



# **Principales agressions et attaques du béton**

---

*Structure et propriétés du béton*

---

*Corrosion des armatures ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ )*

---

*Attaques sulfatiques*

---

*Alcali-réaction*

---

*Gel / Dégel*

---

*Lixiviation*

---

# Structure et propriétés du béton béton

## Constituants du béton armé

- squelette granulaire : gravillons, sables
- matrice cimentaire : ciment, eau
- armature en acier

## Propriétés du béton armé

- résistance mécanique
- esthétisme et qualité du parement
- durabilité (propriétés de transfert) :
  - porosité
  - fissuration

## L'environnement béton armé

- exposition (gel, saumure, eaux agressives...)
- sollicitations mécaniques (charges...)

# PATHOLOGIE DU BÉTON

## DYSFONCTIONS MÉCANIQUES

### DE LA FABRICATION ET LA MISE EN PLACE

- GRANULÉS
- DOSAGE (CIMENT, E/C, ADDITIFS, AJOUTS)
- COMPACTATION ET DURCI
- ARMATURES (MONTANT, REVÊTEMENT, SITUATION)
- RETRAIT HYDRAULIQUE
- RETRAIT THERMIQUE

### CAUSES PHYSIQUES

- DEMANDES MÉCANIQUES
- GLACÉES
- FEU

## DYSFONCTIONS DU MATÉRIEL AU LONG DU TEMPS:

### CAUSES CHIMIQUES-PHYSIQUES

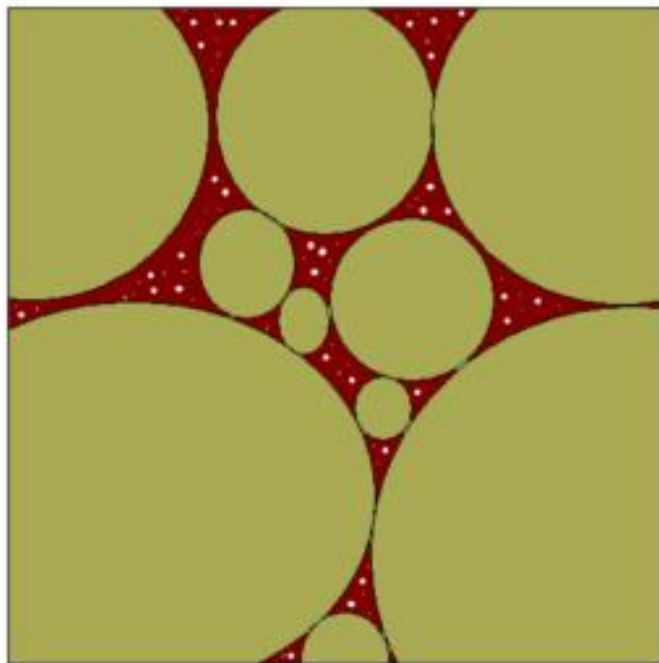
- CARBONATATION
- LIXIVIATION
- CO<sub>2</sub> AGRESSIF
- SULFATES
- CORROSION (Cl)

### MAUVAISE UTILISATION

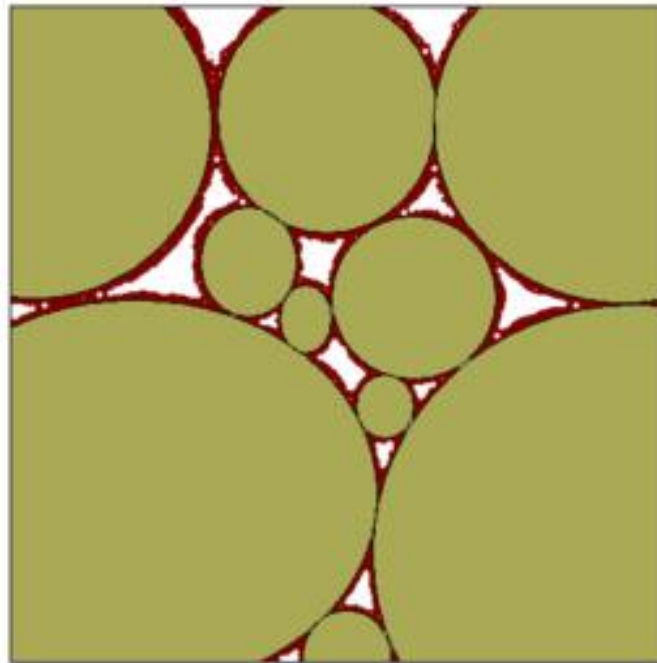
- PERTES DE SECTION
- SURCHARGES

## IMPORTANCE DES RELATIONS

$$V_{HA} \longleftrightarrow V_{ma}$$

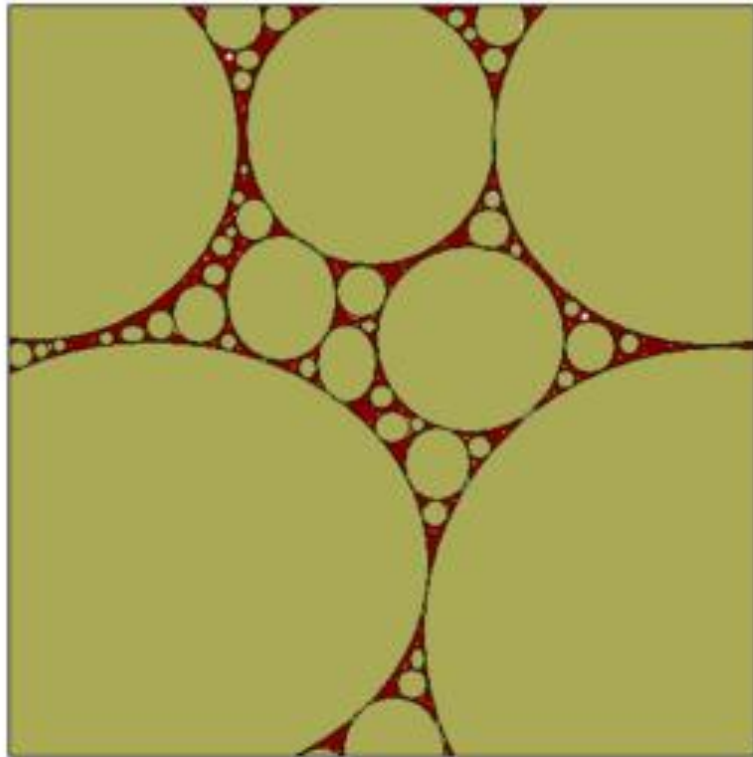


$$V_{HA} = V_{m.a.}$$

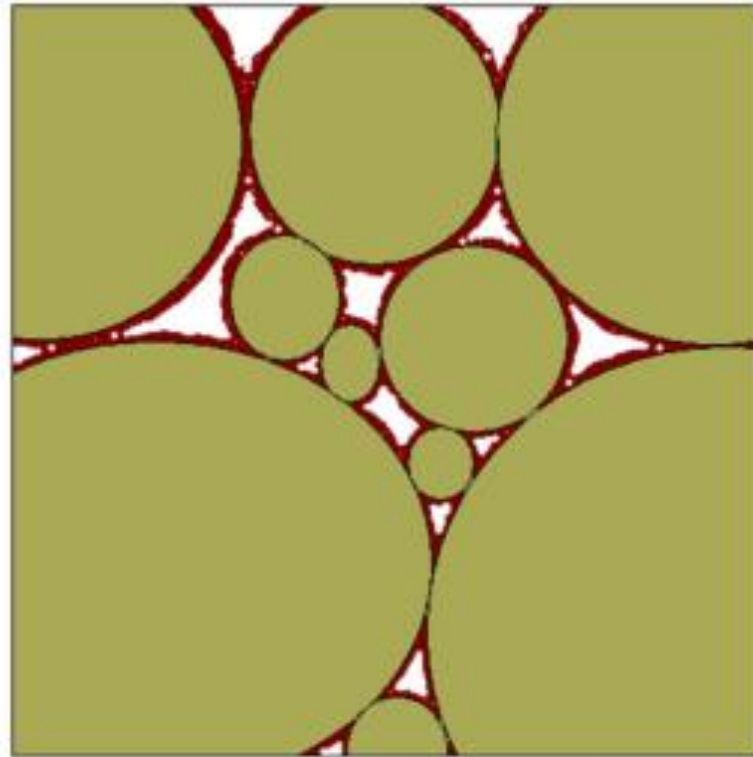


$$V_{HA} > V_{m.a.}$$

## IMPORTANCE DE LA GRANULOMÉTRIE

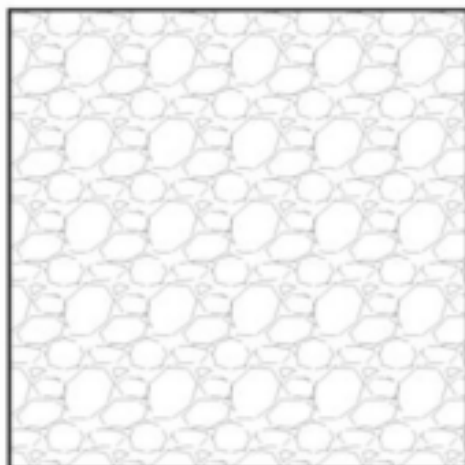


$$V_{HA} = V_{m.a.}$$



$$V_{HA} > V_{m.a.}$$

## POROSITÉ DU BÉTON



$\delta_c$	DENSITÉ DU BÉTON	2 T/m <sup>3</sup>
C	COMPACITÉ DES GRANULÉS	68%
V <sub>ha</sub>	VOLUME DE VIDES DES GRANULÉS	32%
	CIMENT	300Kg/m <sup>3</sup>
A/C	RAPPORT EAU/CIMENT	0.7
	EXCÈS D'EAU	0.4

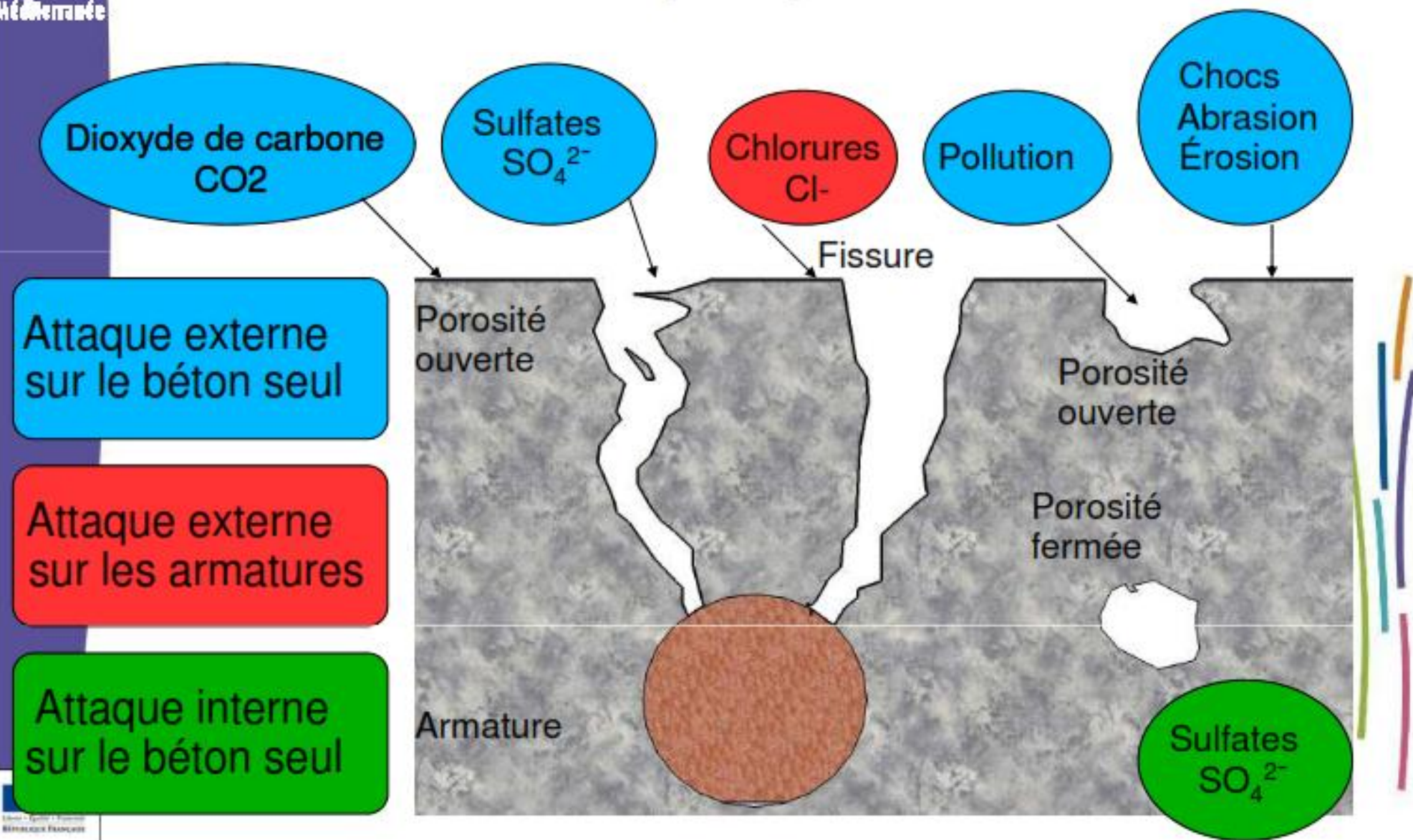
### POUR 1m<sup>3</sup> DE BÉTON

0.32 m <sup>3</sup>
0.097 m <sup>3</sup>
0.21 m <sup>3</sup>
0.12 m <sup>3</sup>

## POROSITÉ DES MORTIERS (CIMENT PORTLAND ET CHAUX)

25, 30, 40 %.....

# Structures et propriétés du béton





# Les mécanismes de dégradation

On distingue 5 grands mécanismes de dégradation.

- La corrosion des armatures
- Les attaques sulfatiques
- L'alcali-réaction
- Les cycles de gel / dégel
- La lixiviation



# Corrosion des armatures

## Origines de la corrosion

- pénétration des ions chlorure dans l'enrobage
- carbonatation du béton d'enrobage

Phénomène  $\pm$  rapide selon propriétés de transfert du béton d'enrobage :

- porosité de la matrice cimentaire
- compacité globale
- fissuration
- qualité du parement



# La corrosion des armatures

Elle comporte deux phases.

Première phase : l'incubation

les éléments agressifs pénètrent dans le béton.

Seconde phase : la propagation

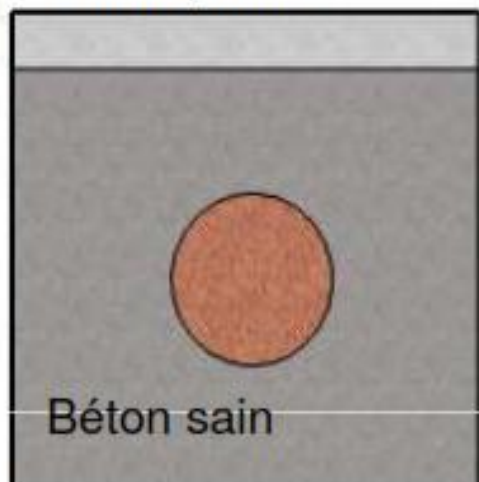
lorsque ces corps agressifs se trouvent à des concentrations assez fortes au niveau des armatures. Elle correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.



# La corrosion des armatures

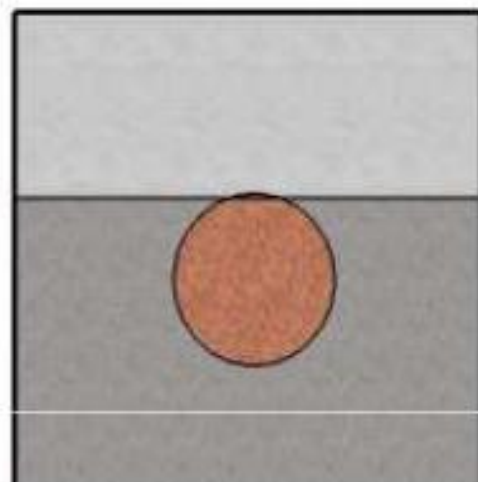
Stade  
d'incubation

Béton pollué



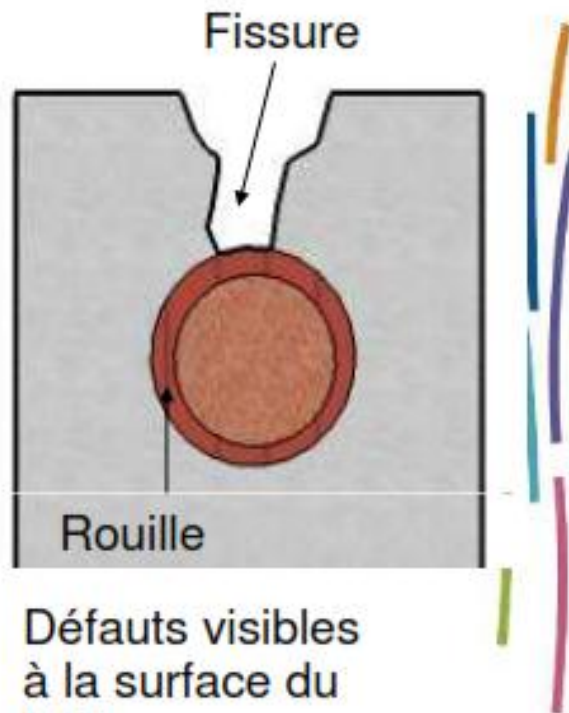
Aucune  
dégradation  
visible

Stade de  
propagation



Défauts difficiles  
à détecter

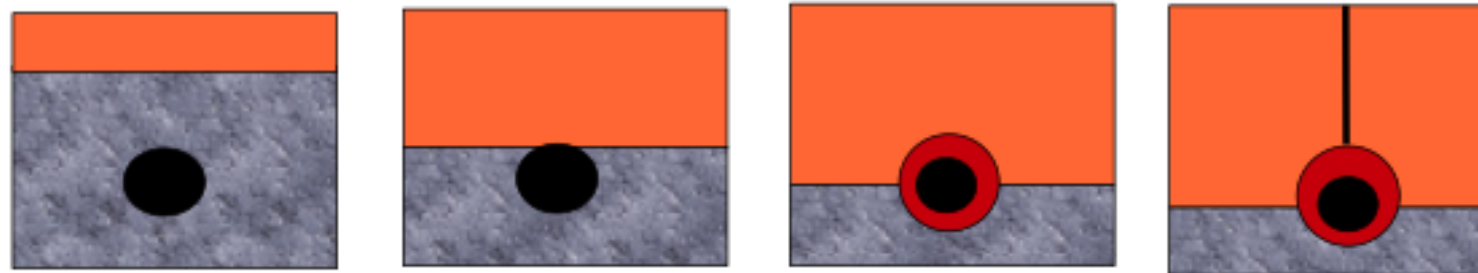
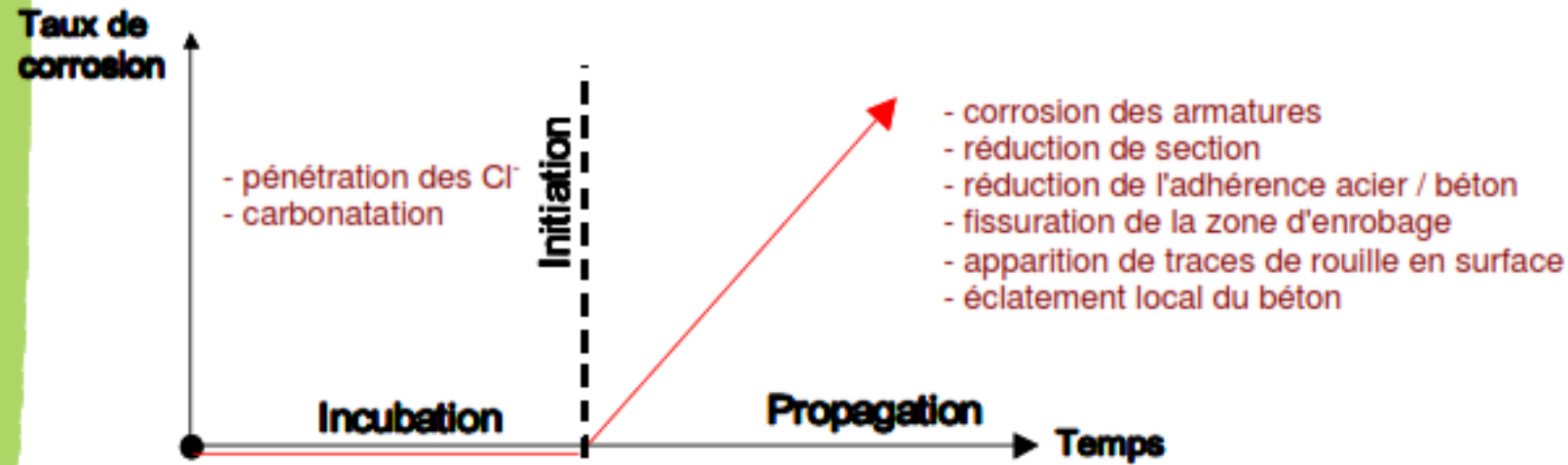
Stade de  
fissuration



Défauts visibles  
à la surface du  
béton

# Corrosion des armatures

## Processus de corrosion



# Processus de corrosion

Taux de corrosion

Initiation

- . pénétration de Cl-
- . carbonatation

- . corrosion des armatures
- . réduction de section
- . réduction de l'adhérence acier / béton
- . fissuration de la zone d'enrobage
- . trace de rouille en surface
- . éclatement local du béton

Incubation

Propagation

Temps



# La corrosion des armatures

Les agents agressifs les plus fréquents sont les eaux pures, les chlorures dans l'eau et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans l'atmosphère.

## Origines principales de la corrosion

- La carbonatation
- La pénétration des chlorures



# La carbonatation

Le CO<sub>2</sub> peut être dissous par la solution interstitielle du béton, et réagir avec certains composés calciques pour former des carbonates (carbonatation). Il en résulte une baisse du pH de la solution interstitielle du béton (de 12 à 9).

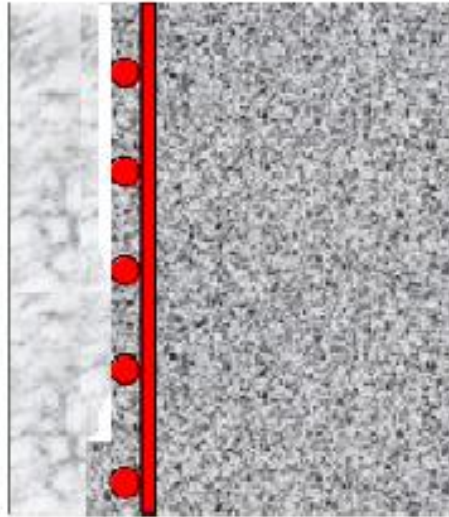
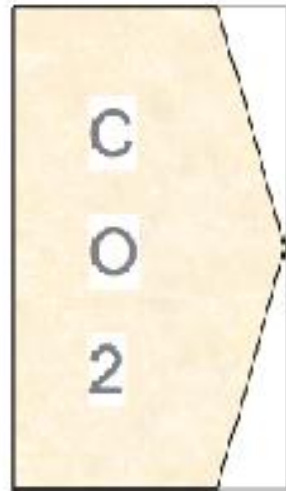
La pénétration du dioxyde de carbone dans le béton est un phénomène de diffusion. Elle est rapide lorsque le béton est assez sec. Mais la réaction de carbonatation n'a lieu que s'il reste de la solution interstitielle dans le béton. C'est pourquoi, les conditions les plus favorables à la pénétration du dioxyde de carbone correspondent à une alternance d'humidité et de séchage.





## La carbonatation

Réaction de carbonatation : mécanisme  
(*Ciment*) (*Air*)



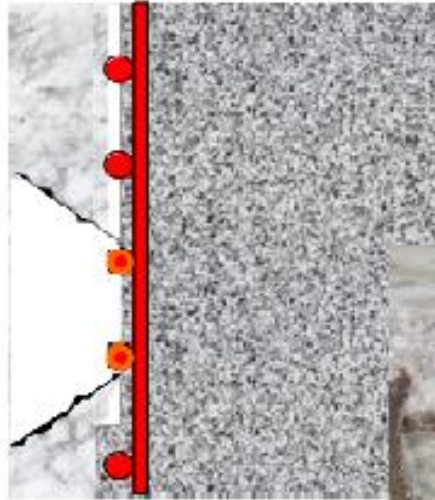
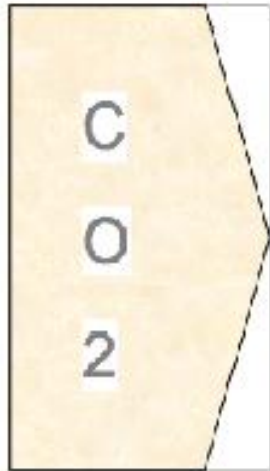
Le béton,  
qui était  
basique,  
devient plus  
acide : les  
armatures  
se  
corrodent



Chaux +  $\text{CO}_2$  ► Calcaire + eau  
pénétration du  $\text{CO}_2$  dans le béton ► transformation  
de la portlandite en carbonates de calcium :  
 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

## La carbonatation

Les produits de corrosion, d'un volume plus important, font fissurer puis éclater le béton



- ▶ Baisse du pH
- ▶ Dépassement des armatures
- ▶ Corrosion



- La réaction chimique du  $\text{CO}_2$  avec les alcalins, en particulier avec la chaux, requiert la présence d'eau. La carbonatation ne peut survenir que si l'humidité relative de l'air est comprise entre 40 % et 95 % environ.

Sondage 1 :  
Profondeur de  
carbonatation : 0 à 10 mm

Sondage 2 :  
Profondeur de  
carbonatation : 0 à 25 mm



*test de phénomène de carbonatation.*



# La pénétration des chlorures

Pénétration des ions Cl<sup>-</sup>

Mécanisme de pénétration :

- entrainement mécanique par l'eau
- gradient de concentration si béton constamment humide

Loi de diffusion :  $\frac{\partial}{\partial t} Cl(x,t) = D \times \frac{d^2}{dx^2} Cl(x,t)$

D : coefficient de diffusion apparent des ions Cl<sup>-</sup>

Sources de Cl<sup>-</sup> :

- constituants du béton (sables, gravillons, adjuvants)
- sels de déverglaçage
- sels marins



# La pénétration des chlorures

## La pénétration des chlorures

La pénétration est généralement favorisée par le béton qui est :

- fissuré,
- mal mis en œuvre,
- pas suffisamment compact (adéquation de la formulation à l'environnement)

La pénétration des chlorures nécessite de l'eau.

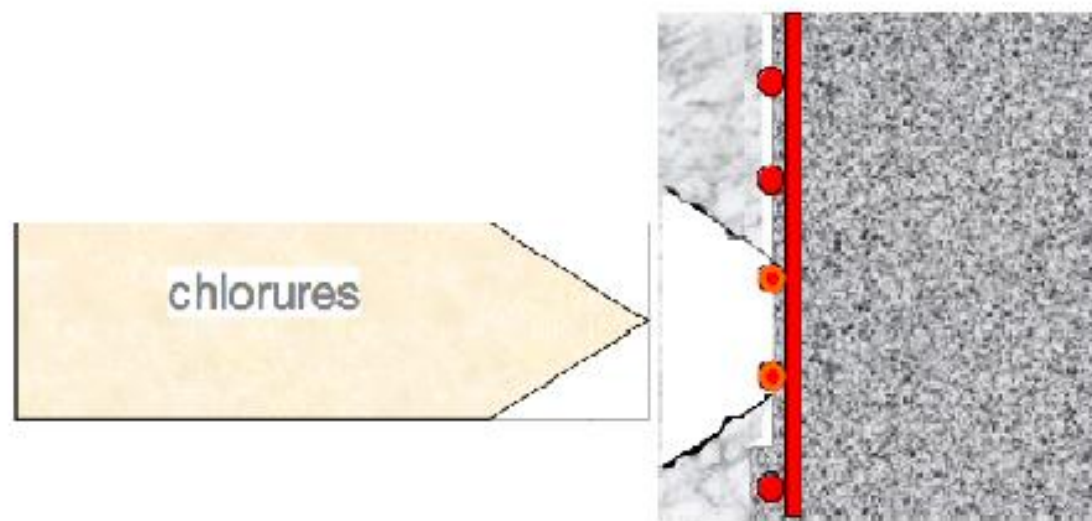
Les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou absorption capillaire.



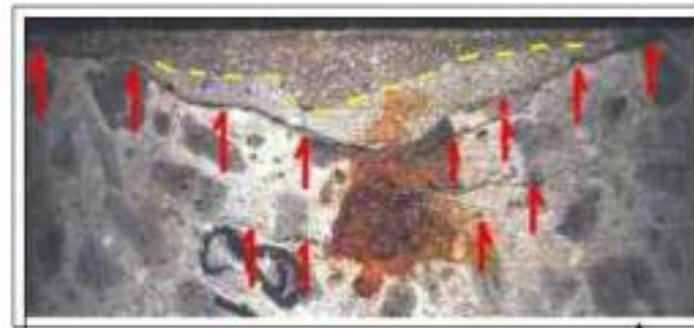
# La corrosion des armatures

## La pénétration des chlorures

Les produits de corrosion, d'un volume plus important, font fissurer puis éclater le béton



# Corrosion des armatures





# La corrosion des armatures





# La corrosion des armatures

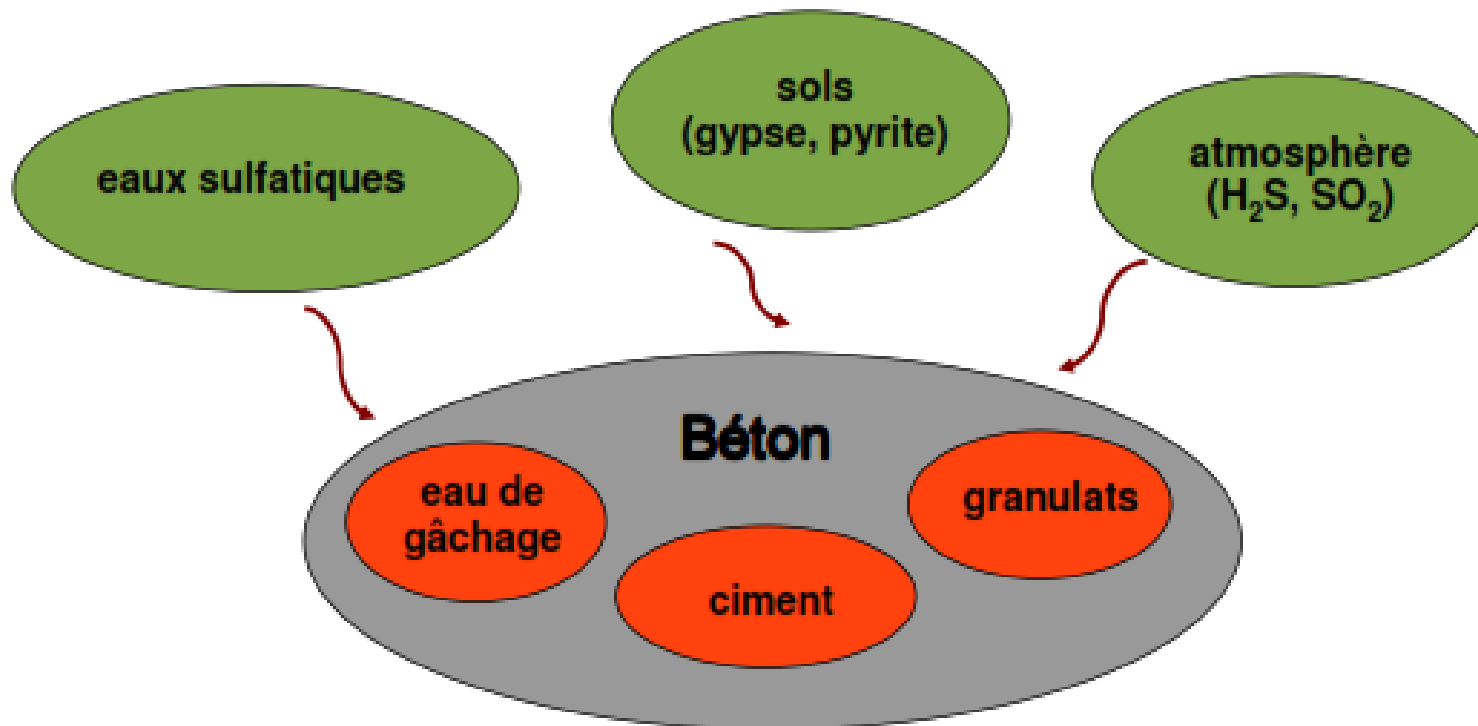


# Attaques sulfatiques

2<sup>ème</sup> risque majeur d'agression chimique pour les bétons

Origine des sulfates :

- externes au béton : sols, eaux, atmosphère
- internes au béton : constituants



## Attaques sulfatiques

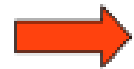
## Attaque sulfatique externe

sulfate de calcium + portlandite  
(eau agressive) (ciment)



gypse secondaire

gypse secondaire + aluminat de calcium  
(ciment)



ettringite



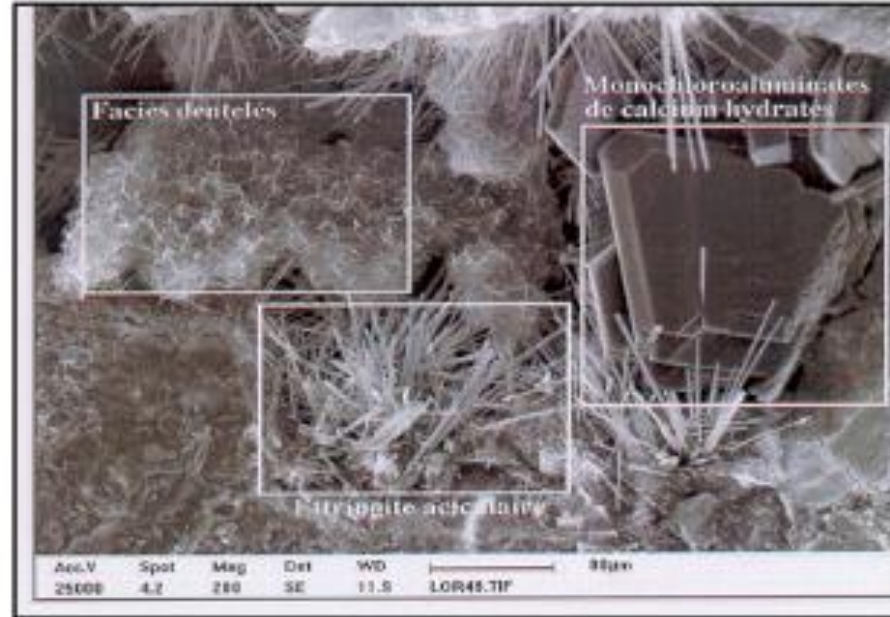
## expansion



# Attaques sulfatiques

## Attaque sulfatique externe

- l'expansion est provoquée par la croissance des aiguilles d'ettringite



- l'expansion se traduit par une fissuration et un éclatement superficiel du béton
- les fissures facilitent la pénétration des agents agressifs et accélèrent le processus de dégradation



# Attaques sulfatiques

## Attaque sulfatique externe



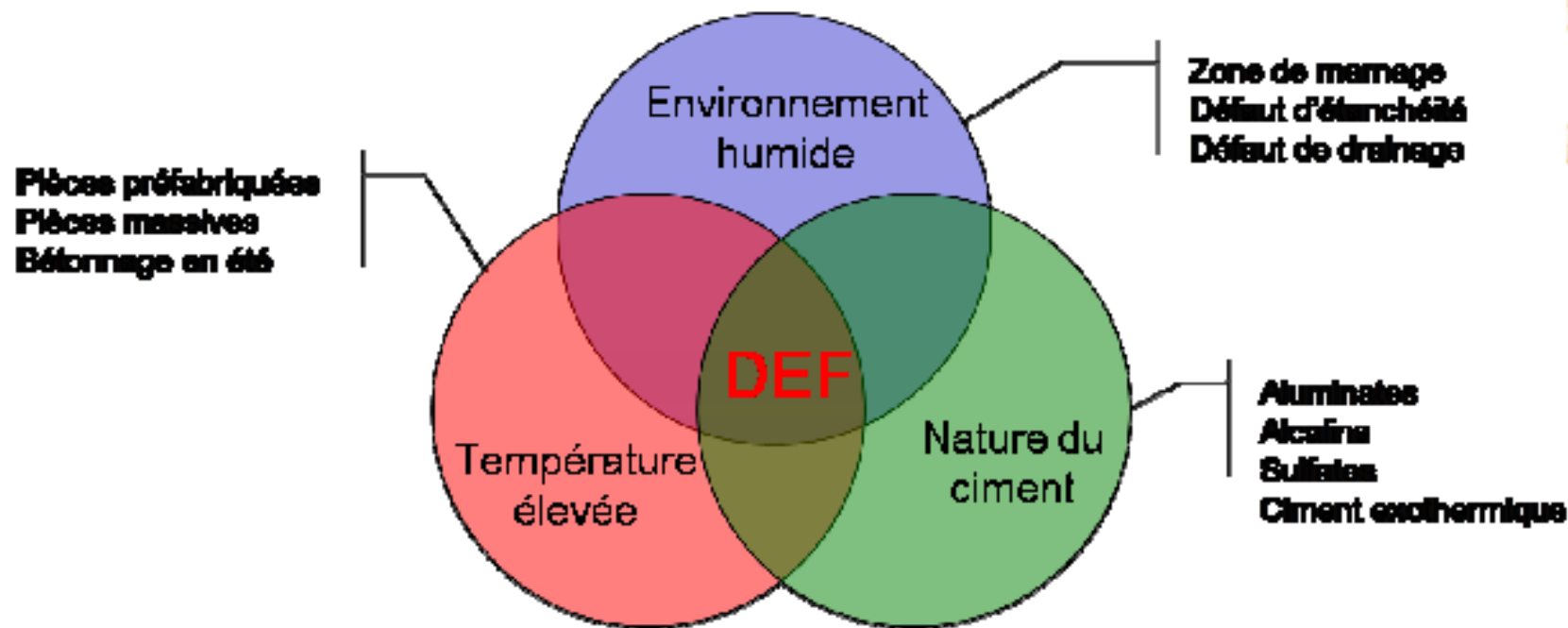
# Attaques sulfatiques

## Réaction sulfatique interne (DEF)

DEF = formation différée d'ettringite

L'origine des sulfates est interne au béton (ciment, granulats...)

3 conditions doivent être remplies pour déclencher la pathologie :

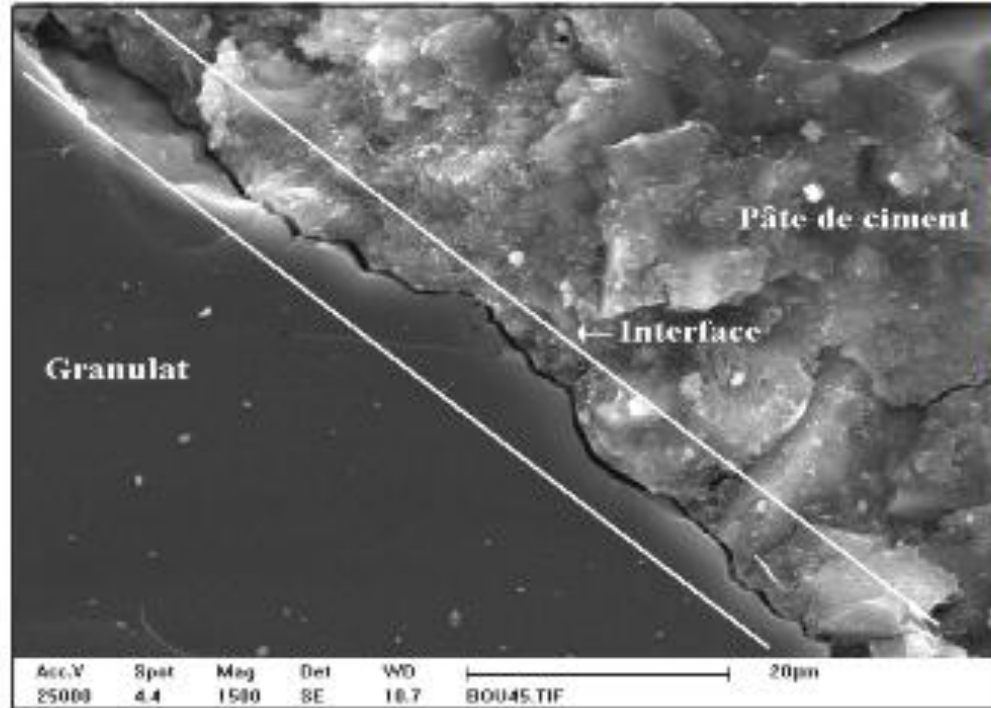
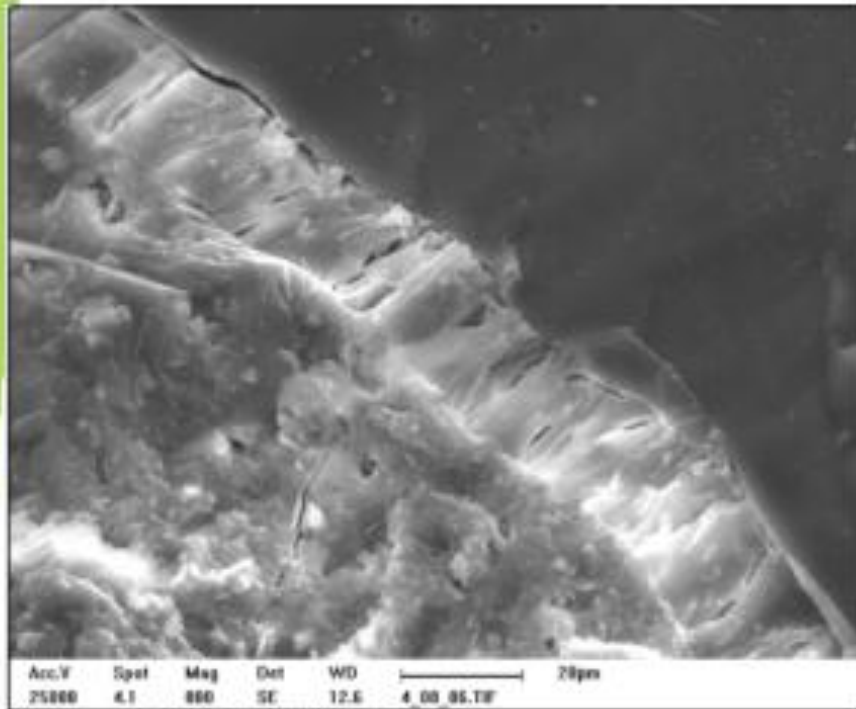


# Attaques sulfatiques

## Réaction sulfatique interne (DEF)

Symptômes :

- gonflement du béton à cœur
- fissuration / faïençage du parement





# Attaques sulfatiques

Réaction sulfatique interne (DEF)



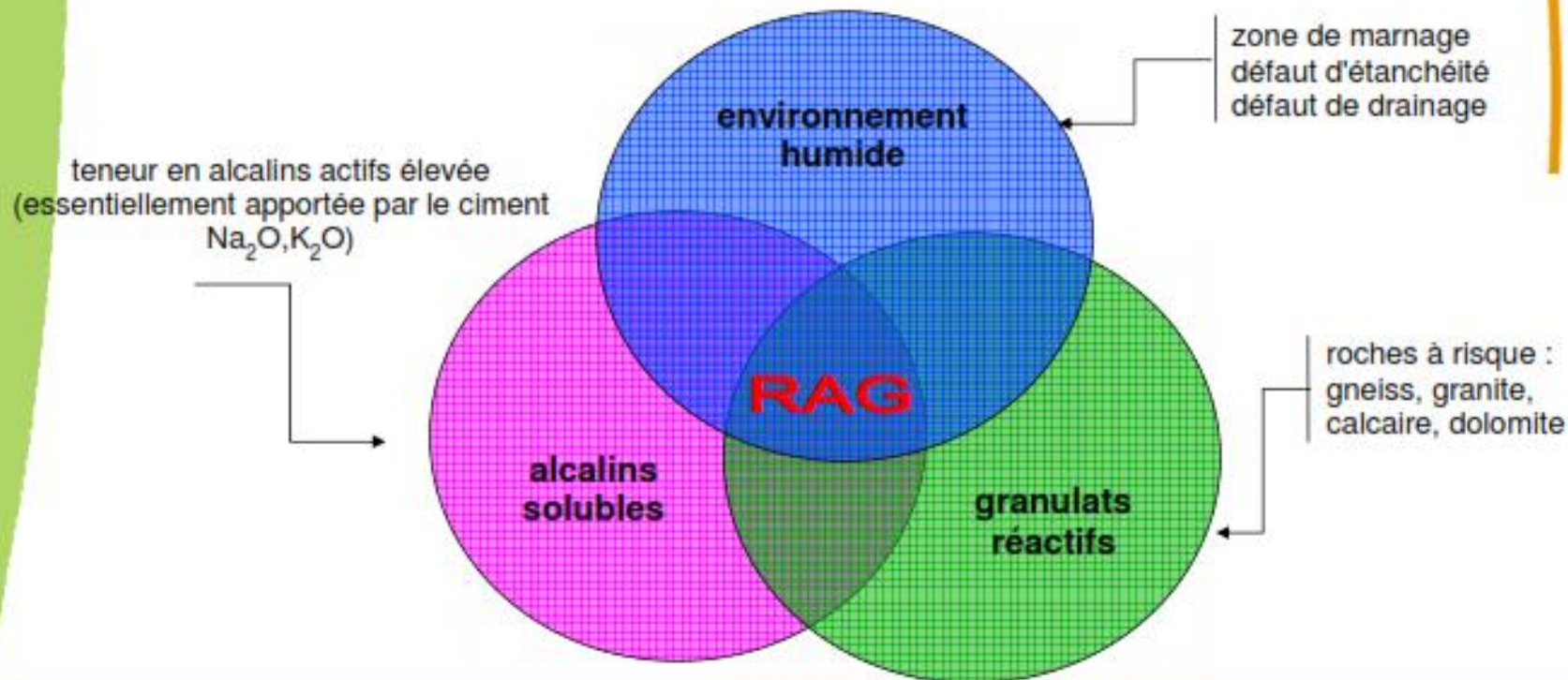


# Alcali-réaction

RAG = réaction alcali-granulat

- réaction entre les alcalins (ciment) et la silice des granulats
- production d'un gel « silico-calco-alcalin » expansif
- fissuration / faïençage du parement

3 conditions doivent être remplies pour déclencher la pathologie :



# Alcali Réaction

Réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment.

Trois conditions doivent être simultanément remplies :

- granulats potentiellement réactifs,
- présence d'eau,
- concentration en alcalins supérieur à un seuil critique.

Trois grands types d'alcali-réactions : réactions alcali-carbonate, alcali-silice et alcali-silicate.

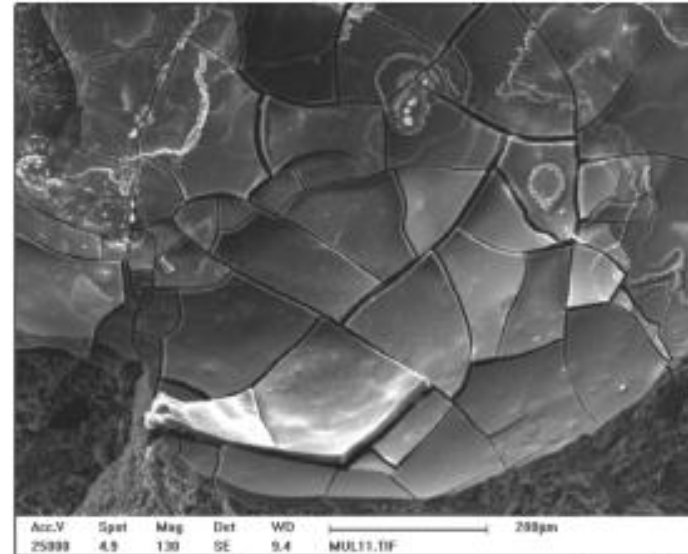
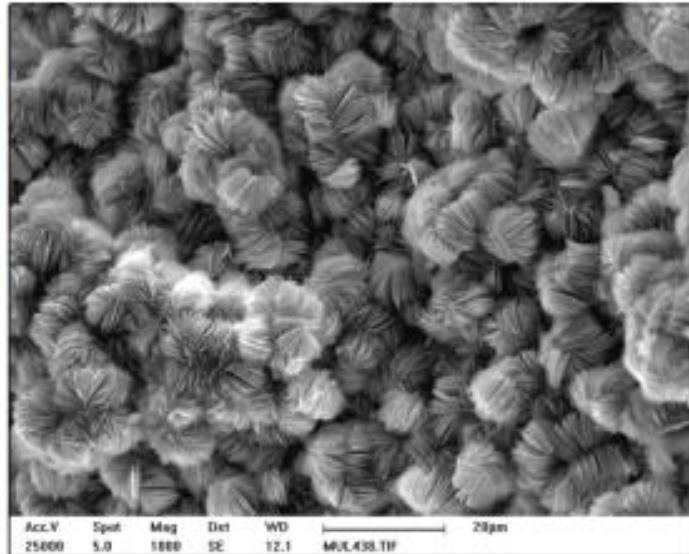
**La réaction la plus fréquente est la réaction alcali-silice.**



# Alcali-réaction

Symptômes :

- apparition des désordres : 2 à 5 ans après la construction (parfois 20 ou 30 ans)



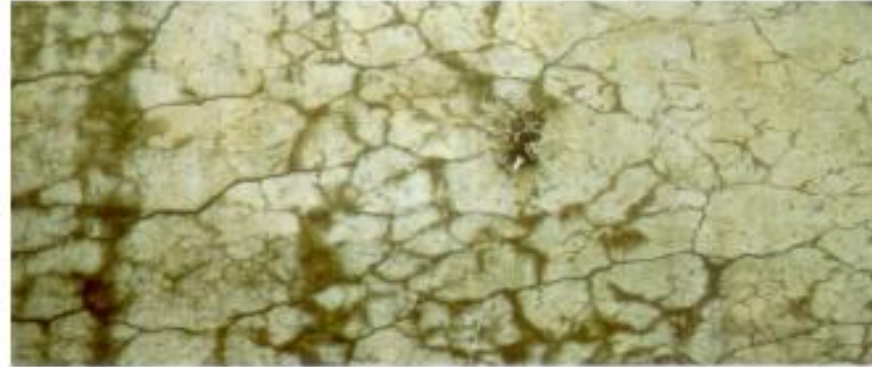
- fissuration en réseau et faïençage
- fissuration orientée
- mouvements, déformations
- ruptures d'armatures
- coloration des parements



# Alcali réaction



## Alcali-réaction



## Alcali-réaction



# Gel / Dégel

- fissuration interne
- gonflement



**gel interne**

éclatement superficielle de la surface  
exposée aux sels de déverglaçage,  
sous forme d'écailles



**écaillage**

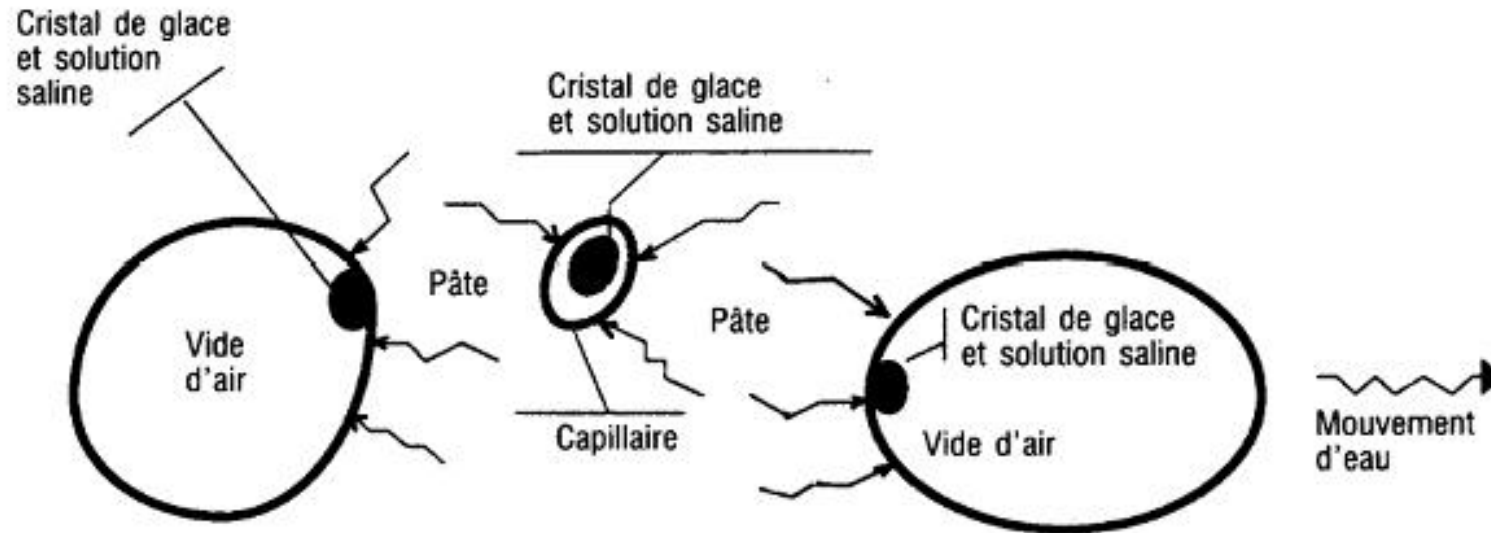




# gel interne

Nécessité de réduire la distance de déplacement de l'eau non gelée pour limiter les pressions dans le béton

- ⇒ incorporation d'un adjuvant entraîneur d'air dans le béton frais
- ⇒ réseau de bulles d'air





- - Processus gel/dégel et gel du béton frais
- - Réactions de gonflement interne : réaction alcali-granulats – réaction sulfatique interne
- - Attaques chimiques telles que par exemple attaques sulfatiques, attaques acides

Lorsque la température extérieure descend en dessous de  $-3^{\circ}\text{C}$ , l'eau contenue dans les pores du béton gèle en commençant par les plus gros pores proches du parement . En gelant, l'eau augmente de volume et provoque une pression hydraulique dans le réseau poreux (degré de saturation dépasse 90%) qui, si elle dépasse la résistance à la traction du béton, provoque la fissuration du béton dans la masse.

Influence combinée du gel et des sels de déverglaçage  
(ouvrages concernés : piles de ponts, talus)

- La réaction du sel avec la glace est une réaction endothermique et crée un refroidissement plus rapide de la structure
- Les sels de déverglaçage provoquent une absorption plus rapide de l'eau
- Le point de congélation de l'eau dépend directement de la teneur en sel

Le schéma.... Illustre le phénomène découlant de ces 3 caractéristiques :

# écaillage

## Action du sel en surface :

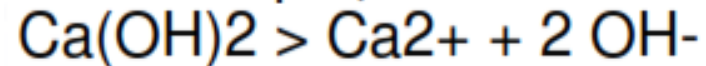
- diffusion des chlorures
  - ⇒ gradient de concentration?
  - ⇒ attaques chimiques ?
- contact fondants/glace
  - ⇒ chocs thermiques ?



# Lixiviation

La lixiviation est la mise en solution de certains constituants du béton.

Par exemple, la chaux est dissoute selon la réaction :



Il peut se produire un phénomène d'entraînement visible de constituants du béton vers l'extérieur (suintement, efflorescence, fuite de laitance, stalactites...)



# Lixiviation

Bétons exposés à des eaux faiblement minéralisées ou acides

Dissolution des produits d'hydratation de la matrice cimentaire, principalement la portlandite

⇒ augmentation de la porosité du béton





# LIXIVIATION

ATTAQUE PAR DES EAUX PURES

**L'attaque principale est la dissolution de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) à l'effet de l'eau pure:**

- LA SOLUBILITÉ DE LA PORTLANDITE EST FORÇA 1,7 g/L (à 20°C)
- LE PROBLÈME DE LA QUANTITÉ DE  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (> 20% CaO TOTAL CIMENT)



















La Gare ferroviaire. Skikda.





























# En conclusion

Le béton armé est soumis à différentes sources de de dégradations pouvant diminuer sa durabilité.

L'approche performantielle basée sur des indicateurs de durabilité fixés en fonction de l'environnement de l'ouvrage concerné tend à répondre à cette problématique et a augmenter la durée de vie des ouvrages.

