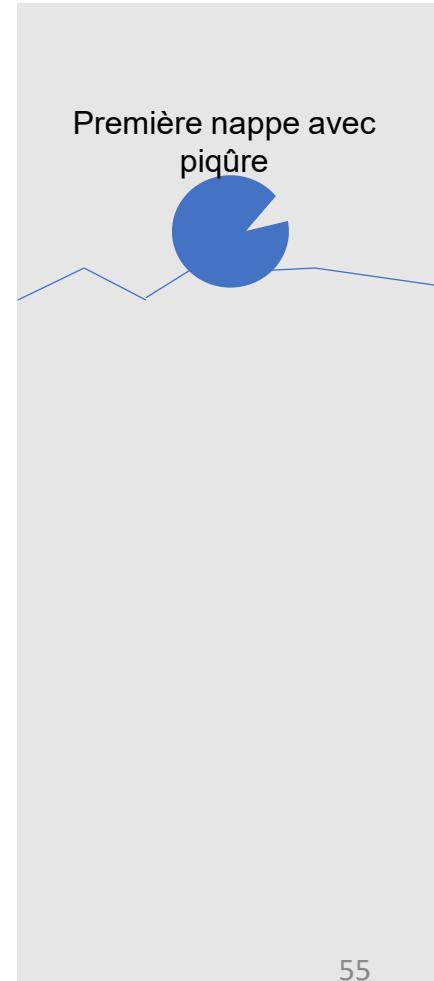
### 4.1. la pénétration des chlorures dans le béton et la corrosion des armatures

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



Surface de dalle avec pénétration des chlorures

Première nappe avec piqûre



## 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

#### 3. Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine

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 dé verglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit :

NOTE A propos des conditions d'humidité, voir aussi la section 2 de ce tableau.

XD1	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne
XD2	Humide, rarement sec	Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	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

## 4.4. Essais en laboratoire

Les bétons mis en place dans un environnement pouvant contenir des chlorures doivent respecter les exigences de la norme **SIA 262/1:2013 – Annexe B**

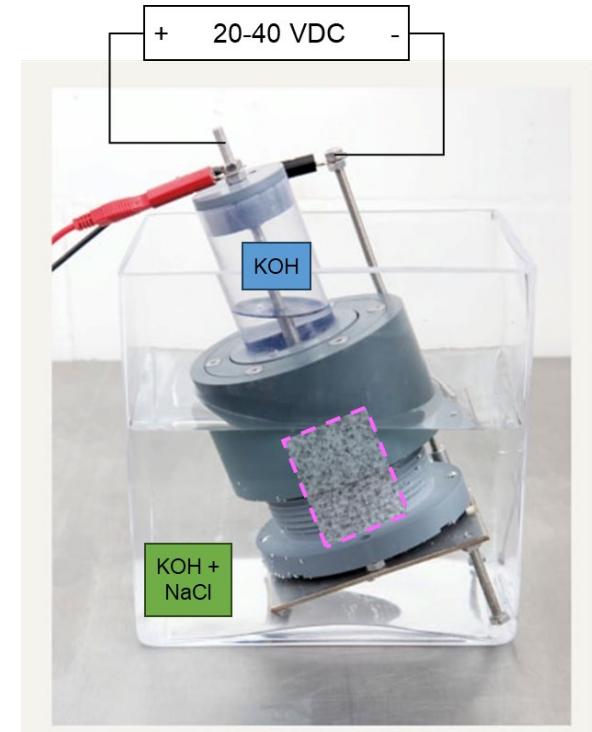
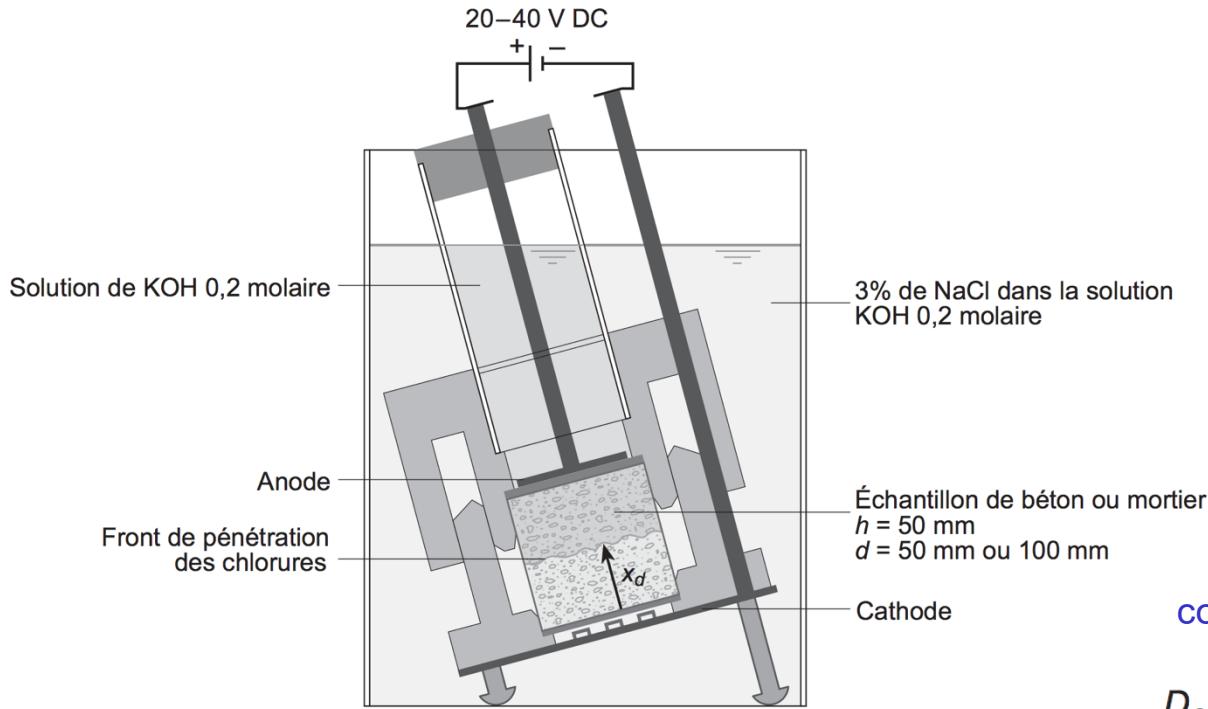
### Principe

L'application d'une tension électrique à des éprouvettes saturées d'eau stimule la diffusion des ions de chlorures. La détermination de la profondeur de pénétration des ions chlorures libres permet de calculer le coefficient de migration des chlorures sur la base de la profondeur de pénétration, de la tension électrique appliquée ainsi que d'autres paramètres.

# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

## 4.4. Essais en laboratoire

28 jours après la production - durée de 2 jours



coeff. de migration des Cl:

$$D_{Cl} = \frac{z}{t} (x_d - 1,5462 \sqrt{z x_d}) \quad [m^2/s]$$

$$\text{avec } z = 8,619 \cdot 10^{-5} \frac{hT}{U} \quad [m]$$

$T$  valeur moyenne de la température absolue des solutions de KOH et de KOH avec NaCl pendant l'essai [K]

$x_d$  profondeur moyenne de pénétration des ions chlorures des deux moitiés d'un échantillon [m]

$U$  valeur moyenne des tensions au début et en fin d'essai [V]

$t$  durée de la mesure [s].

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	$q_w \leq 10 \text{ g/m}^2\text{h}$	$K_N \leq 5.0 \text{ mm/y}^{1/2}$ 2,3,4)	$D_{Cl} \leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$m \leq 1'200 \text{ g/m}^2$	$m \leq 200 \text{ ou}$ $m \leq 600 \text{ g/m}^2 \text{ et } \Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
Valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible	$q_w \leq 12 \text{ g/m}^2\text{h}$	$K_N \leq 5.5 \text{ mm/y}^{1/2}$ 3,4)	$D_{Cl} \leq 13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$m \leq 1'800 \text{ g/m}^2$	$m \leq 250 \text{ ou}$ $m \leq 800 \text{ g/m}^2 \text{ et } \Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
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>		

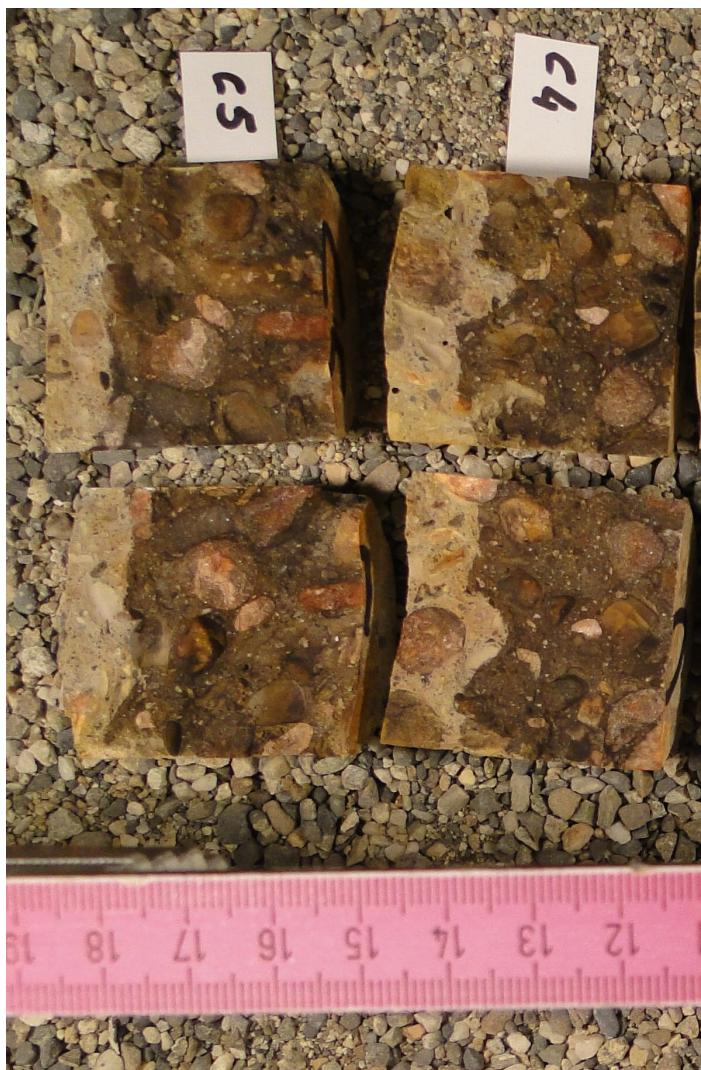
1) voir tableau NA.3, note e).

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:  $K_N \leq 4.0 \text{ mm/y}^{1/2}$  (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:  $K_N \leq 4.5 \text{ mm/y}^{1/2}$  (valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible: 5.0 mm/y<sup>1/2</sup>).

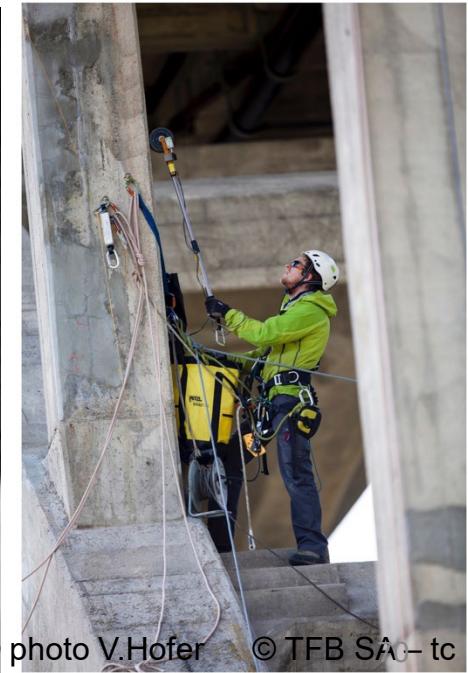
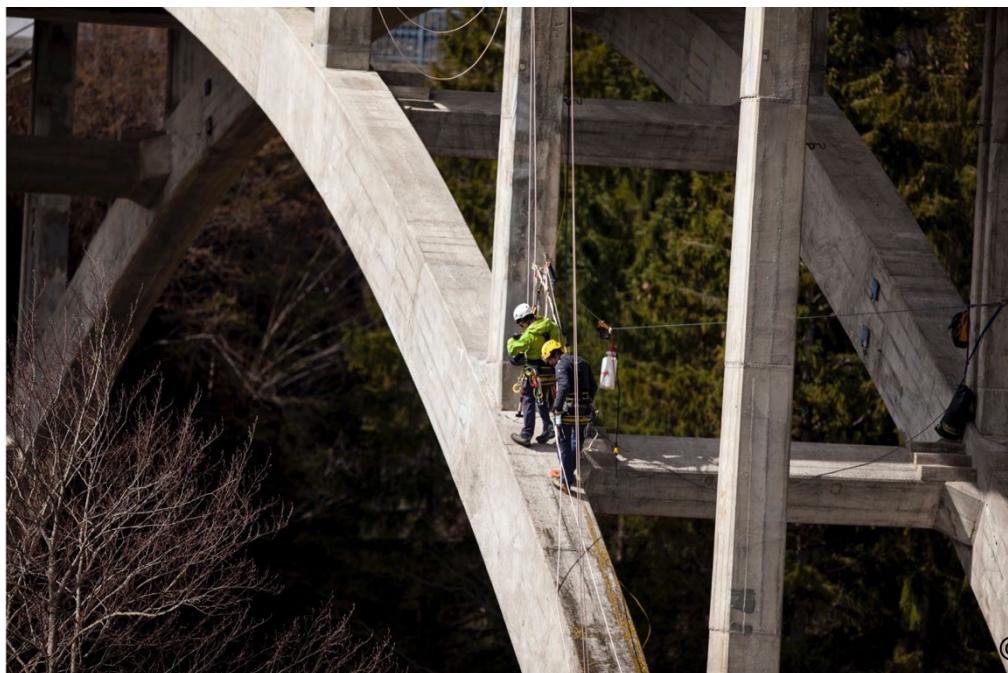
5) L'introduction de l'essai de résistance à la carbonatation n'a aucune répercussion sur la distinction entre un producteur sans ou avec expérience suffisante, c'est-à-dire la distinction entre un producteur sans et avec suffisamment d'expérience reste inchangée.



# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

Exemple 1:



© photo V.Hofer

© TFB SA - tc

# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

### Pont dans les Alpes Suisse

**Constat:** éclatement du béton d'enrobage sur de nombreuses piles de manière aléatoire:



- Ouvrage des années 50
- Cheneaux d'évacuations des eaux du tablier le long des piles du pont
- Présence de vent sur l'ouvrage

# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

### Pont dans les Alpes Suisse

#### Premières investigations in-situ:

- Prélèvement de poudre de forage par palier pour mesure de teneur en chlorures
- Prélèvement de carottes (mesure de carbonatation)



# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

### Analyse du béton après prélèvement de carottes:

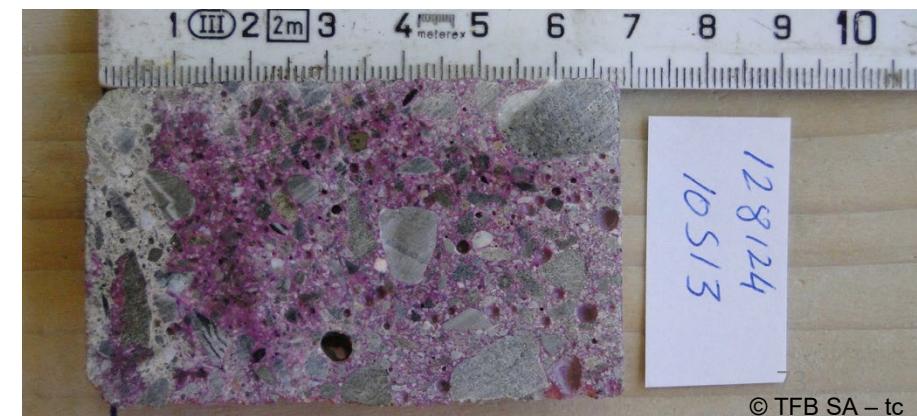
-présence de chlorures dans le béton jusqu'à une profondeur dépassant l'épaisseur d'enrobage  
(mesure par XRF sur poudre de forage dans le béton)

Détermination de la teneur en chlorures (XRF) du béton  
SN EN 14629:2007/ SOP 3020



No. TFB	Désignation de l'échantillon	Teneur en chlorures par rapport au béton	Teneur en chlorures par rapport au ciment
48913	BK 130-2-2A, 0-15mm	0.330 %	2.64 %
48914	BK 130-2-2A, 15-30mm	0.241 %	1.93 %
48915	BK 130-2-2A, 30-45mm	0.129 %	1.03 %
48940	BK 130-2-2A, 45-60mm	0.019 %	0.15 %
48941	BK 130-2-2A, 60-75mm	<0.005 %	<0.04 %

- carbonatation de max 10 mm (mesure à la phénolphthaléine)



## 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

#### Diagnostic:

- Fuite des chéneaux d'évacuation → eaux du tablier chargées en chlorures (sel de dé verglaçage) → **contamination des piles**
- Vent contribue à contaminer différentes zones des piles
- Âge de construction → mise en place par tassement (sans vibrage) → inhomogénéité du béton

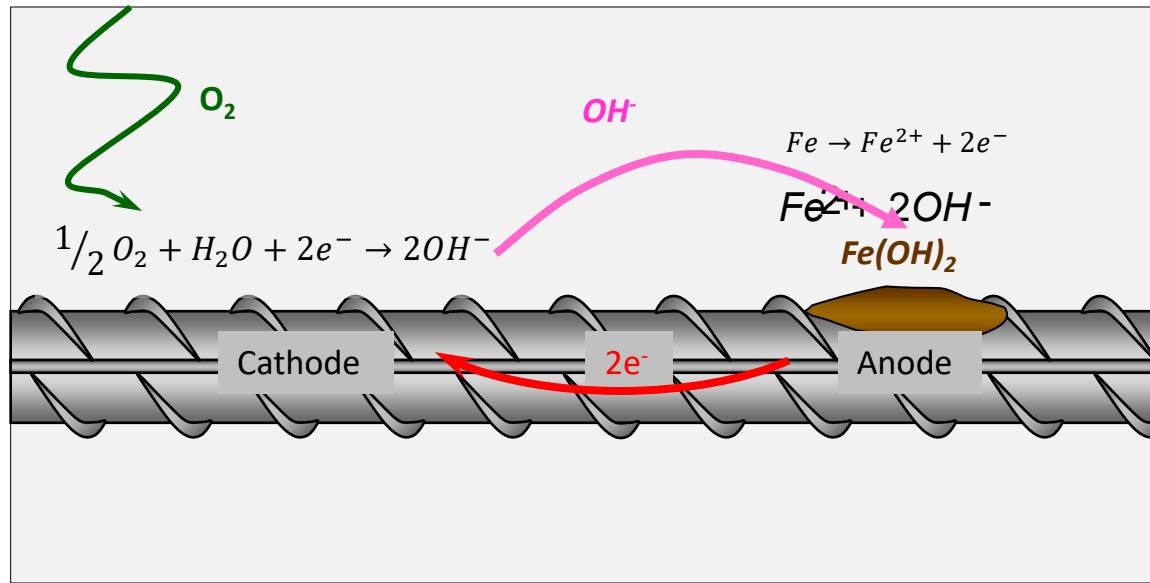


→ Il est nécessaire de définir quelles zones sont contaminées afin de les réparer

# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

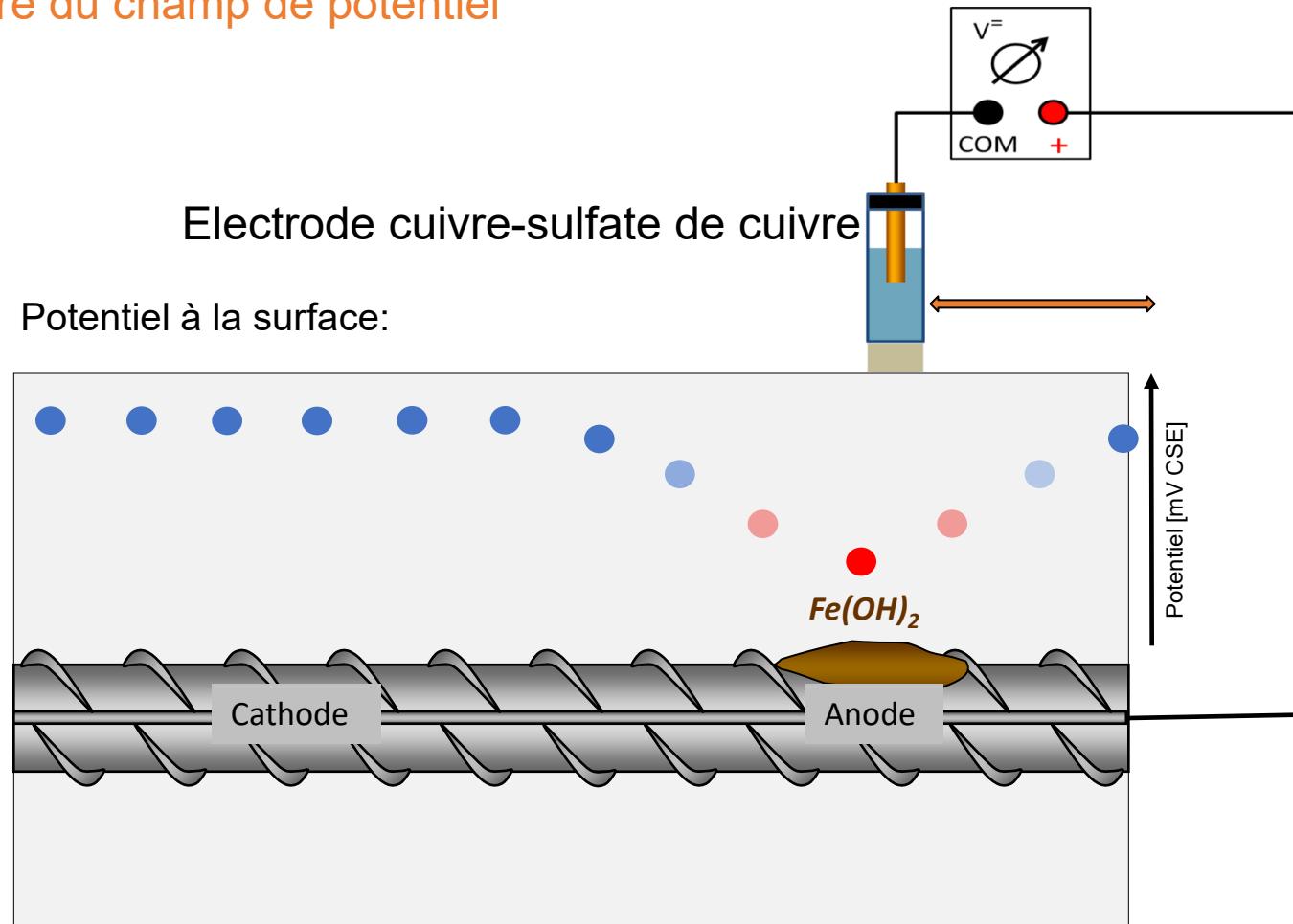
→ Mesure du champ de potentiel



# 4. Corrosion des armatures due aux chlorures

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

### → Mesure du champ de potentiel

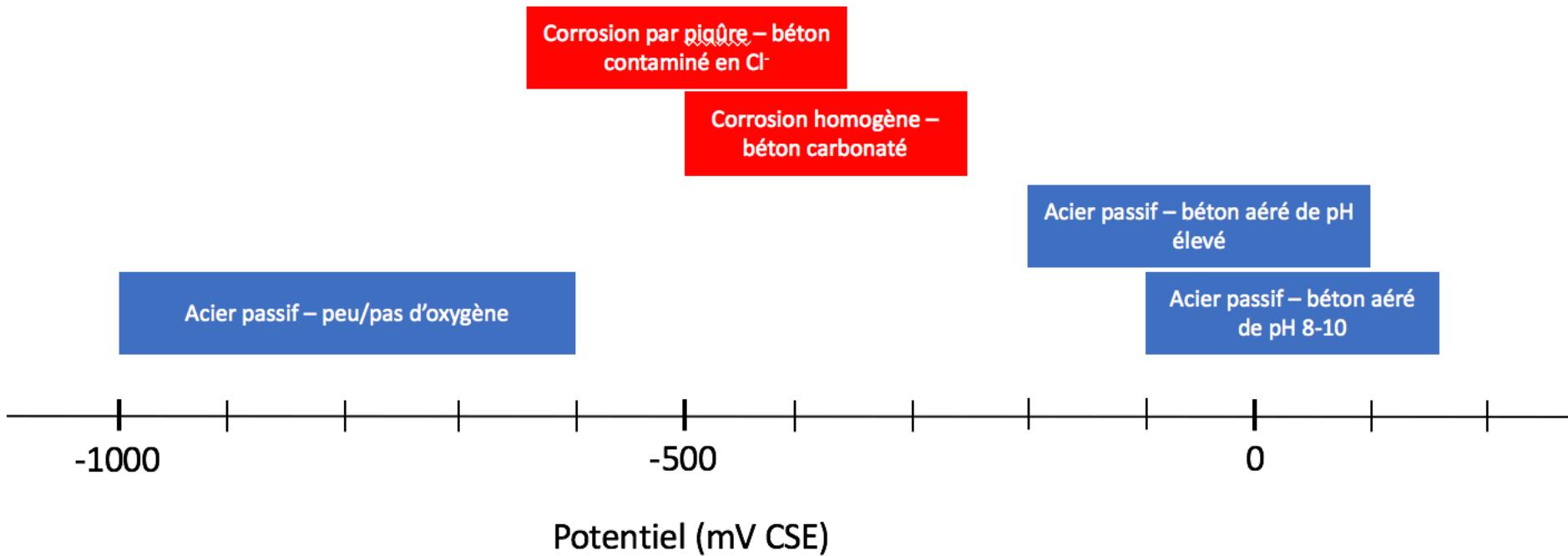


Le potentiel chute au niveau des piles de corrosion

# 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:

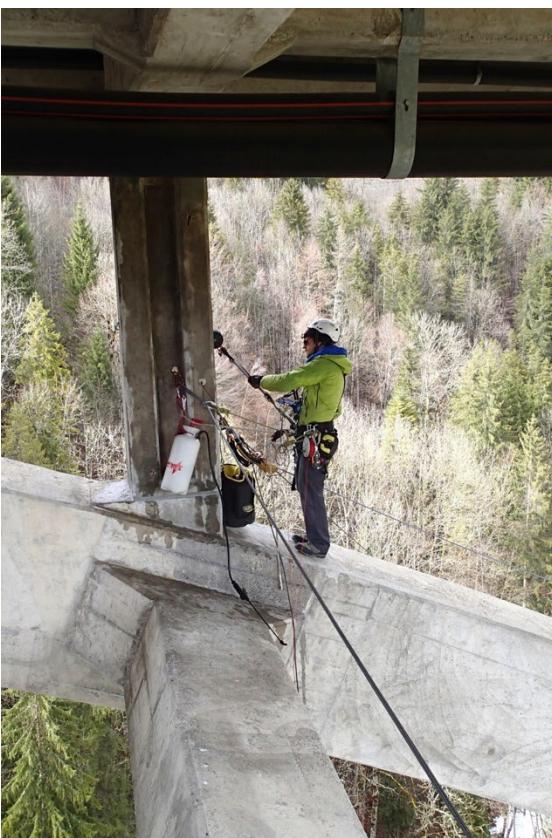
- Humidité relative / humidité du béton
- Perméabilité du béton
- Défauts du béton
- Courants secondaires
- Température
- ...

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

# 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 sur chaque pile du pont



[m]	E	N	O	S
0.1	-15	-235	-180	-
0.3	-255	-185	-265	-
0.5	-270	-225	-230	-
0.7	-275	-290	-245	-
0.9	-260	-320	-265	-
1.1	-300	-315	-285	-
1.3	-285	-280	-255	-
1.5	-275	-310	-280	-
1.7	-315	-275	-240	-
1.9	-300	-310	-255	-
2.1	-355	-280	-285	-
2.3	-350	-300	-275	-
2.5	-335	-310	-305	-
2.7	-200	-290	-275	-
2.9	-270	-255	-280	-
3.1	-330	-260	-250	-
3.3	-340	-285	-305	-
3.5	-290	-290	-280	-
3.7	-335	-310	-250	-
3.9	-355	-230	-225	-
4.1	-320	-280	-245	-
4.3	-345	-240	-215	-
4.5	-305	-270	-180	-
4.7	-300	-235	-170	-
4.9	-250	-185	-125	-
5.1	-205	-210	-145	-
5.3	-175	-215	-110	-
5.5	-210	-215	-200	-
5.7	-220	-210	-170	-
5.9	-185	-225	-155	-
6.1	-265	-215	-150	-
6.3	-195	-220	-	-
6.5	-215	-	-	-
6.7	-	-	-	-
6.9	-	-	-	-
7.1	-	-	-	-

# 4. Corrosion des armatures par attaque aux chlorures

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

→ toujours à réaliser avec des **sondages de contrôle destructifs** et des prélevements pour mesure de **carbonatation / teneur en chlorures**



# 4. Corrosion des armatures par attaque aux chlorures

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

→ définition des zones de corrosion actives



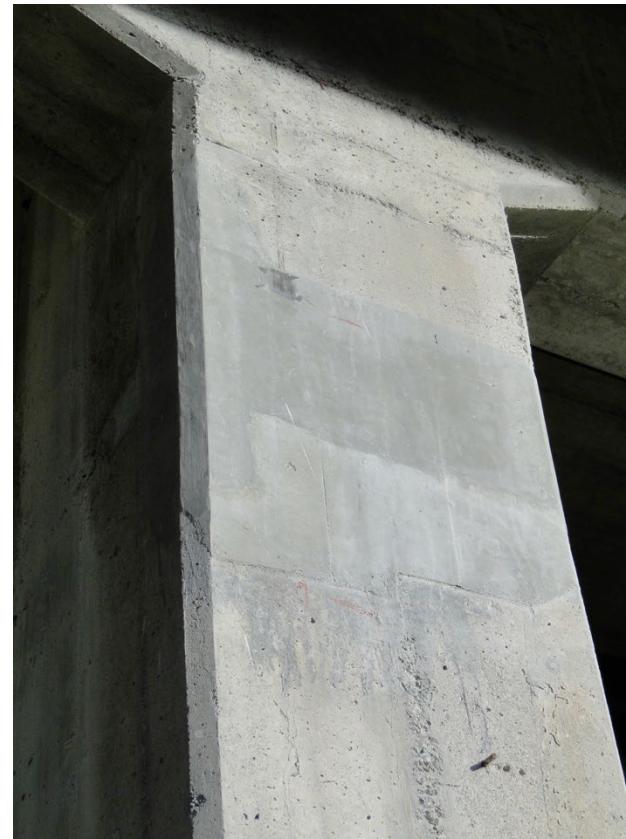
[m]	E	N	W	S
0.1	-15	-235	-180	-
0.3	-255	-185	-265	-
0.5	-270	-225	-230	-
0.7	-275	-290	-245	-
0.9	-260	-320	-265	-
1.1	-300	-315	-285	-
1.3	-285	-280	-255	-
1.5	-275	-310	-280	-
1.7	-315	-275	-240	-
1.9	-300	-310	-255	-
2.1	-355	-280	-285	-
2.3	-350	-300	-275	-
2.5	-335	-310	-305	-
2.7	-200	-290	-275	-
2.9	-270	-255	-280	-
3.1	-330	-260	-250	-
3.3	-340	-285	-305	-
3.5	-290	-290	-280	-
3.7	-335	-310	-250	-
3.9	-355	-230	-225	-
4.1	-320	-280	-245	-
4.3	-345	-240	-215	-
4.5	-305	-270	-180	-
4.7	-300	-235	-170	-
4.9	-250	-185	-125	-
5.1	-205	-210	-145	-
5.3	-175	-215	-110	-
5.5	-210	-215	-200	-
5.7	-220	-210	-170	-
5.9	-185	-225	-155	-
6.1	-265	-215	-150	-
6.3	-195	-220	-	-
6.5	-215	-	-	-
6.7	-	-	-	-
6.9	-	-	-	-
7.1	-	-	-	-

## 4. Corrosion des armatures par attaque aux chlorures

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

→ réparation des piles dans les zones de corrosion /contaminées

Retirer **entièvement** le béton **contaminé** afin d'éviter que les chlorures dans le béton ne diffusent et que la corrosion recommence après réparation (mauvais exemple à gauche, le béton contaminé est encore en contact avec l'armature).



# 4. Corrosion des armatures par attaque aux chlorures

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

### Exemple 2:

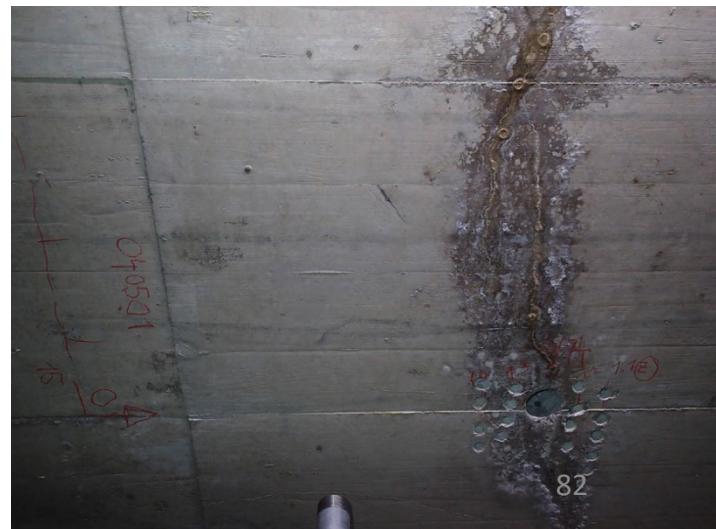
Dalle de local technique:

- série de fissures parallèles de retrait.  
→ Enduit étanche en surface
- Véhicules
- Présence de sels de dé verglaçage



Investigations:

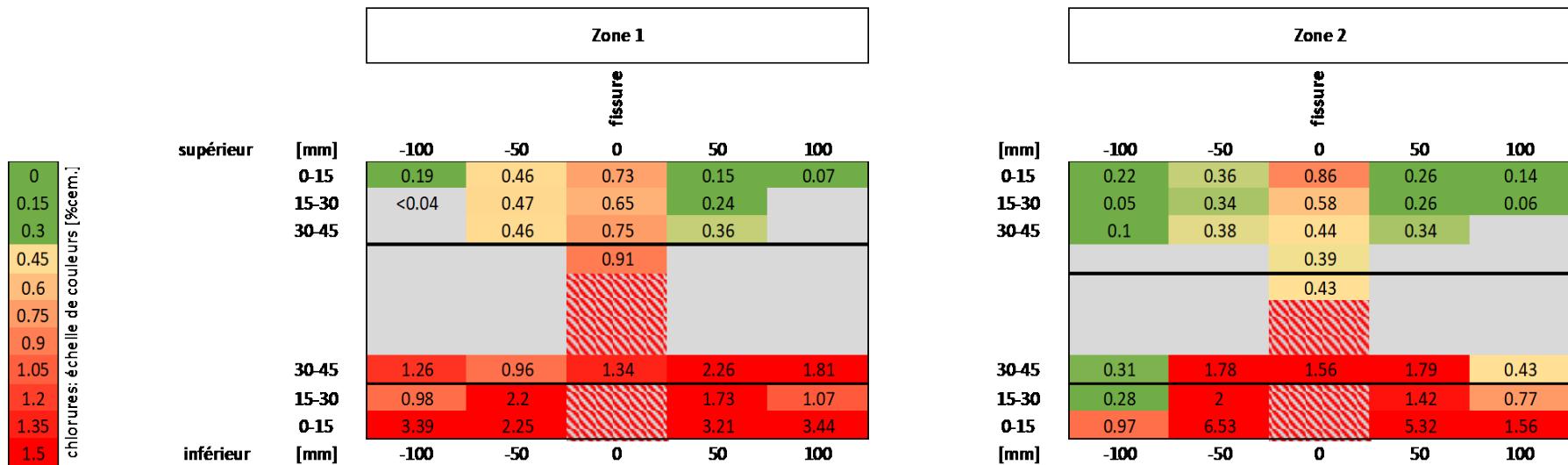
- Mesure de teneur en chlorures et d'enrobage
- Sondage de l'état des armatures



# 4. Corrosion des armatures par attaque aux chlorures

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

### Exemple 2:

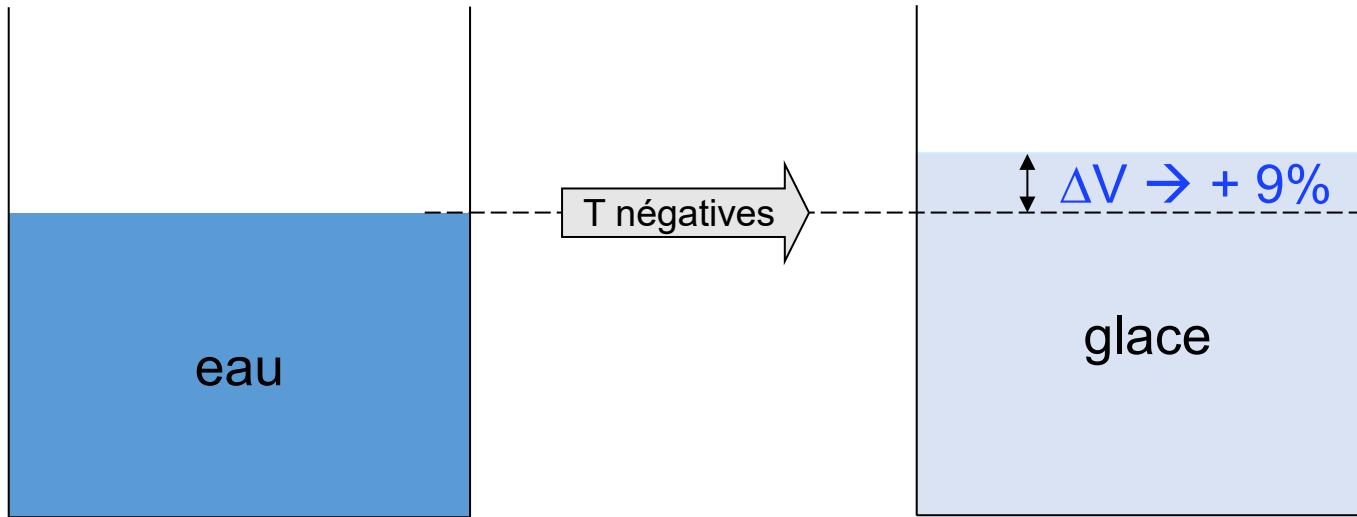


: zone contaminé sans mesure

— : profondeur approximative des barre d'armature

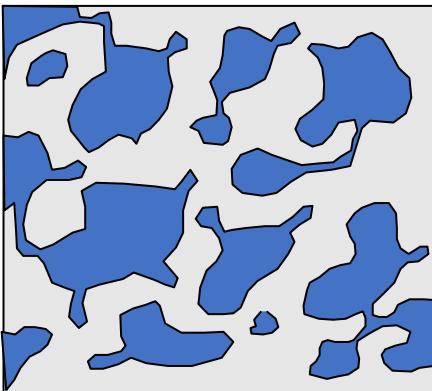
# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

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



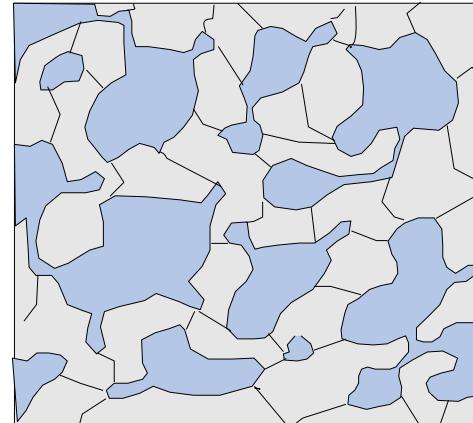
Dans le béton :

pores capillaires saturés



T négatives

fissuration de la pâte de ciment  
décohésion pâte granulats

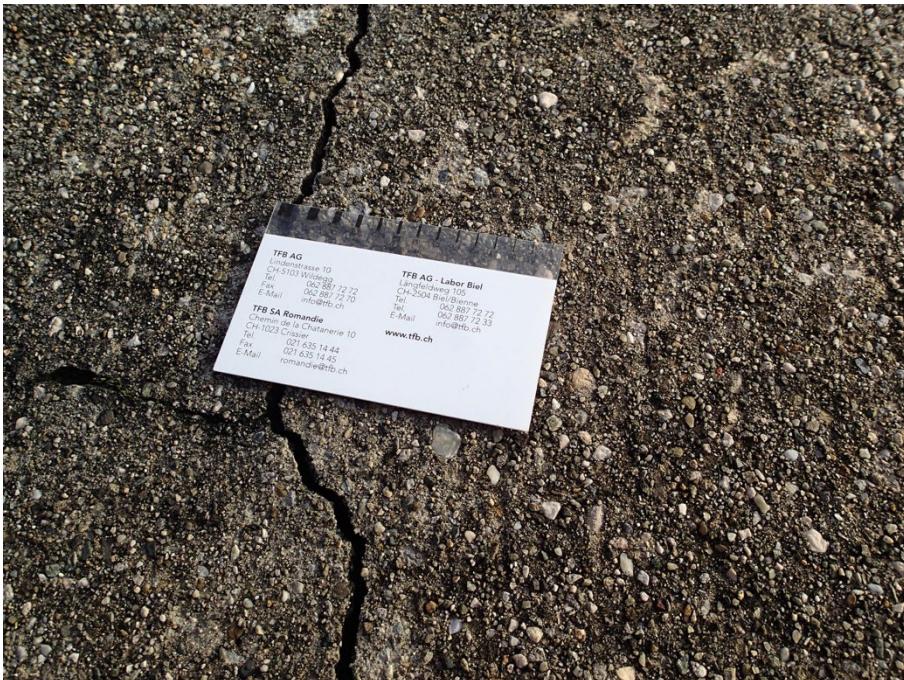


# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

## 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

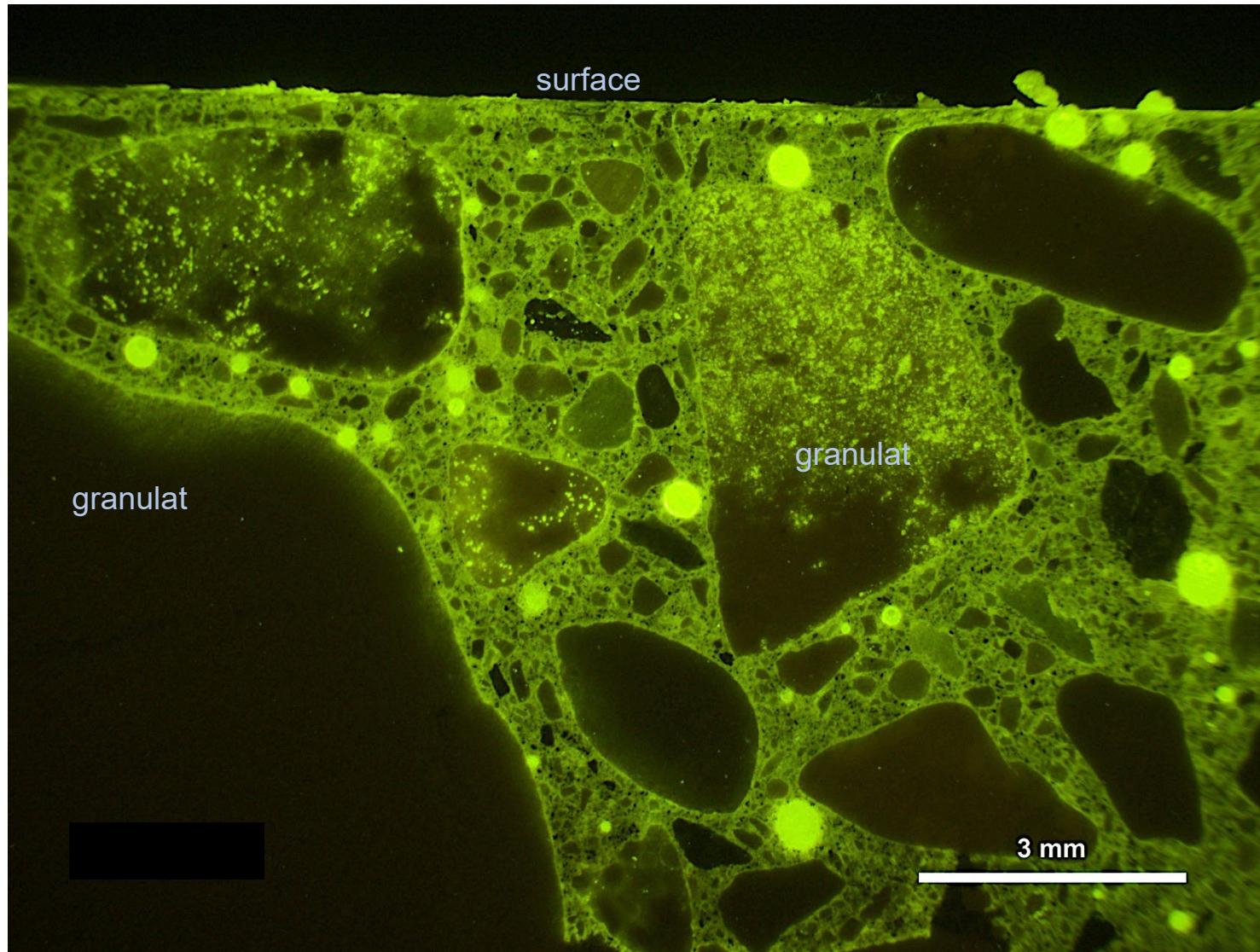


Granulats intacts

# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

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

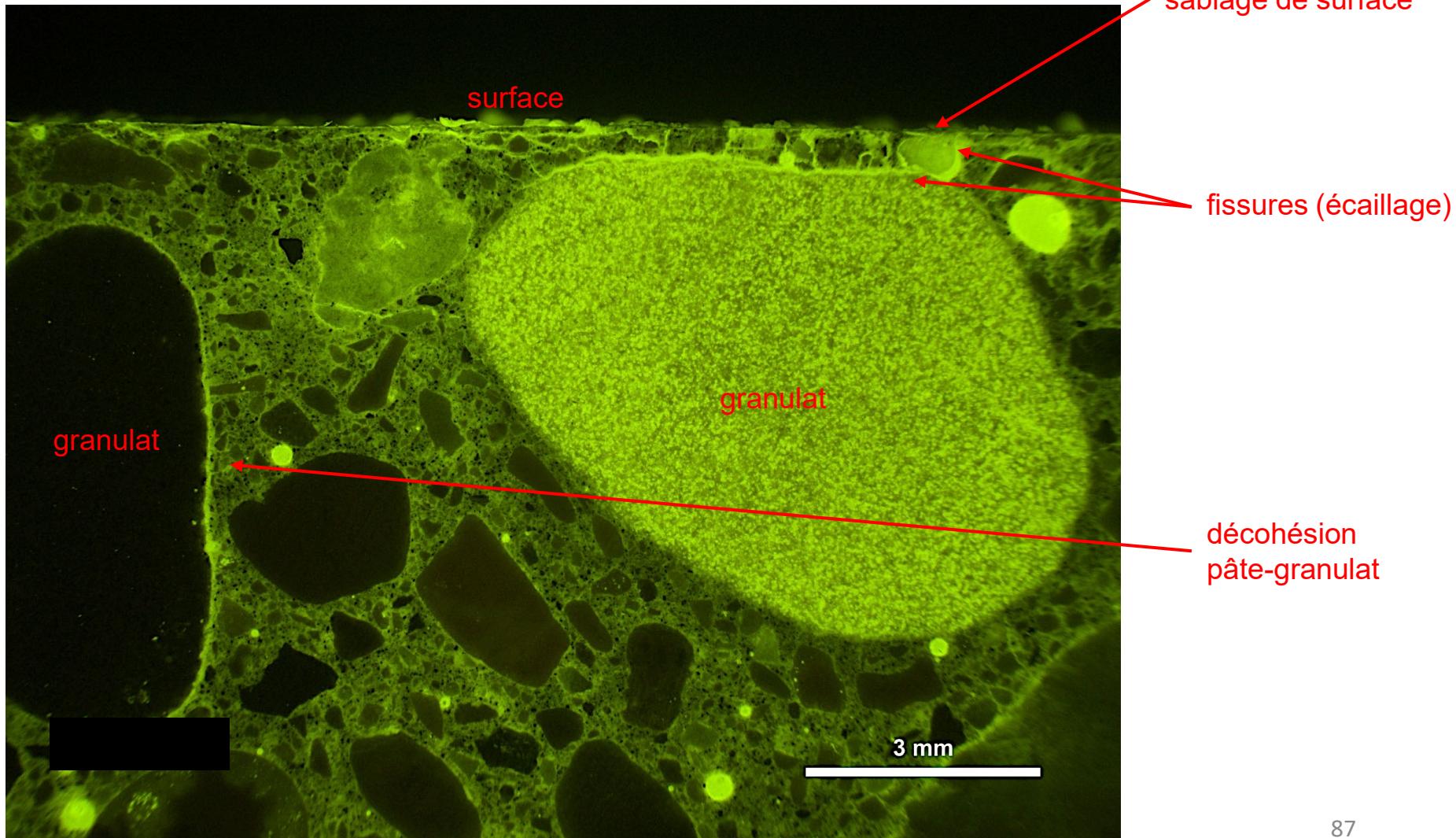
Béton non dégradé par le gel (béton imprégné. Coupe polie en lumière UV):



# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

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

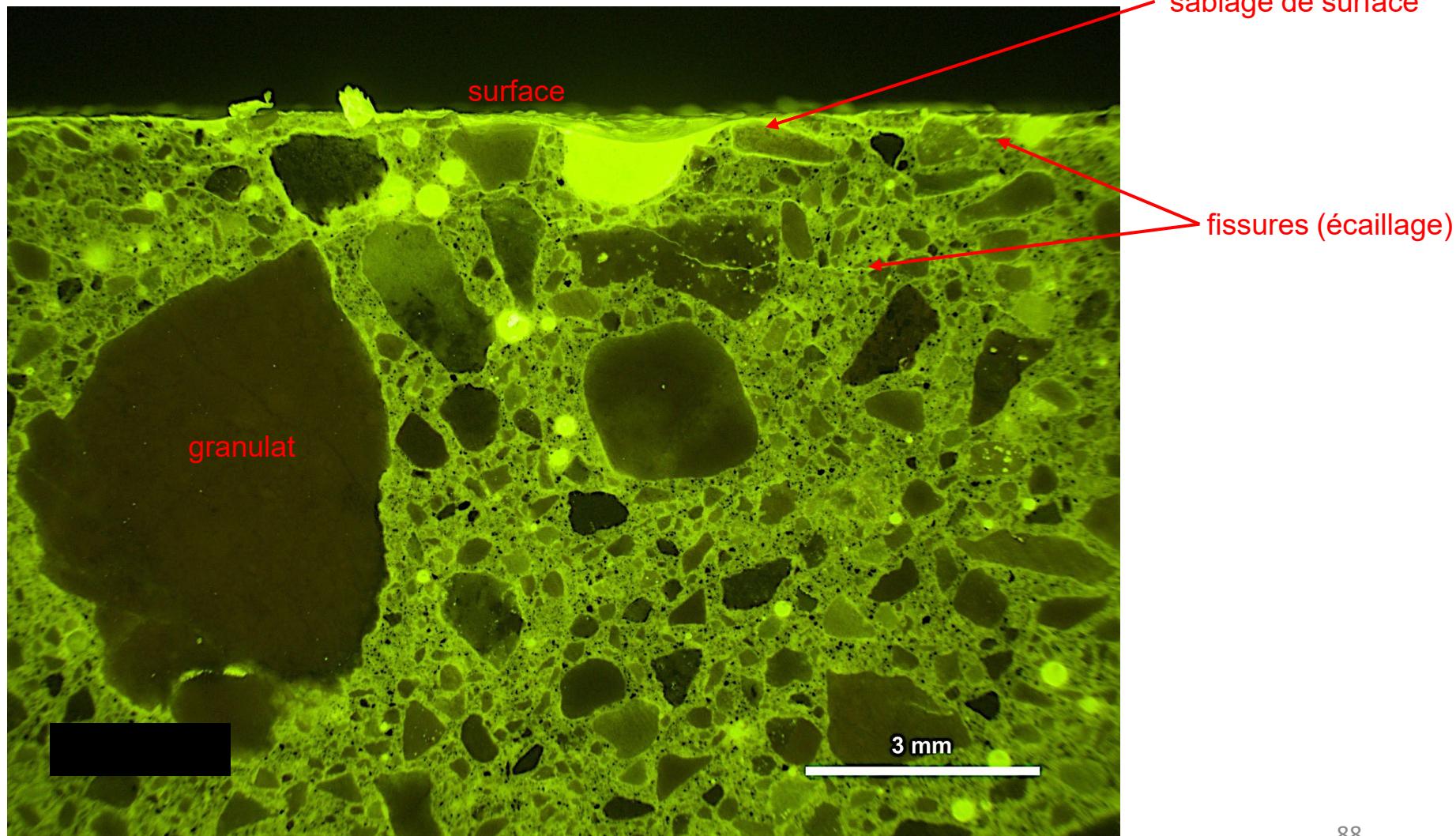
Béton dégradé par le gel:



# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

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

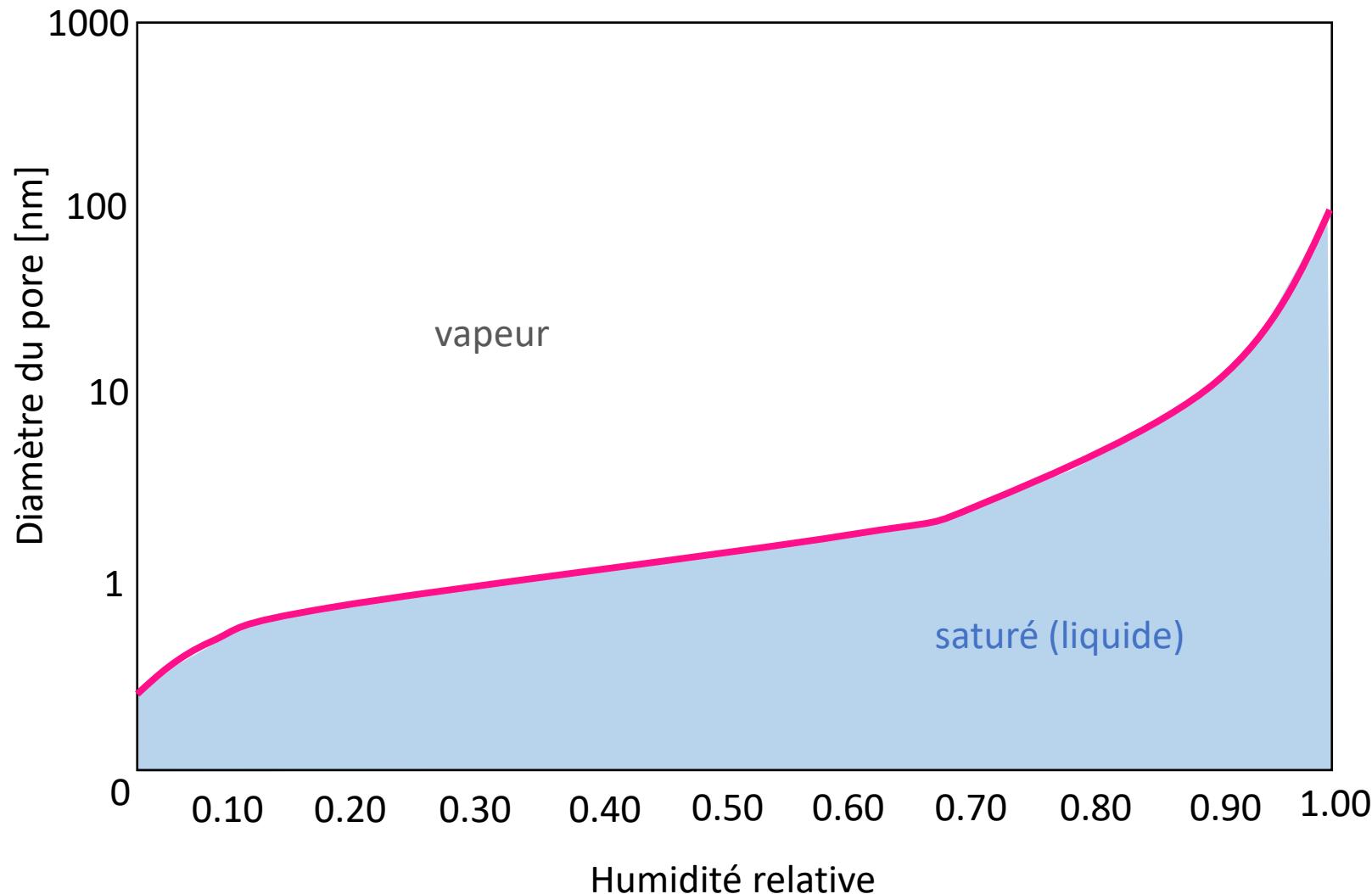
Béton dégradé par le gel:



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

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

Loi Kelvin-Laplace :



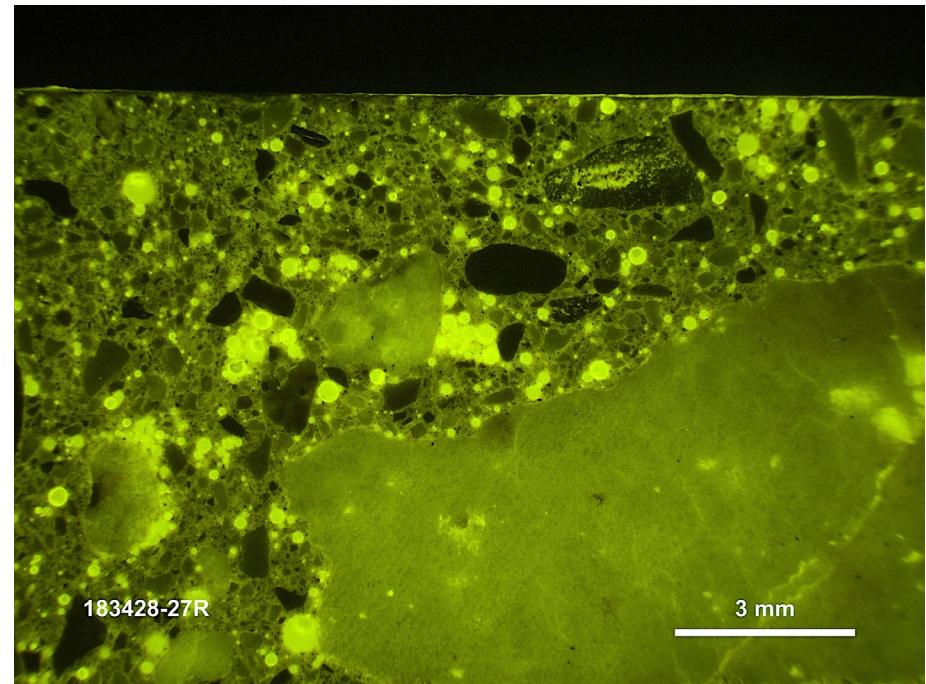
# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

## 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. 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.

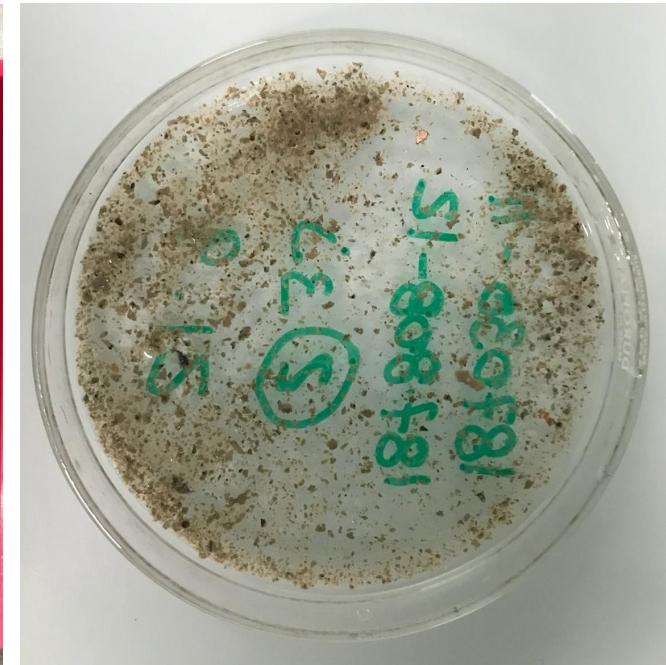
## 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

## 5.4. essais en laboratoire

Les bétons mis en place dans un environnement pouvant subir des cycles de gel – dégel doivent respecter les exigences de la norme **SIA 262/1:2013 – Annexe C**

## Principe

Les éprouvettes sont recouvertes d'une solution de chlorures et soumises à 28 cycles de gel-dégel. Les pertes de masse permettent de tirer des déductions prévisionnelles sur la résistance du béton au gel en présence de sels de dé verglaçage.



# 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	$q_w \leq 10 \text{ g/m}^2\text{h}$	$K_N \leq 5.0 \text{ mm/y}^{1/2}$ 2,3,4)	$D_{Cl} \leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$m \leq 1'200 \text{ g/m}^2$	$m \leq 200$ ou $m \leq 600 \text{ g/m}^2$ et $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
Valeur limite pour la valeur moyenne + écart maximum admissible	$q_w \leq 12 \text{ g/m}^2\text{h}$	$K_N \leq 5.5 \text{ mm/y}^{1/2}$ 3,4)	$D_{Cl} \leq 13 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	$m \leq 1'800 \text{ g/m}^2$	$m \leq 250$ ou $m \leq 800 \text{ g/m}^2$ et $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
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:  $K_N \leq 4.0 \text{ mm/y}^{1/2}$  (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:  $K_N \leq 4.5 \text{ mm/y}^{1/2}$  (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, écaillage:



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

# 5. Dégradation par le phénomène de gel – dégel

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

### Analyse du béton après prélèvement de carottes:

- Essai selon l'annexe C → le béton ne passe pas les exigences demandées
  - Mesure de la teneur en ciment: **330 kg/m<sup>3</sup>**
  - Mesure de la caractéristique des pores par absorption d'eau: **17.4 %vol.**
- ces deux dernières mesures permettent d'estimer le rapport E/C: **0.65**

$$\frac{E}{C} = \frac{U_E}{100} \cdot \frac{1000}{C} + 0.25\alpha$$

$$\alpha = 0.17 \cdot (\log x + 2)$$

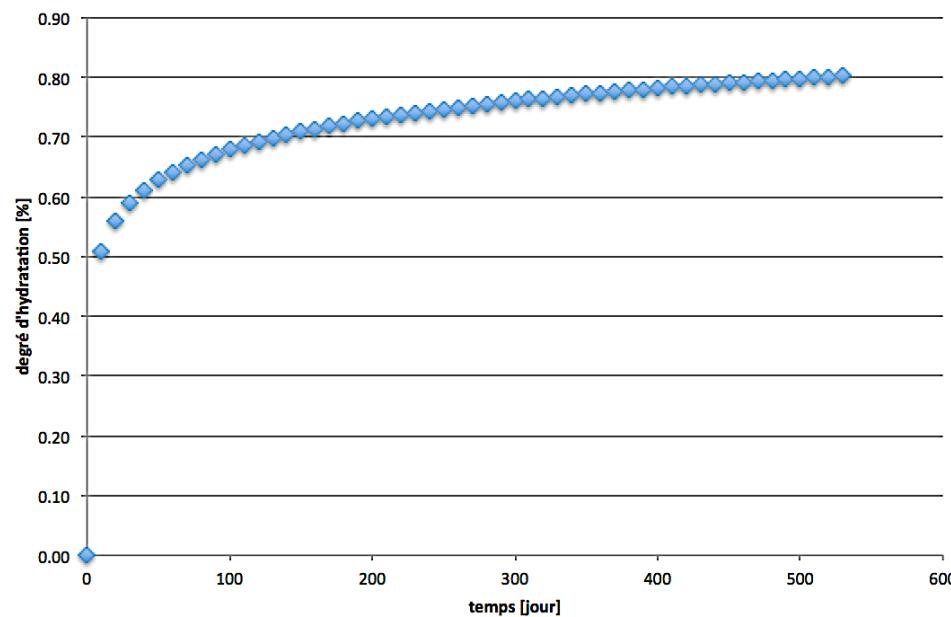
avec :

$U_E$  : porosité capillaire [%vol.]

$C$  : teneur en ciment [kg/m<sup>3</sup>]

$\alpha$  : degré d'hydratation [%]

$x$  : âge du béton [jour]



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

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

#### Diagnostic:

- Le béton mis en place n'est pas un béton de sorte G comme demandé :  
→ il y a eu trop d'eau lors du mélange

→ Possibilité d'appliquer un enduit étanche ou une imprégnation hydrofuge (attention à l'usure de passage) pour repousser l'eau

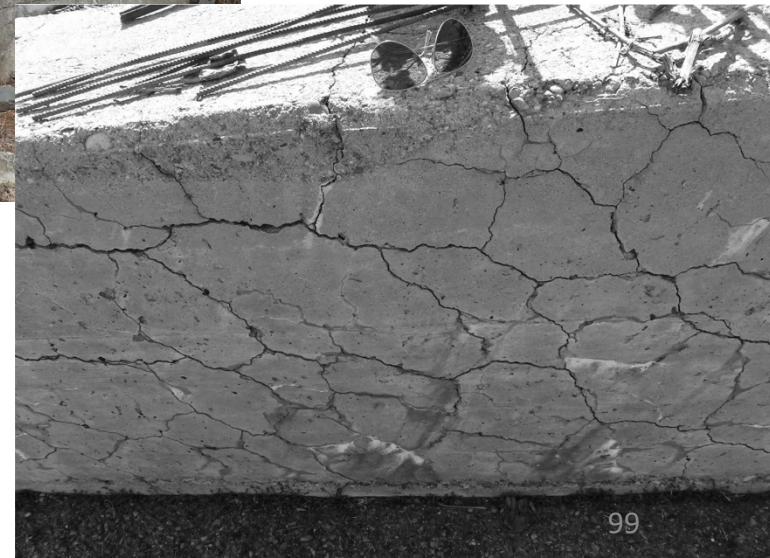
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.1. RAG : mécanisme



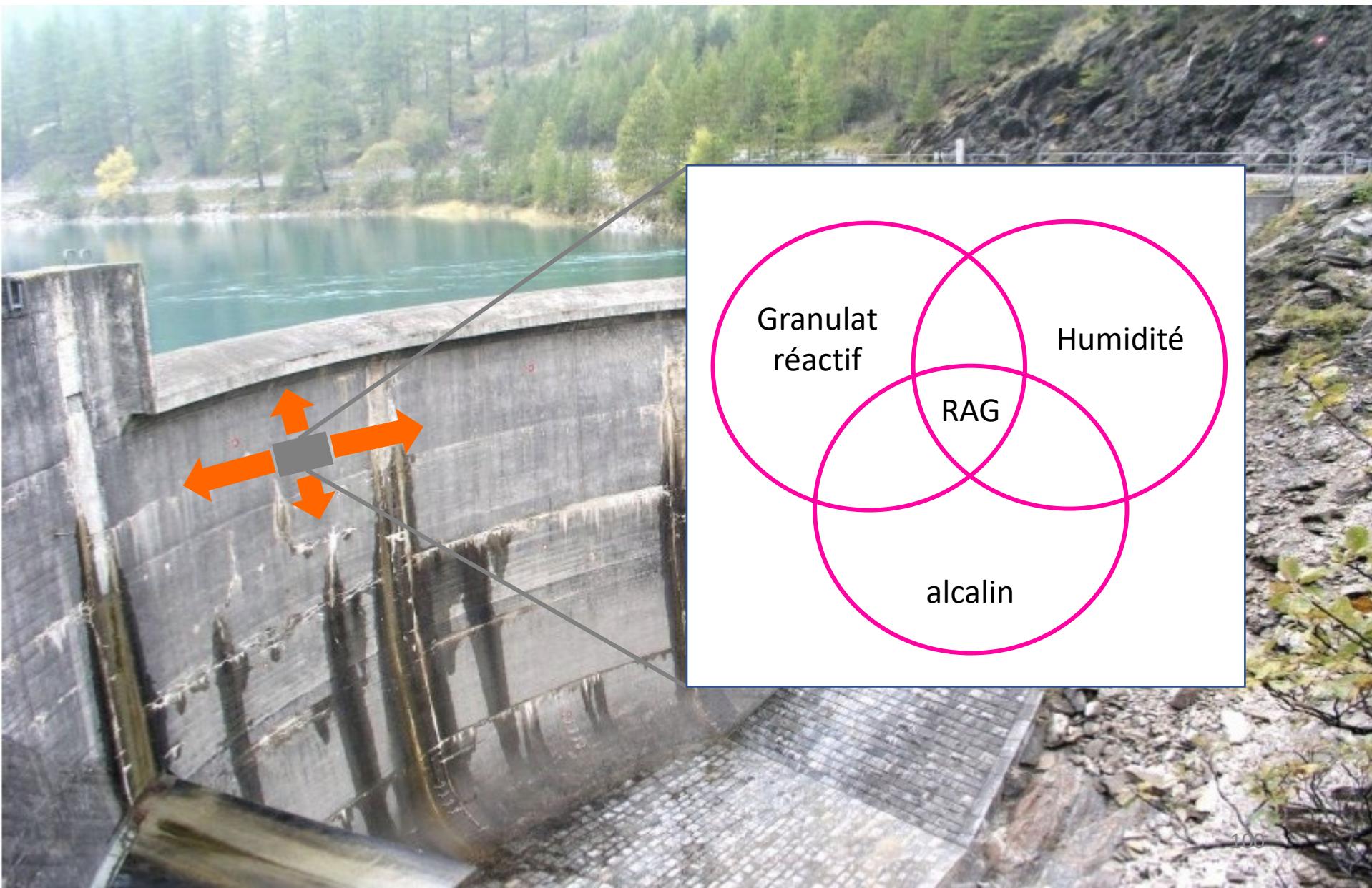
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.1. RAG : mécanisme



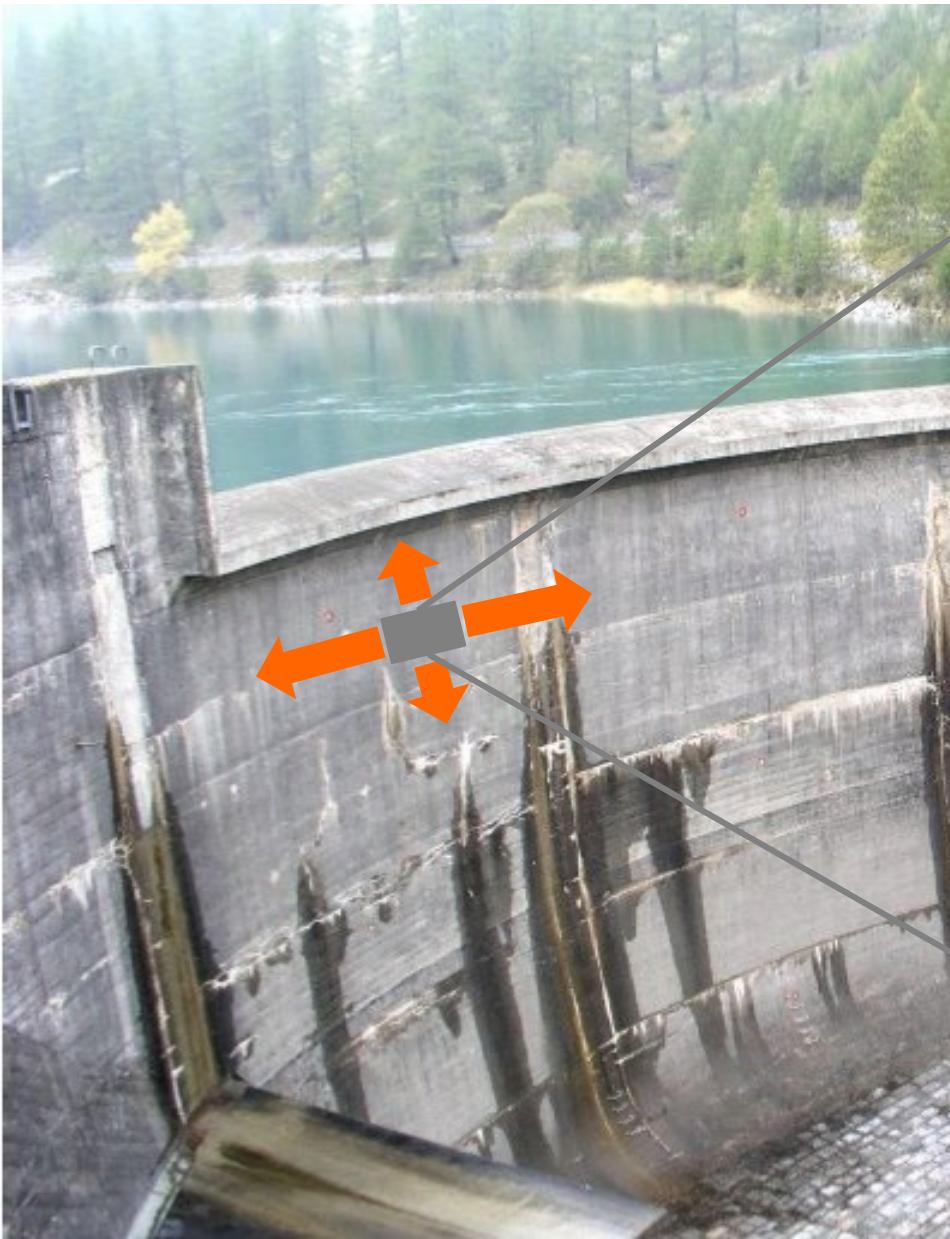
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.1. RAG : mécanisme



# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

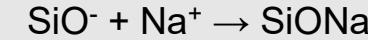
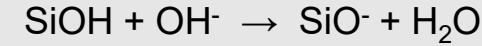
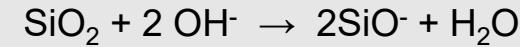
## 6.1. RAG : mécanisme



Réaction alcali – granulat:

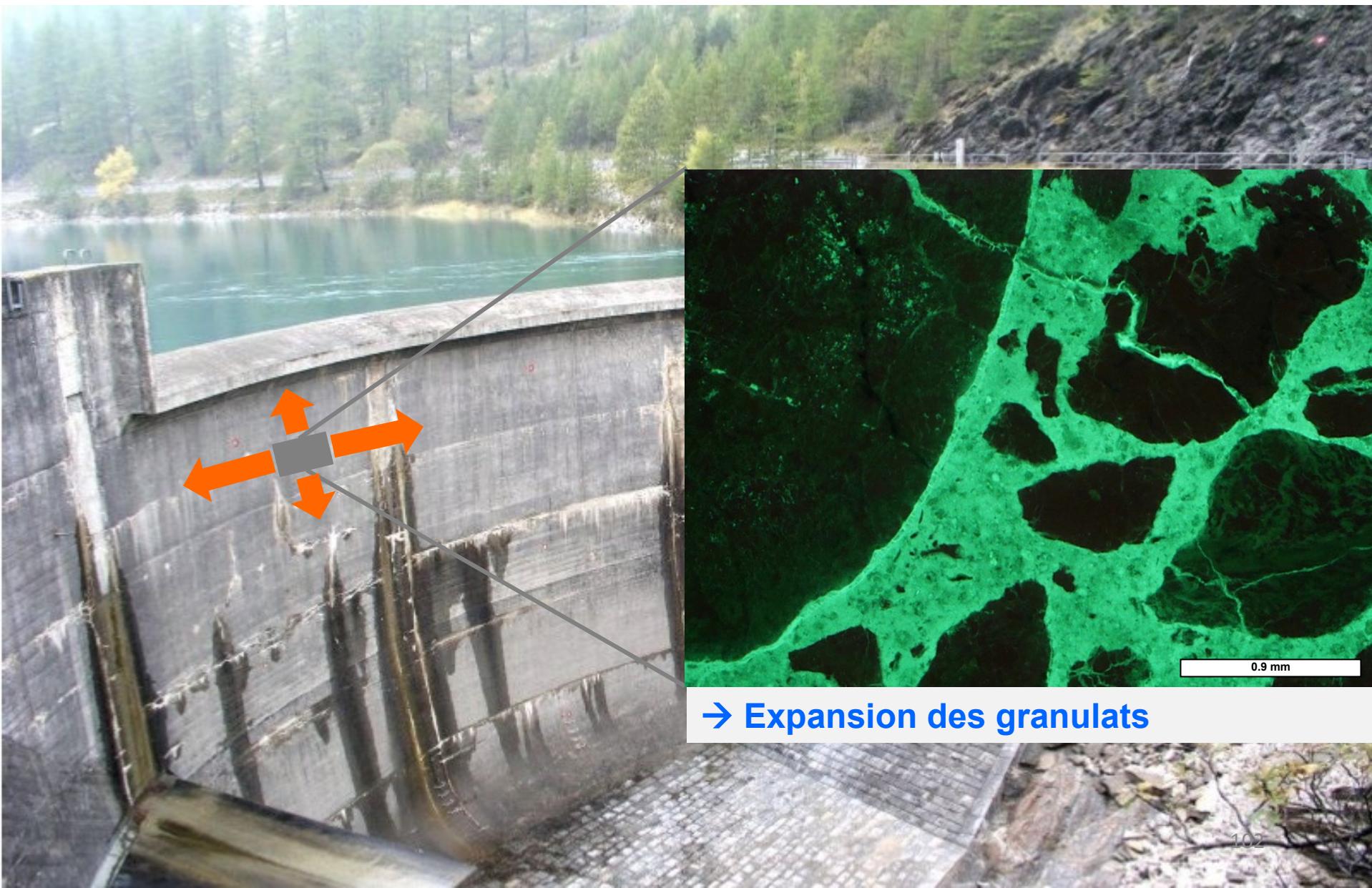
Dégradation des granulats contenant de la silice amorphe

**Dissolution de la silice des granulats**  
→ Formation d'un gel de silice **expansif**



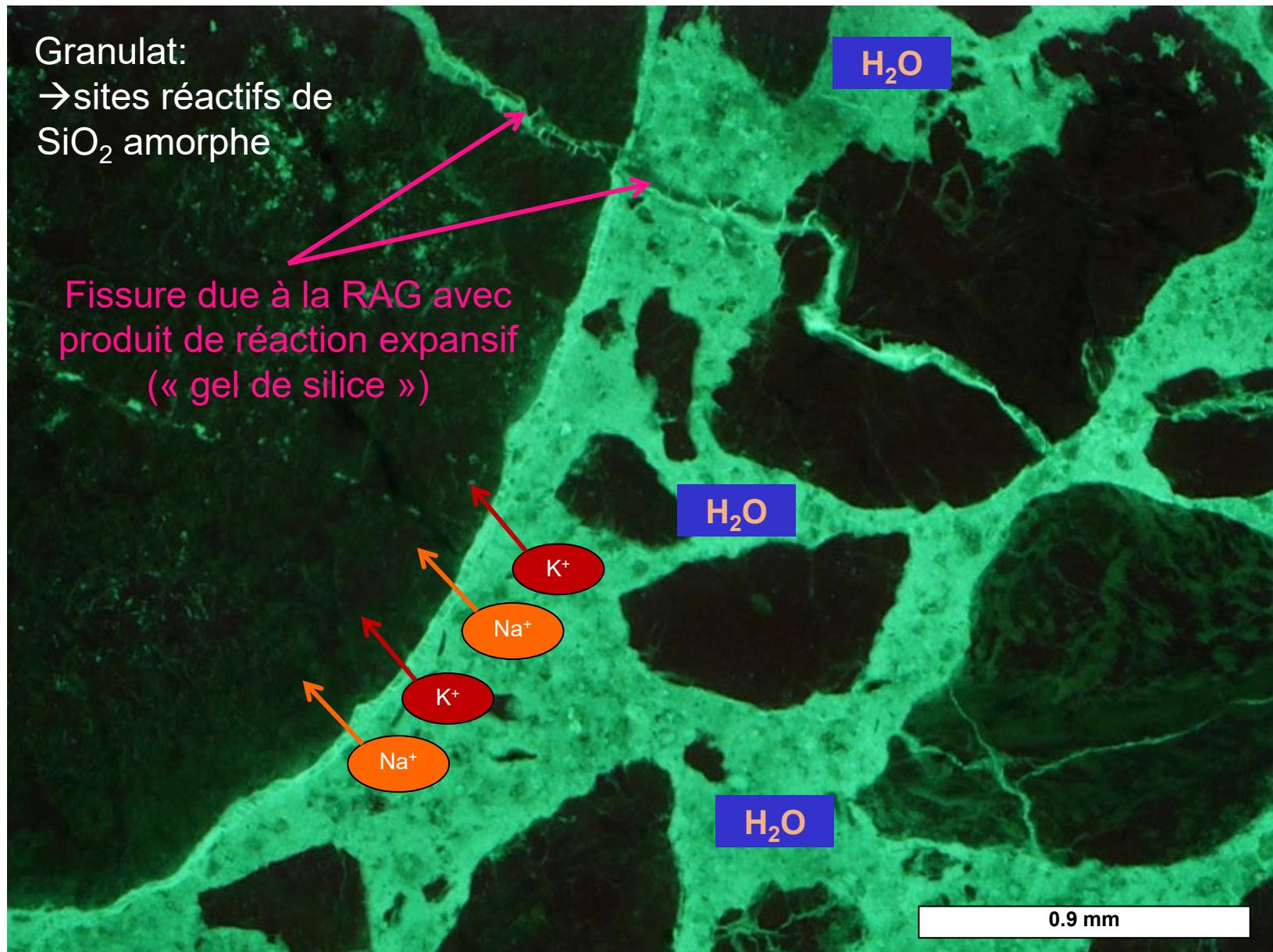
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.1. RAG : mécanisme



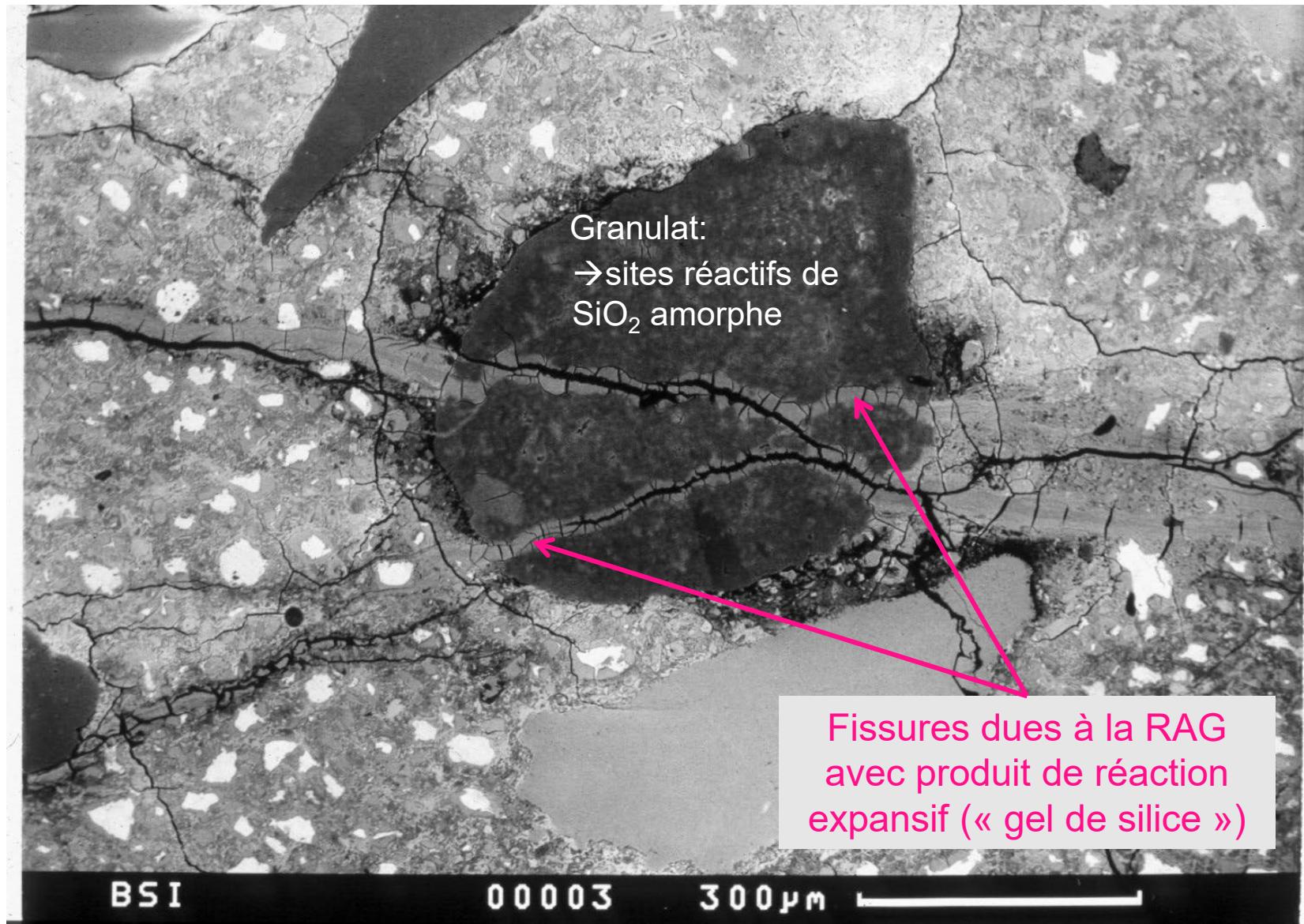
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.1. RAG : mécanisme



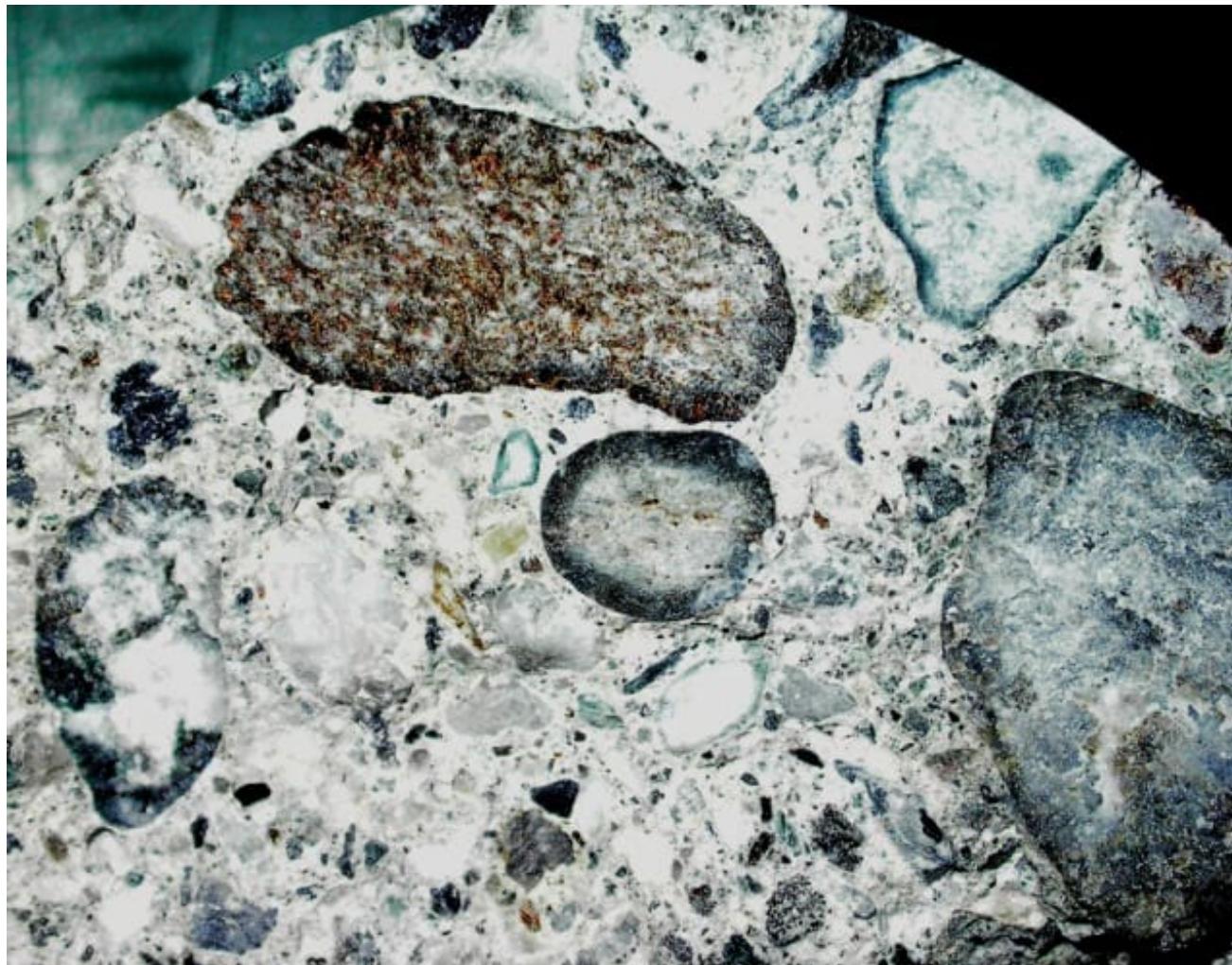
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.1. RAG : mécanisme



## 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

### 6.1. RAG : mécanisme



Béton hydrodémoli : les granulats réactifs se fracturent et présentent une auréole sombre

# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.2. RAG : prévention

### Quelques méthodes de prévention :

- (Eviter les granulats réactifs)
- Utiliser du ciment à basse teneur en alcalins (**attention! ralentit 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!

# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.3. essais en laboratoire

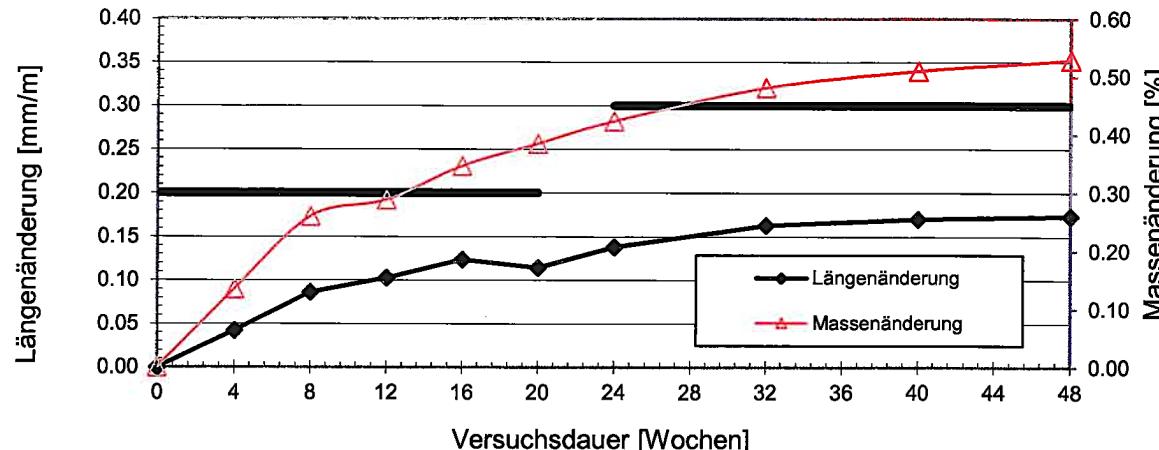
Les bétons mis en place avec des granulats potentiellement réactifs à la RAG doivent respecter les exigences du cahier technique **SIA 2042: 2012**

### Principe de la méthode

La sensibilité de la formule de béton testée vis-à-vis de l'alcali-réaction est mesurée par un essai de gonflement de trois prismes en béton de dimensions 70 mm x 70 mm x 282 mm, conservés dans une enceinte à 60 °C en atmosphère saturée d'humidité et dont on mesure la déformation longitudinale à des échéances données. L'appareil mentionné sous chiffre F.1.3.2 est réputé de garantir le respect de ces conditions.

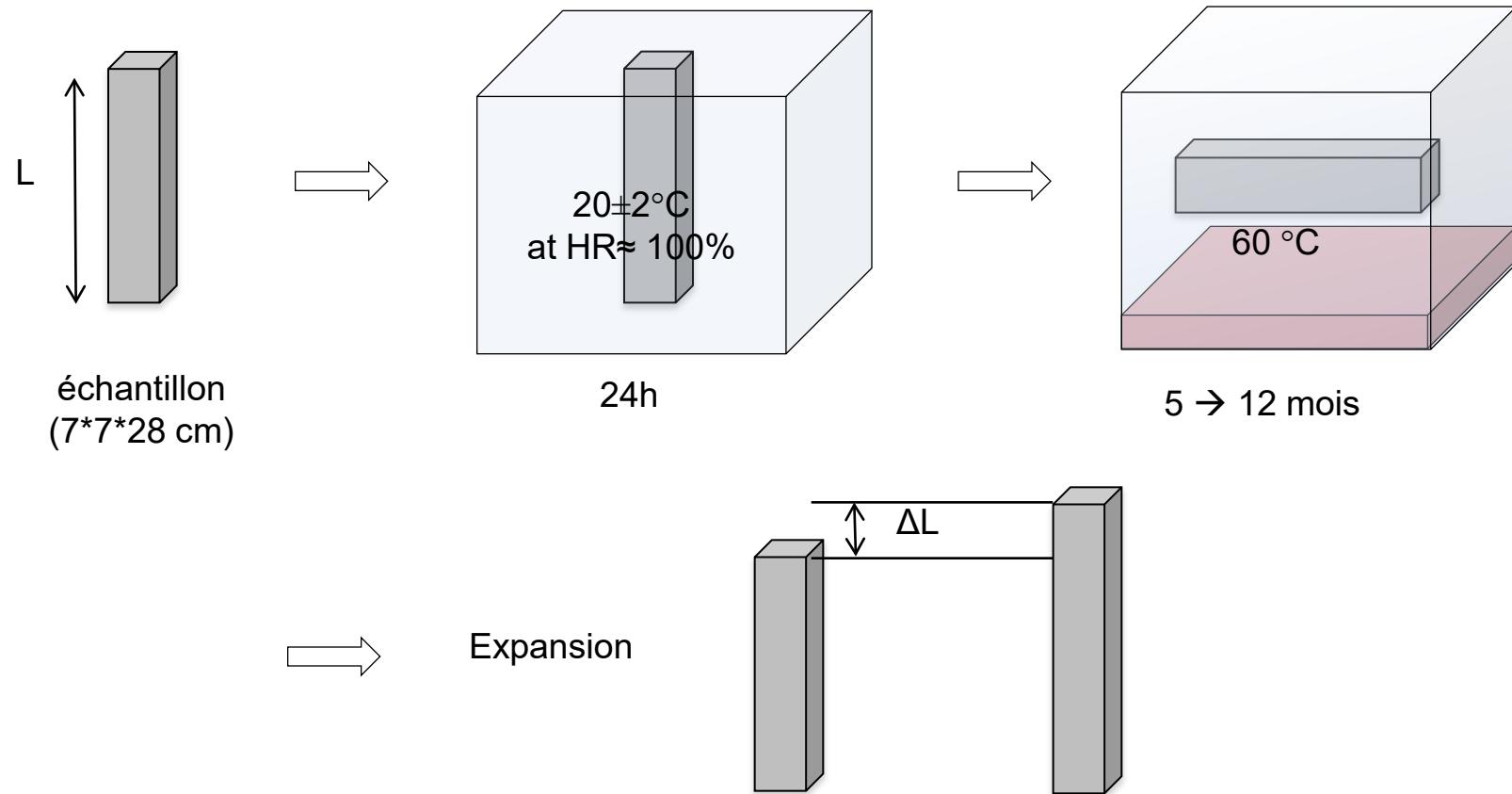
pas répertoriées dans une annexe de la norme SIA 262/1

→ Les études concernant la RAG sont encore en cours et les essais répertoriés font encore l'objet de controverses (**cohérence entre essai accélérés en laboratoire et béton d'ouvrage**)



# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

## 6.3. essais en laboratoire



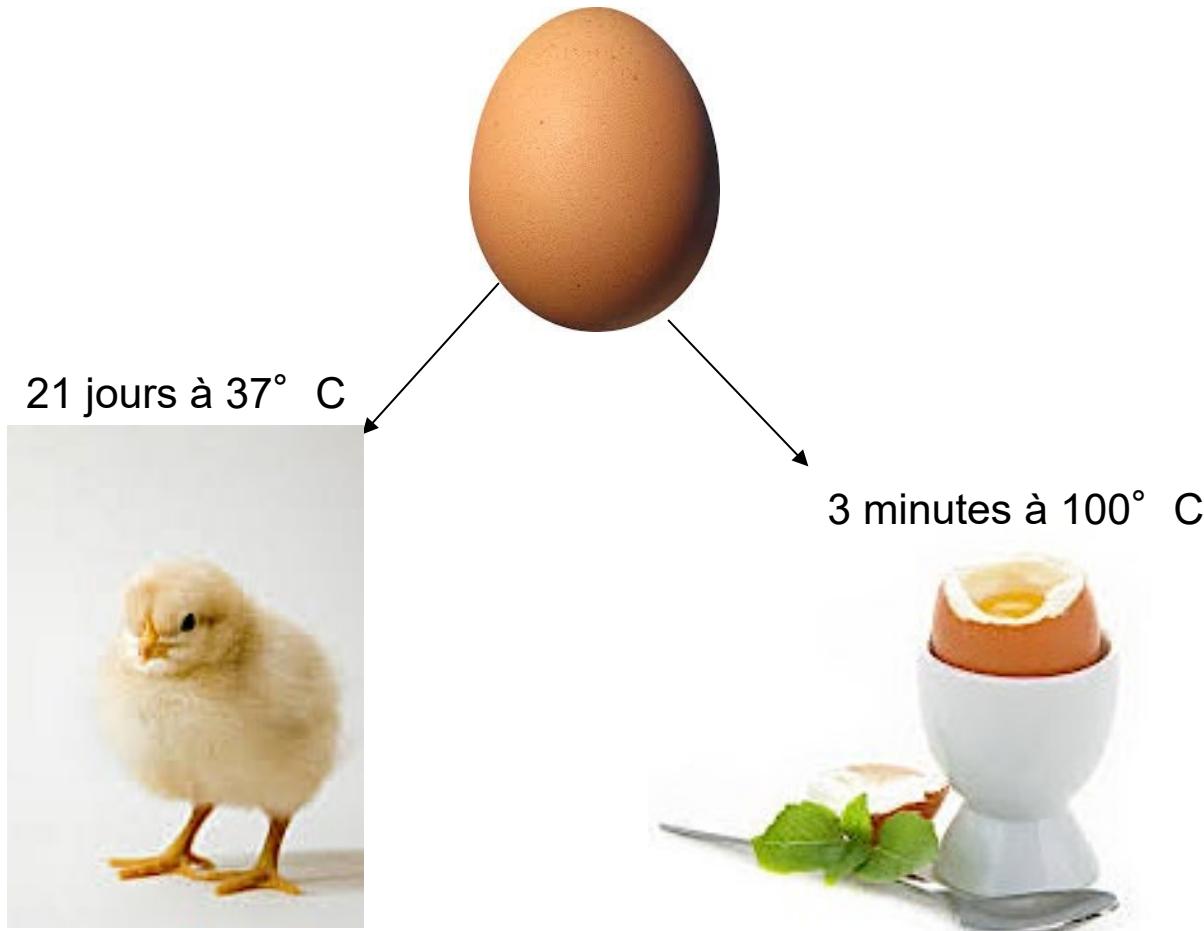
Autres essais: p. ex. essai microbar pour évaluation de la réactivité des granulats  
Prismes 1x1x6 cm dans solution KOH à 150° C

# 6. Réaction Alcali 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 Alcali Granulat (RAG)

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

### Sommiers précontraints

**Constat:** faïençage du béton aux extrémités:



- Coulé en 1967
- Sommiers précontraints
- La RAG n'a pas été prise en considération à cette époque pour formuler le béton

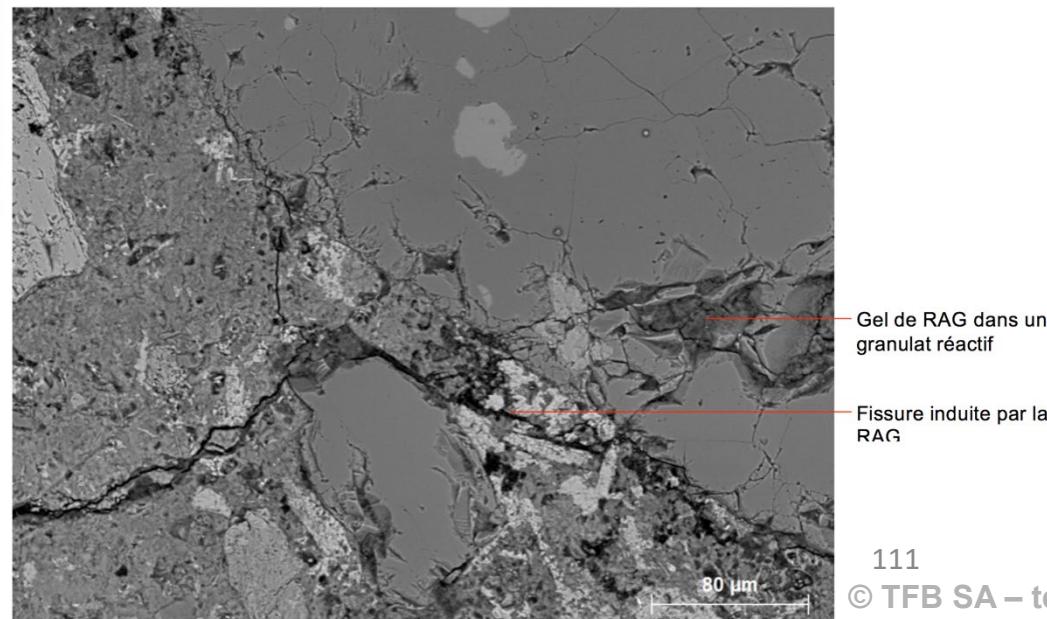
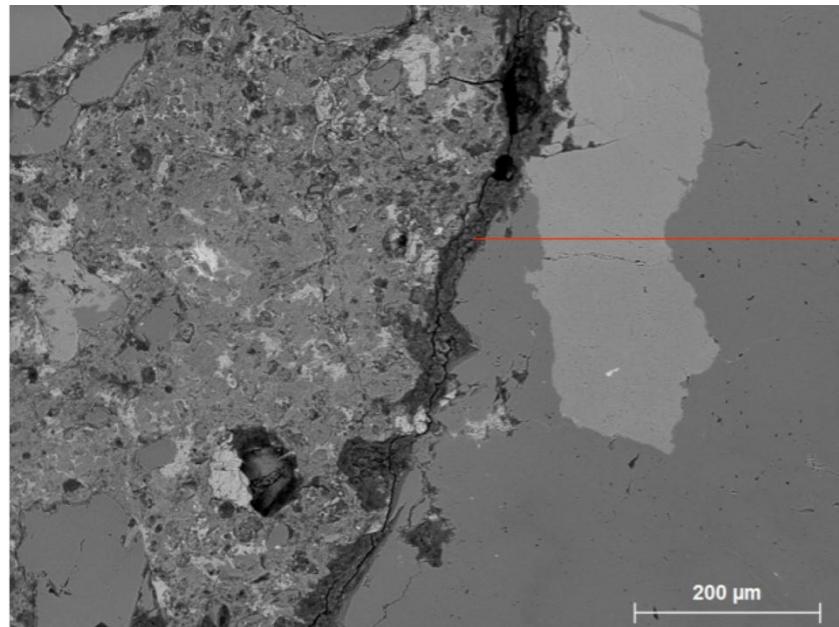


# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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

Analyse du béton après prélèvement de carottes:

-Microscopie électronique à balayage



# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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

Analyse du béton après prélèvement de carottes:

- Module élastique et résistance à la compression

Identification des échantillons	Module-E [N/mm <sup>2</sup> ]	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]
8.1	14500	2360
8.2	13200	2390
8.3	14200	2320
<b>Moyenne:</b>	<b>14000</b>	<b>2360</b>
<i>Ecart-type:</i>	680	30

**Remarques:**

Charge minimum: 0.6 [N/mm<sup>2</sup>]  
Charge maximum: 7.0 [N/mm<sup>2</sup>]  
Résistance à la compression: 8.1: 29.5 [N/mm<sup>2</sup>]  
8.2: 31.5 [N/mm<sup>2</sup>]  
8.3: 31.2 [N/mm<sup>2</sup>]

La résistance à la compression n'a pas beaucoup évolué

Le module élastique d'un tel béton est environ 2x plus élevé sans dégradation (ordre de grandeur)

# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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

### Diagnostic:

- RAG avancée ayant déjà affecté les propriétés mécaniques du béton (module élastique)
- L'analyse microscopique a révélé la présence de silice amorphe en quantité suffisante pour que la réaction continue

- **Réduire l'apport d'eau sur les sommiers** (attention à ne pas emprisonner l'eau avec un enduit étanche!)
- Tester l'expansion résiduelle du béton
- Surveiller la structure par monitorage. (fissures déjà orientées sur les sommiers)
- Estimer l'augmentation de contrainte sur les câbles dû à l'expansion

# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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

### Exemple 2:

- 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 Alcali Granulat (RAG)

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

### Exemple 3:

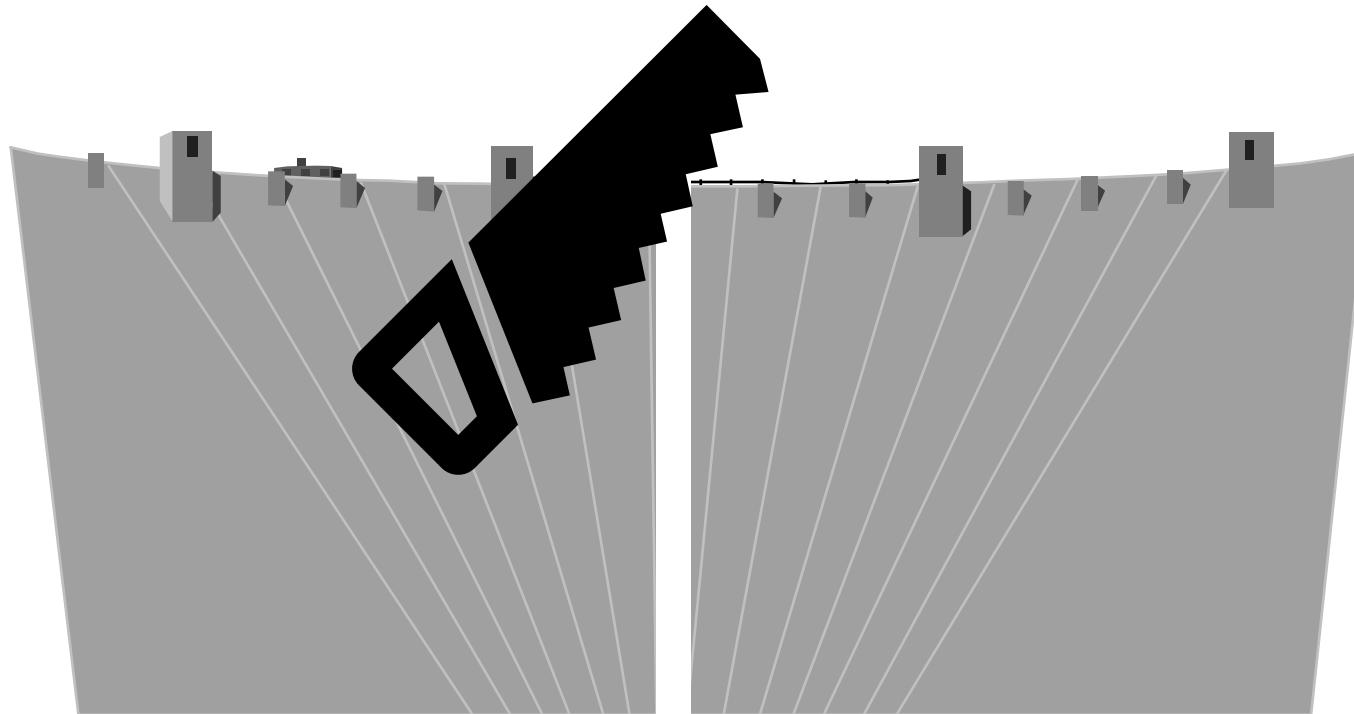
#### Barrage

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
- Conditions optimales pour la RAG

# 6. Réaction Alcali 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 Alcali Granulat (RAG)

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

Barrage de Chambon, France



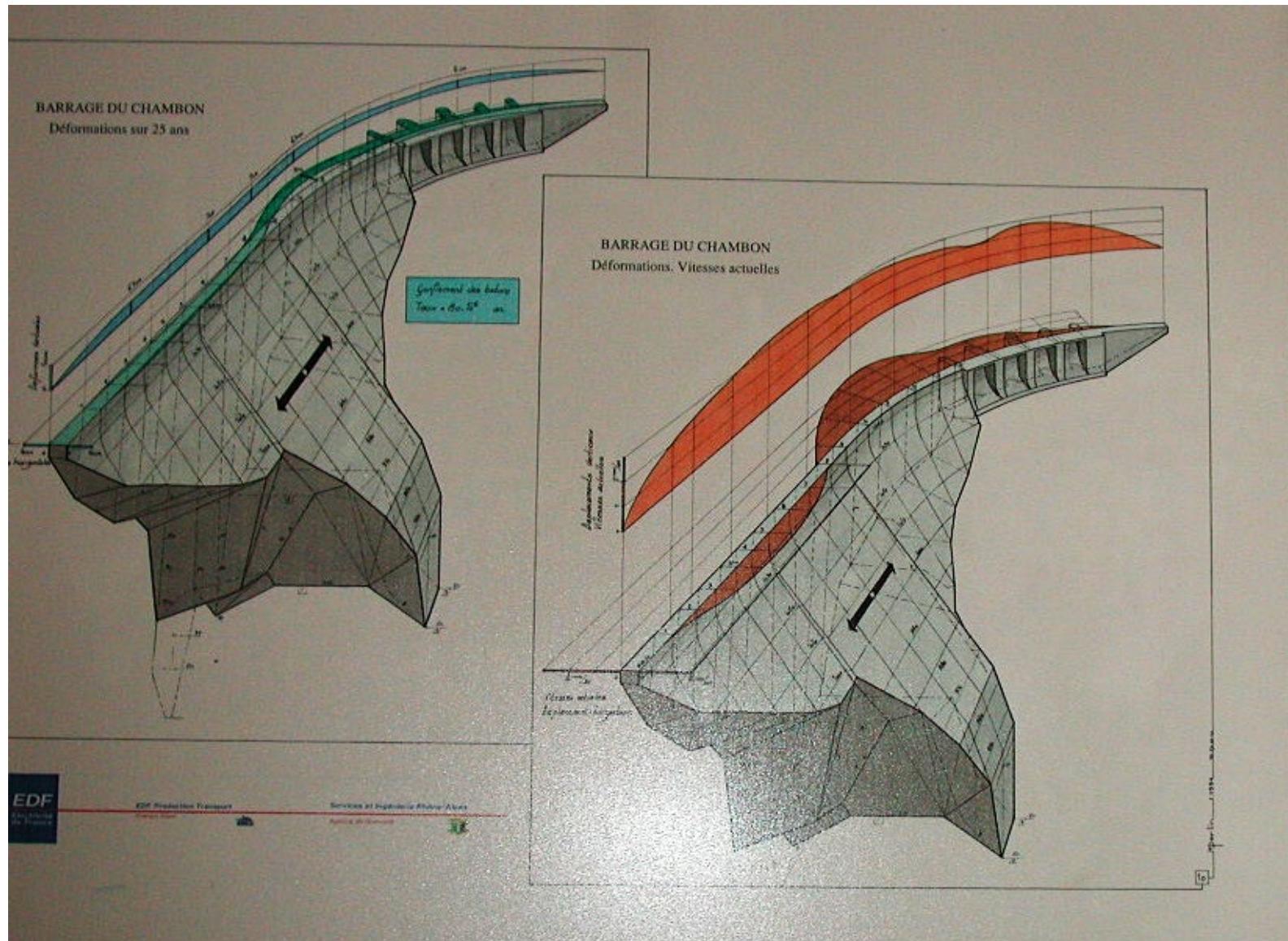
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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



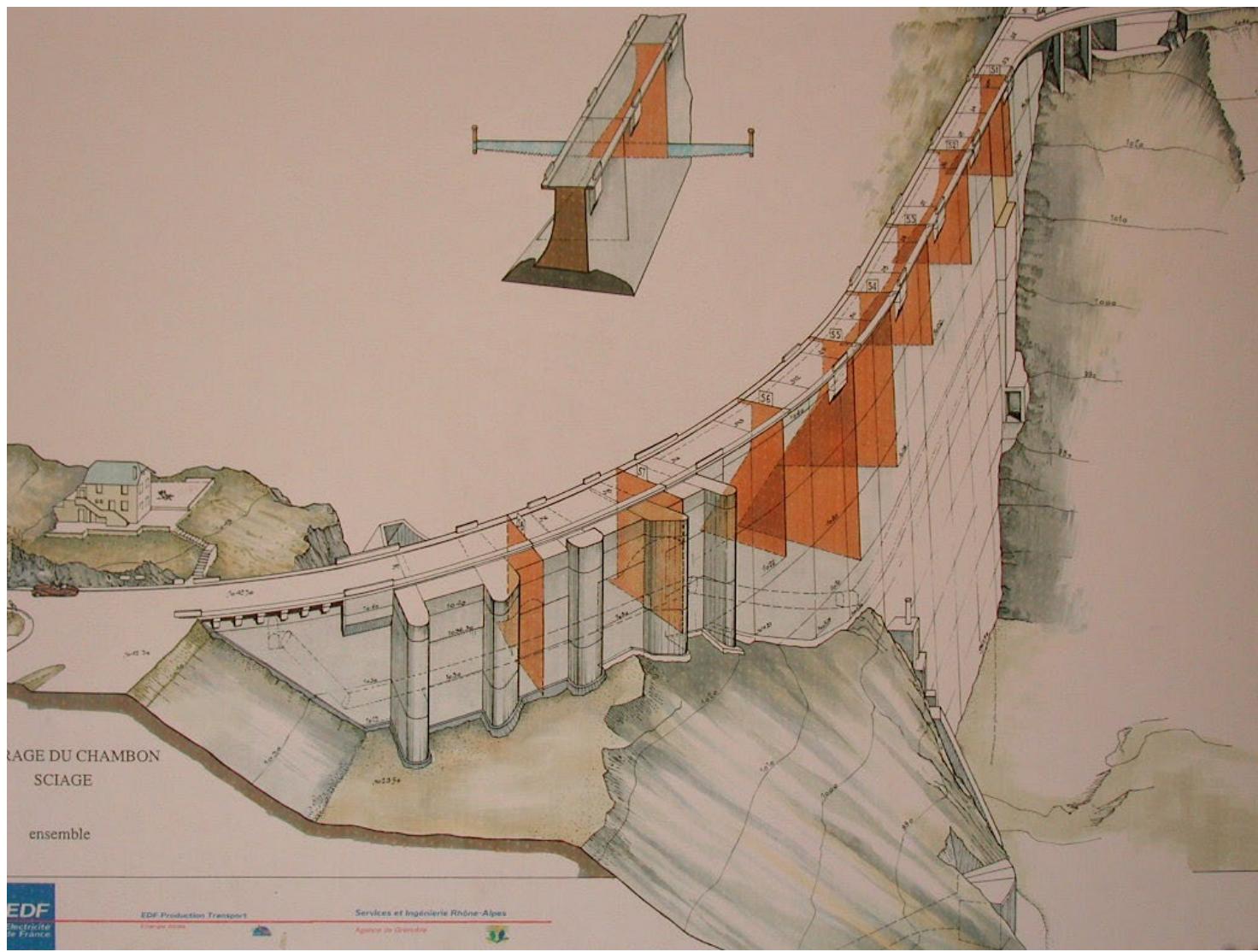
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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



## 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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



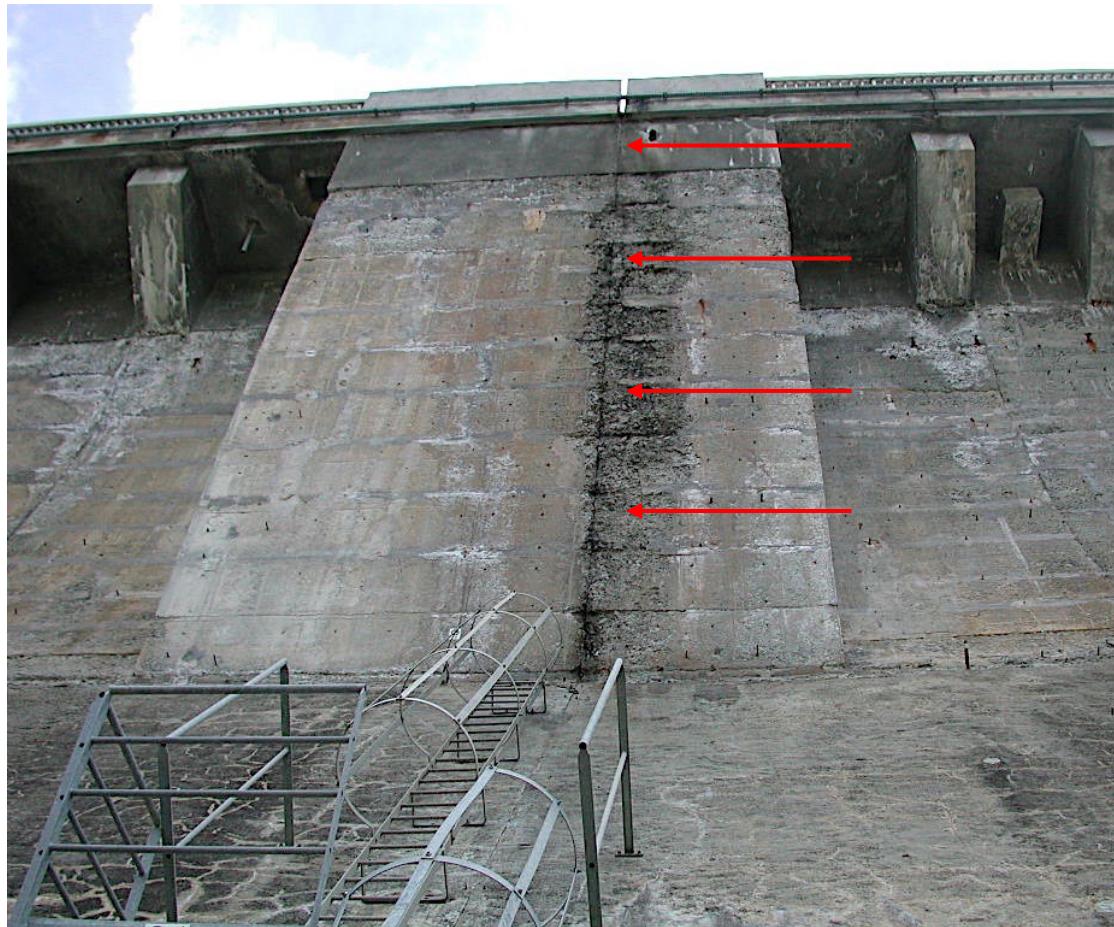
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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



# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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



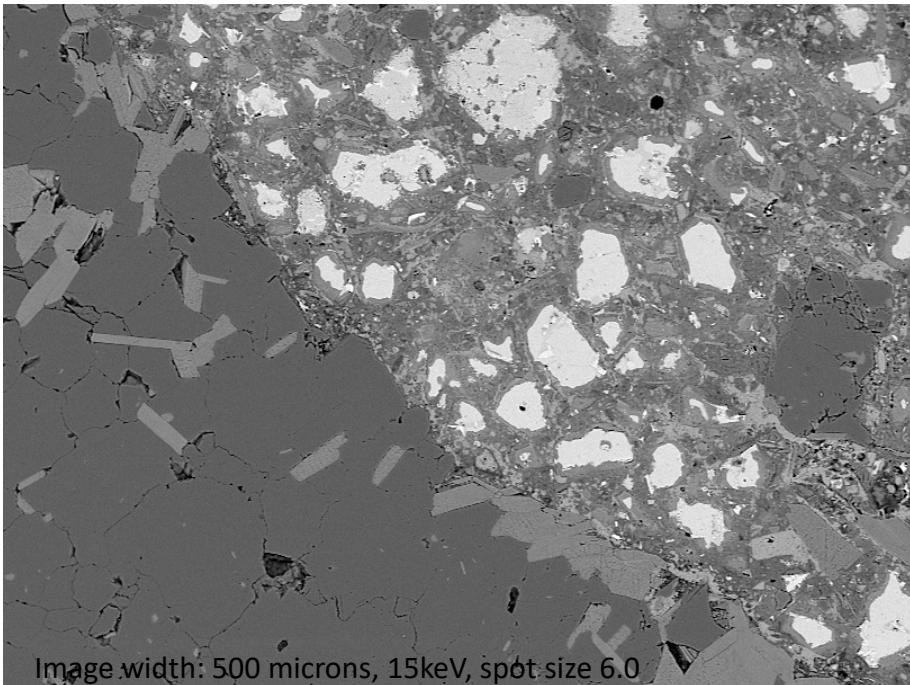
# 6. Réaction Alcali Granulat (RAG)

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



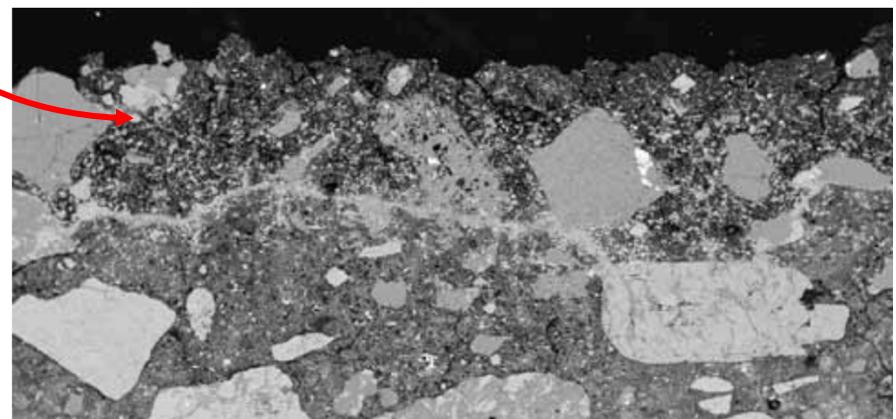
# 7. Attaques acides

## 7.1. attaques acides : mécanisme



Pâte de ciment :

- pH supérieur à 12.5
- La présence d'acide contre la peau du béton engendre une dissolution de la pâte
- La première phase à être dissoute est la Portlandite
- Il en résulte une porosité de la pâte de ciment qui favorise la progression de la dissolution dans la pâte



# 7. Attaques acides

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



# 7. Attaques acides

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

### 6. Attaques chimiques

Lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface, les eaux souterraines, comme indiqué au Tableau 2, les classes d'exposition doivent être données ci-après. La classification de l'eau de mer dépend de la localisation géographique, par conséquence la classification valide sur le lieu d'utilisation du béton s'applique.

**NOTE** Une étude particulière peut être nécessaire pour déterminer la classe d'exposition adéquate dans les environnements tels que :

- n'entrant pas dans les limites du Tableau 2 ;
- contenant d'autres substances chimiques agressives ;
- sol ou eau polluée chimiquement ;
- présentant une vitesse d'écoulement de l'eau élevée, en combinaison avec certaines substances chimiques du Tableau 2.

XA1	Environnement à faible agressivité chimique, selon le Tableau 2	
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée, selon le Tableau 2	
XA3	Environnement à forte agressivité chimique, selon le Tableau 2	

# 7. Attaques acides

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

### Exemple 1:

#### Conduites et bassins d'eaux usées

Dégradation observée dans de nombreuses STEP

Phénomène corrosif lié à une attaque acide provenant du biofilm qui se forme à la surface du béton

Baisse du pH dans le biofilm de surface (due au CO<sub>2</sub> acide créé par les micros organismes contenus dans le biofilm)

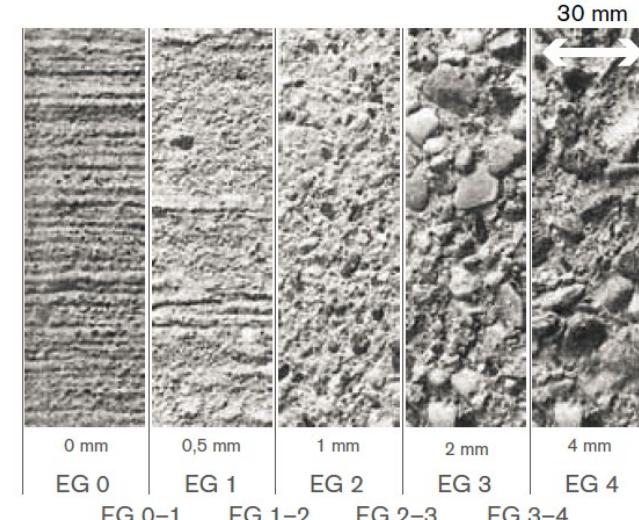
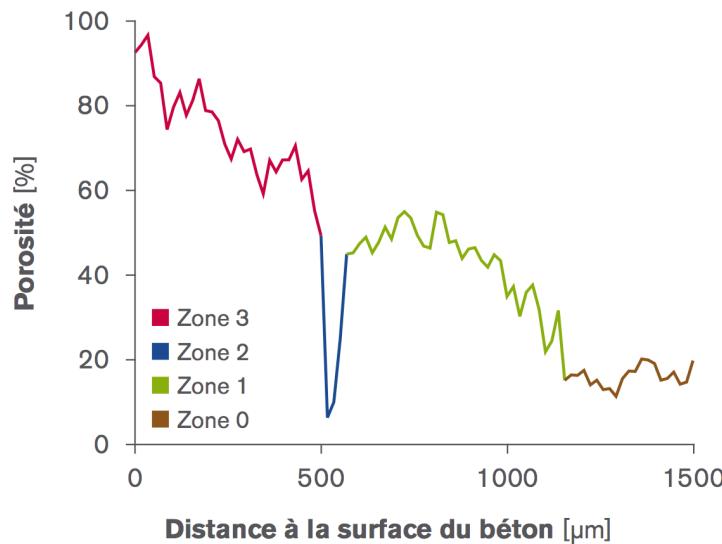
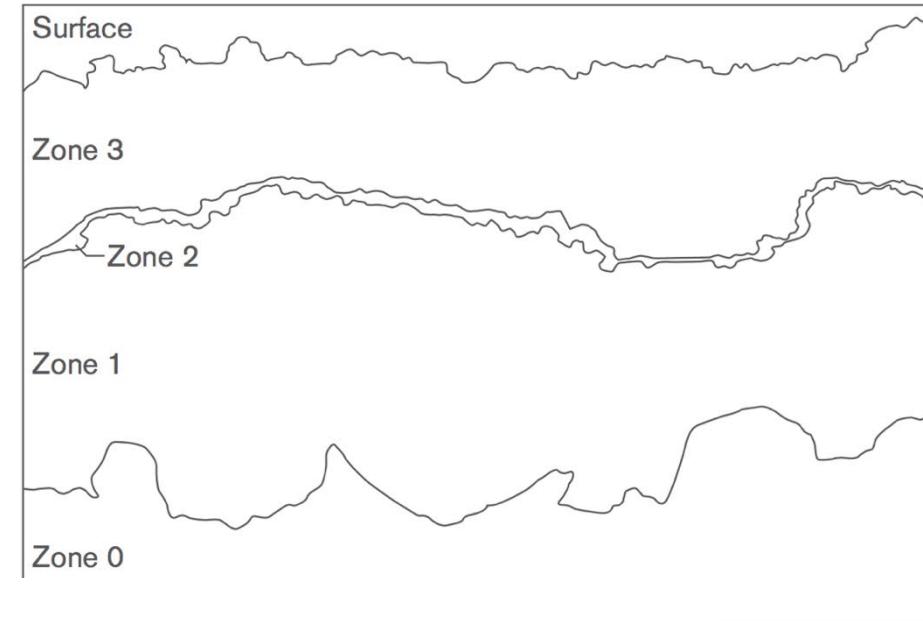
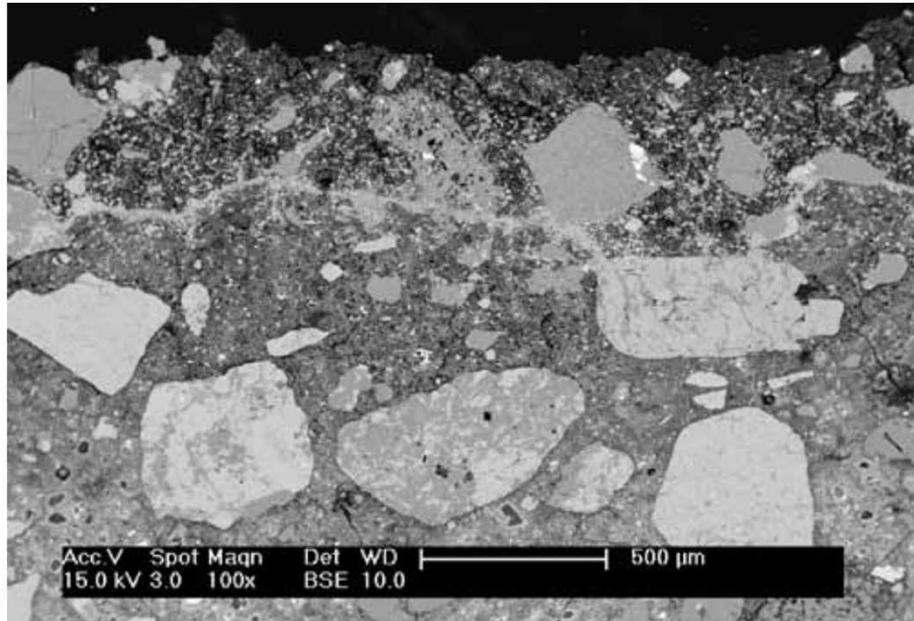
Dissolution acide de la pâte de ciment.



# 7. Attaques acides

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

### Exemple 1:



# 7. Attaques acides

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

### Exemple 1:

Conduites et bassins d'eaux usées

#### → **Ouvrages existants:**

Réduire au maximum l'érosion de surface (éviter le nettoyage de surface au maximum)

#### → **Nouveaux ouvrages:** béton de classe XAA

XAA(CH) est une nouvelle classe d'exposition établie spécifiquement pour une agression chimique de type STEP. Elle prévoit un béton qui correspond aux exigences de composition de la classe XD3.

# 7. Attaques acides

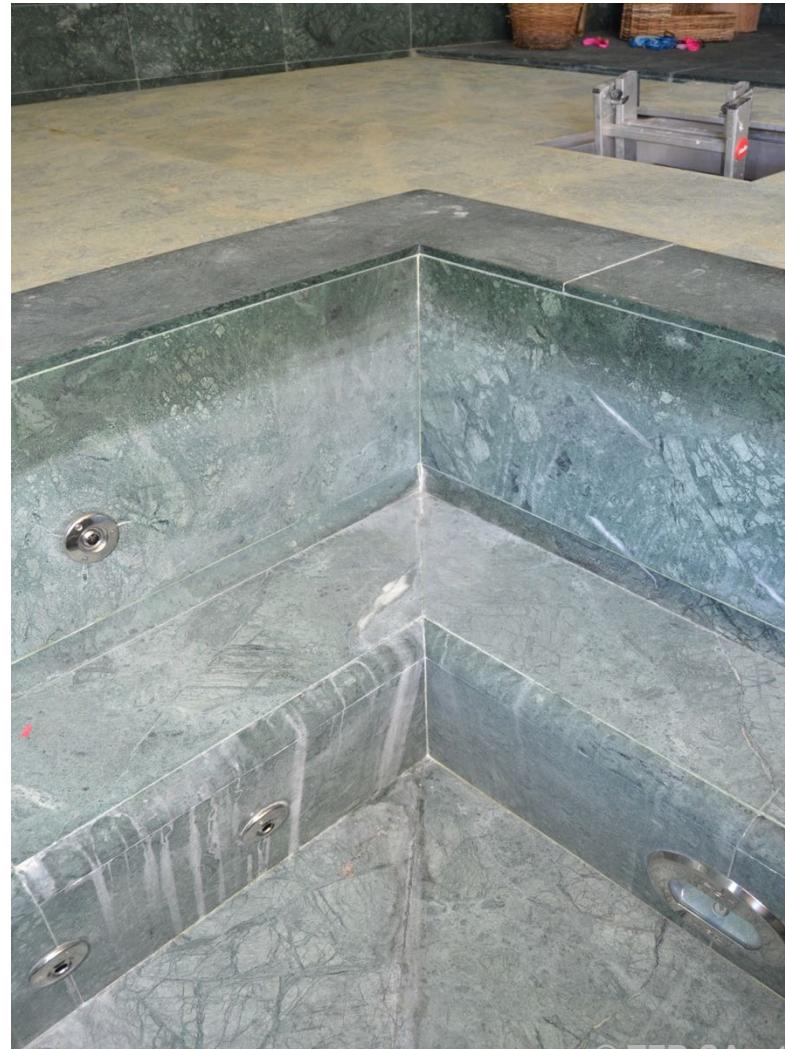
## 7.3. cas d'attaque acide sur ouvrage : diagnostic et remise en état

Exemple 2:

### Piscine intérieure

**Constat:** coulures de carbonate de calcium sur le dalles depuis les joints

-carreaux collés avec une colle à base de ciment Portland en 2012



# 7. Attaques acides

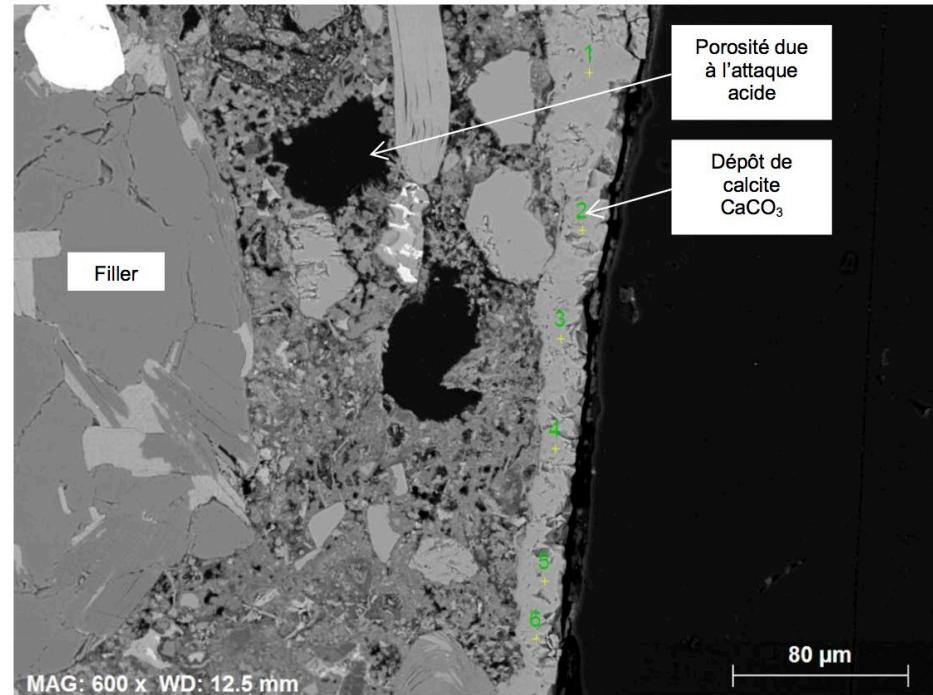
## 7.3. cas d'attaque acide sur ouvrage : diagnostic et remise en état

### Exemple 2:

Analyse du pH de l'eau du bassin: pH = 5

Analyse du béton après prélèvement de carottes:

-Microscopie électronique à balayage



points	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
	[%at.]										
1	74.63	0.15	0.07	0.14	0.07	0.04	0.05	0.00	24.83	0.02	0.00
2	75.25	0.23	0.12	0.11	0.15	0.04	0.03	0.01	24.05	0.02	0.00
3	75.29	0.24	0.10	0.18	0.18	0.00	0.03	0.00	23.94	0.00	0.04
4	75.39	0.39	0.13	0.19	0.19	0.00	0.02	0.01	23.67	0.02	0.00
5	74.20	0.26	0.14	0.16	0.12	0.00	0.03	0.03	25.00	0.04	0.00
6	76.25	0.34	0.15	0.17	0.17	0.00	0.00	0.03	22.83	0.06	0.00

## 7. Attaques acides

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

Exemple 2:

Diagnostic:

-attaque de la colle à base de ciment portland du à l'acidité de l'eau du bassin (pH 5)

→**changer le pH de l'eau, faire attention au type de produit de nettoyage pouvant influencer le pH**

## 8. L'essentiel – quelques 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-il? Pourquoi?
- Expliquez le phénomène de dégradation par gel-dégel dans un béton
- Quels facteurs doivent être réunis pour initier une réaction alcali-granulats?