

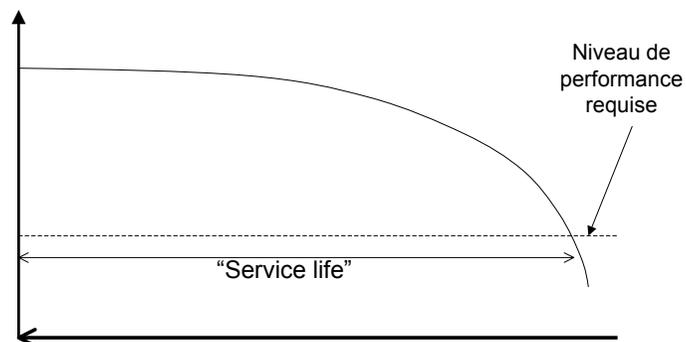
# Durabilité



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

## Durabilité

Maintien des performances



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

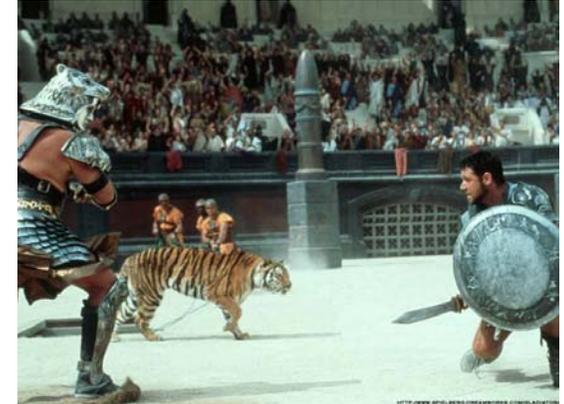
## Certaines structures romaines durent depuis des millénaires



*Pantheon (~ 120 a. J.C.)*

## Pourquoi cette excellente durabilité?

- Bonne qualité de construction
- (les punitions pour une mauvaise qualité étaient sévères)



## Pourquoi cette excellente durabilité

- Bonne qualité de construction
- L'environnement était relativement benin



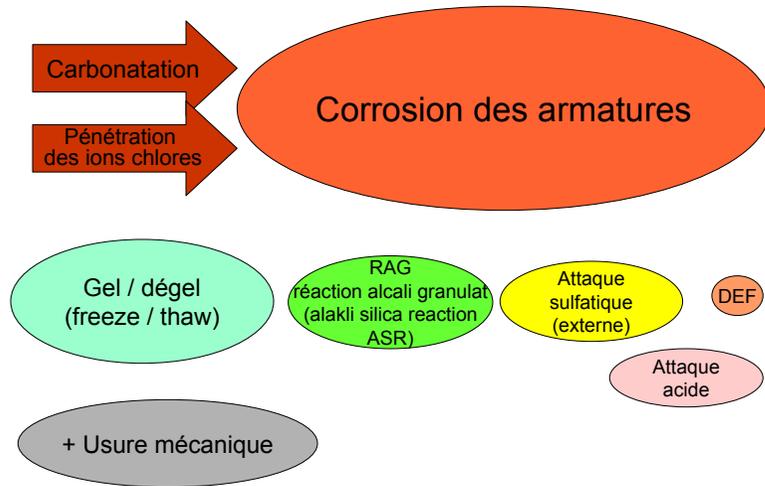
## Pourquoi cette excellente durabilité

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



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

## Causes de dégradation des bétons



## Les dimensions du problème

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



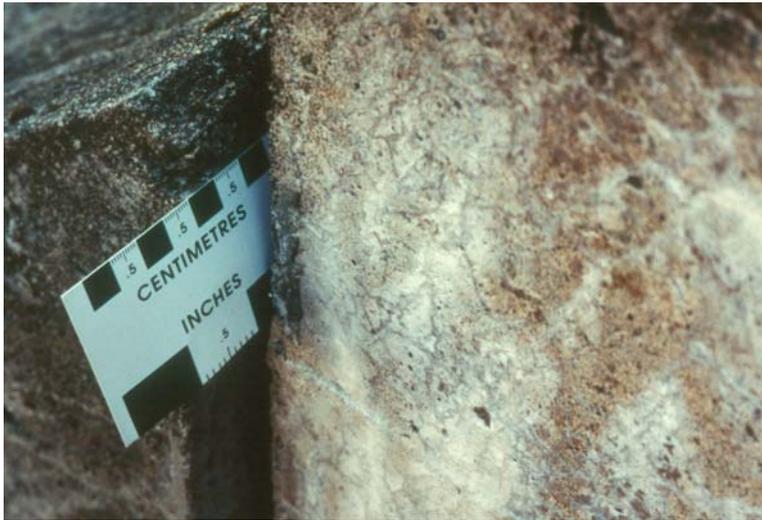
- Tabliers des ponts	\$200M / an
- autres parties des ponts	\$100M / an
- parkings, etc.	\$100M / an
	\$400M / an

## Manifestation des dégradations

### Distribution des Fissures – “Map Cracking”



**Misalignment (Distorsion)**



**Misalignment (Distorsion)**



**Fuites Seepage (Leaks)**



**Taches de rouille**

**Rust Staining**



**Délamination**

**Delamination**



**Spall**



**Echelonnage de surface**

**Surface Scaling**



# Désintégration

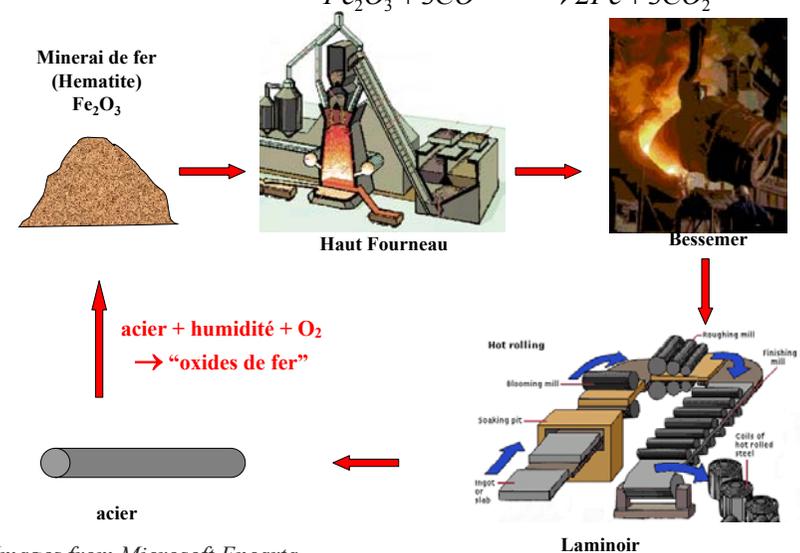
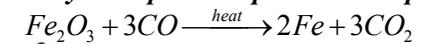
# Disintegration



Corrosion des armatures

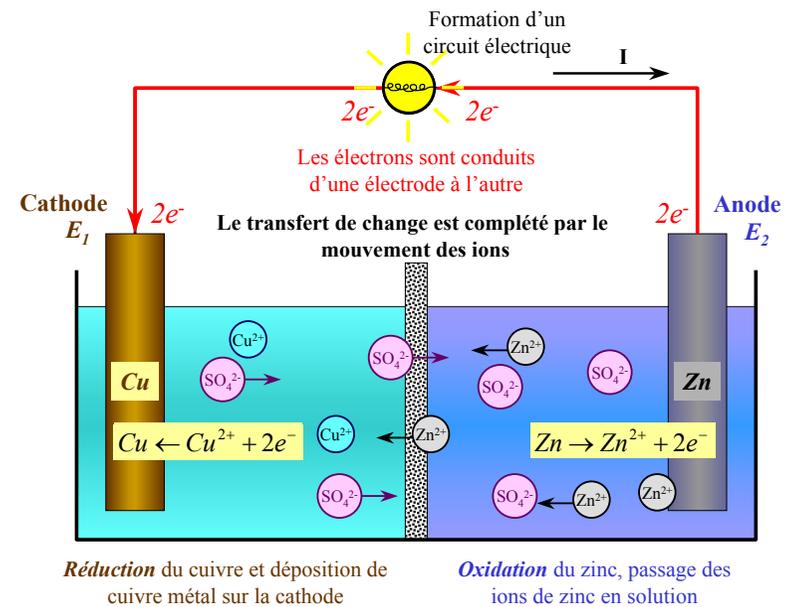
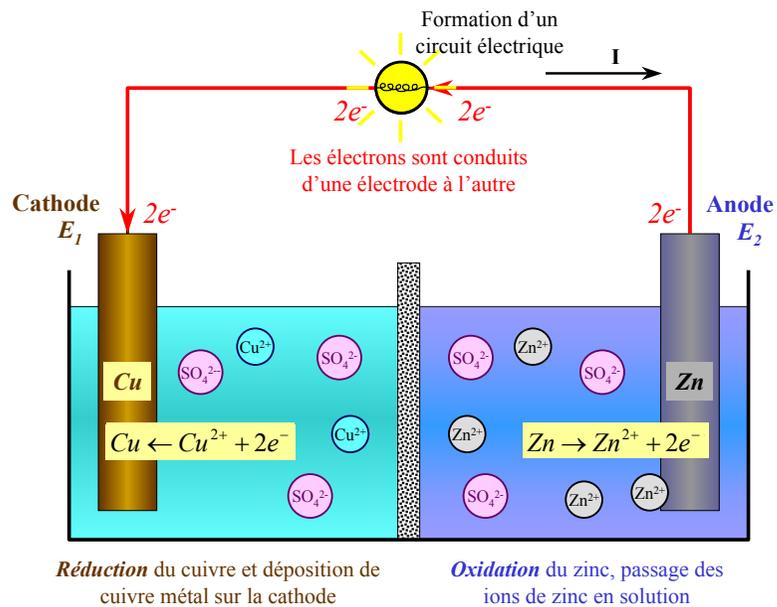
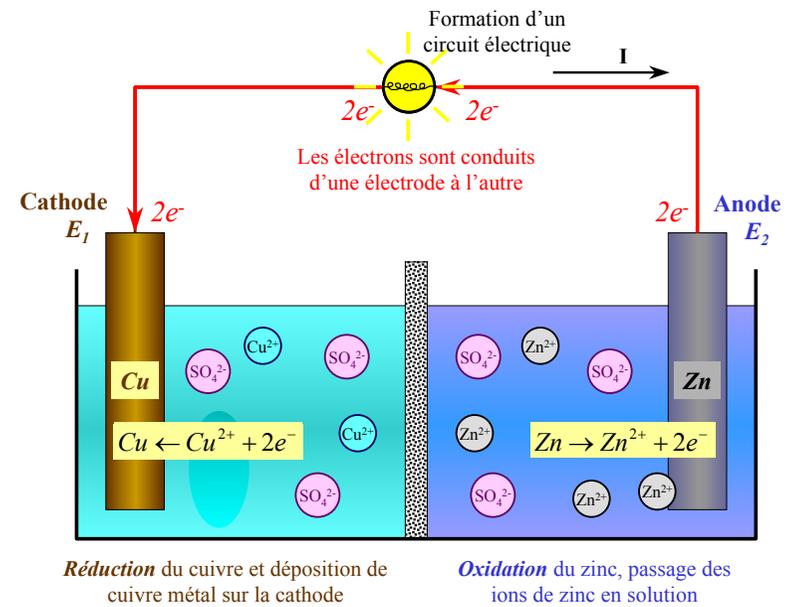
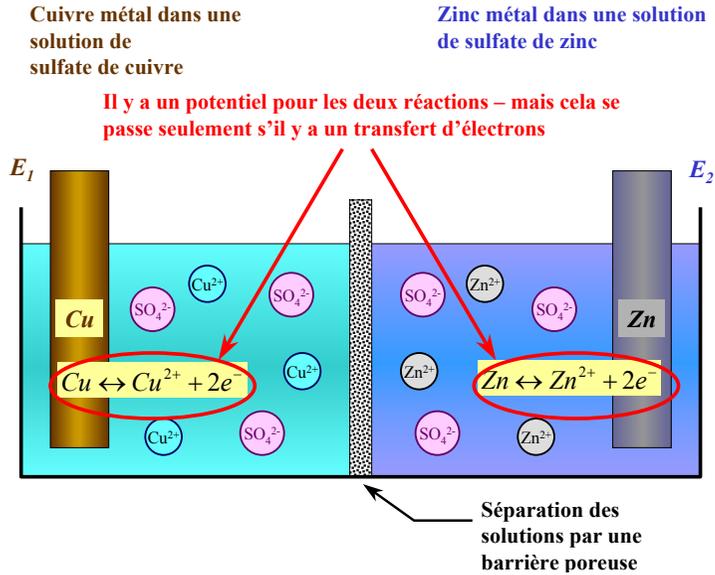
Un processus *électrochimique*

Les oxydes de fer sont thermodynamiquement plus stables que le métal



Images from Microsoft Encarta

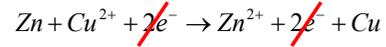
Laminoir



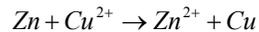
Réaction anode:  $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$  oxydation de zinc (moins d'électrons)

Réaction cathode:  $Cu^{2+} + 2e^- \rightarrow Cu$  réduction de cuivre (plus d'électrons)

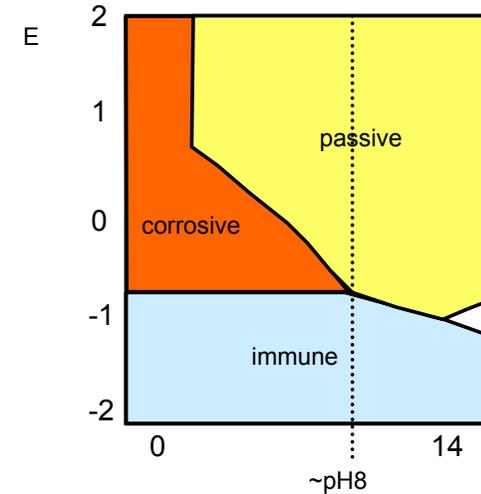
Ces deux réactions sont les réactions "half cell"  
ensemble elles donnent la réaction complète:



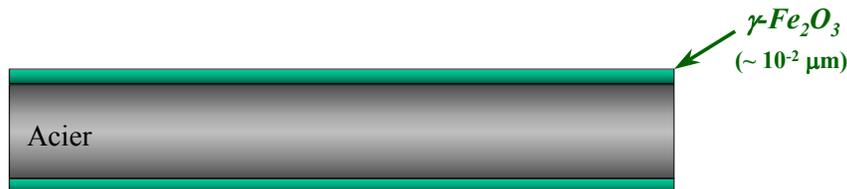
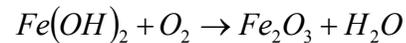
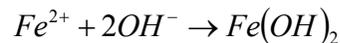
ou



## Diagramme « Pourbaix »



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



## Passivation

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

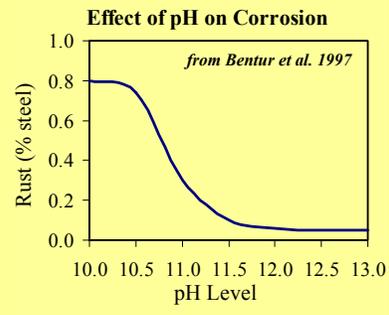
Cette couche isole le métal de l'électrolyte (et de l'oxygène), et empêche efficacement le processus de corrosion.

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

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



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

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

Dans le béton:  $13 < pH < 14$   
 $0.1 < [OH^-] < 1.0$

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

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

## pH du béton

Une solution poreuse de béton est presque entièrement composée d'alcali hydroxides - NaOH & KOH.

Généralement la somme des ions alcali est égale à la somme des ions hydroxyles -  $[Na^+ + K^+] = [OH^-]$

Concentration de  $[OH^-] > 0.1$  moles/litre - i.e.  $pH > 13.0$

Un pH élevé est aussi **tamponné** par la présence d'hydroxide de calcium -  $Ca(OH)_2$  - produit par l'hydratation du ciment

Une solution saturée  $Ca(OH)_2$  a un  $pH \sim 12.4$

### Analyse Typique d'Oxide 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

+ other trace elements

100 g de ciment contiennent:-

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

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

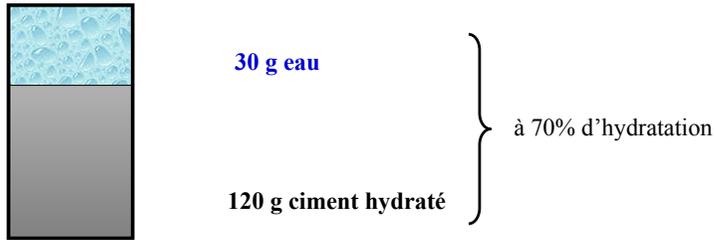
## pH du béton



50 g eau

100 g ciment

## pH du béton



En admettant que 70% des alcalis sont dissous

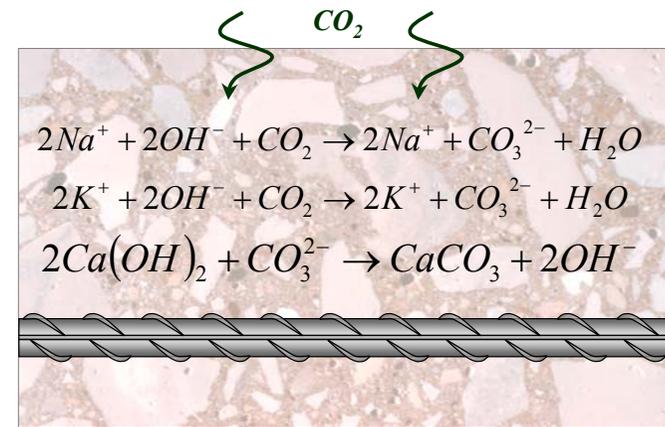
Il y a 0.42 g  $K^+$  et 0.08 g  $Na^+$  dans 30 ml d'eau

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

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

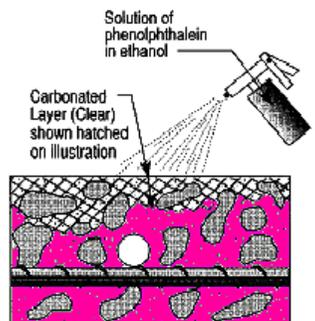
$0.36 + 0.11 = 0.47$  mol  $OH^-$  par litre d'eau associés avec les alcalis;  
ce qui correspond à  $pH = 14 - \log [0.47] = 13.67$

## Carbonatation du béton



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

## Carbonatation du béton



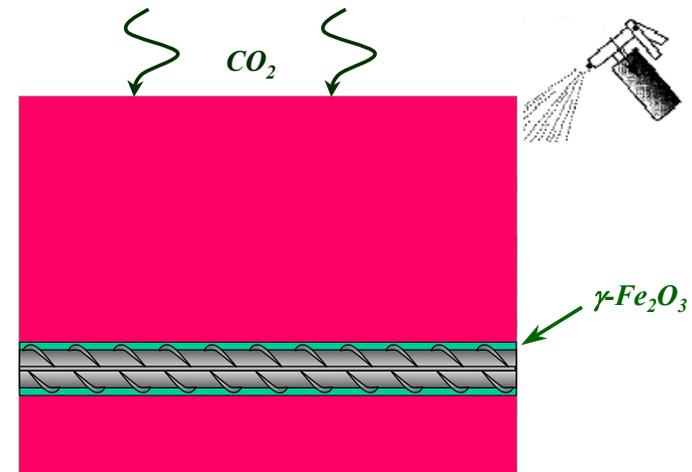
Surfaces with pH below 10 (carbonated) will have no change in color, with a pH above 10 the color of concrete will change to a pink color.

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

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

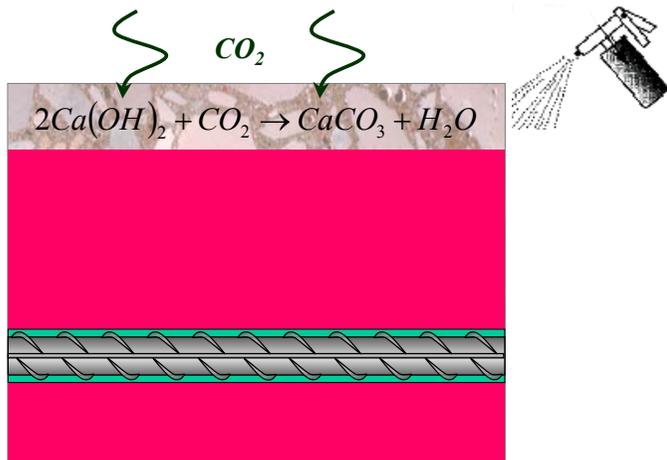
- $pH > 9.2$  (violet)
- $pH < 9.2$  (neutre)

## Carbonatation du béton



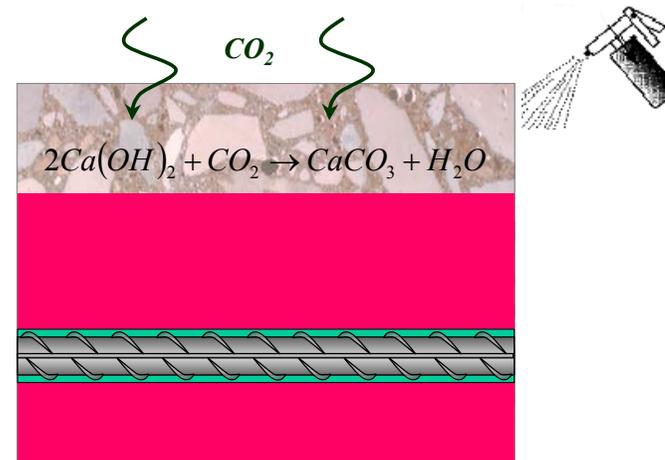
$t_0$

### Carbonatation du béton



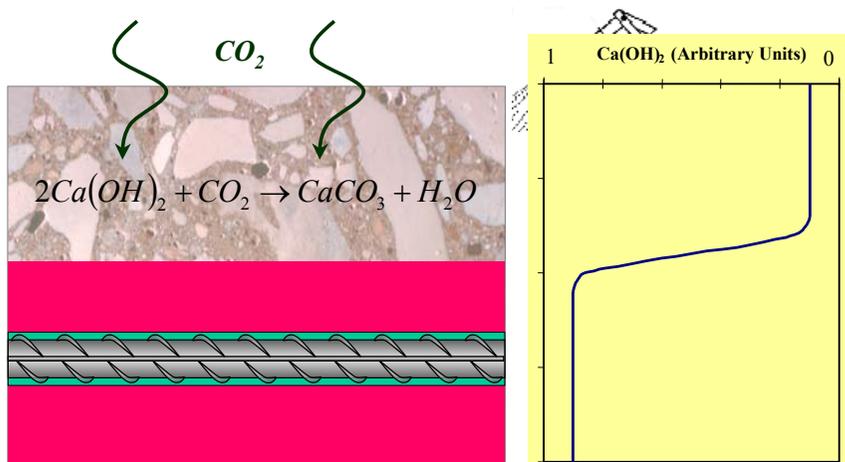
$t_1 > t_0$

### Carbonatation du béton



$t_2 > t_1$

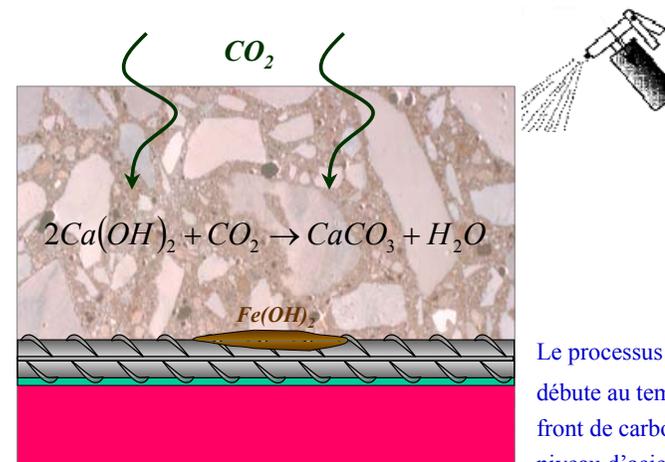
### Carbonatation du béton



$t_3 > t_2$

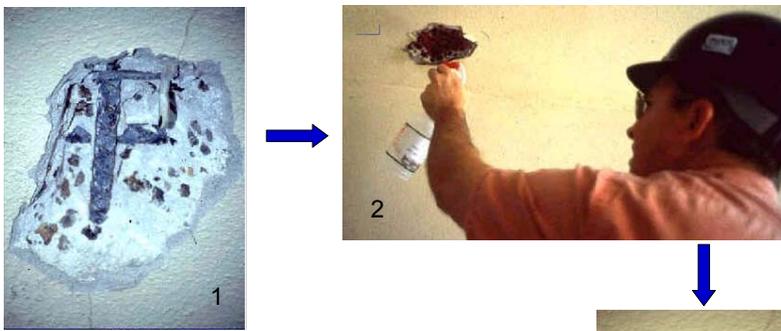
Le front de carbonatation est abrupt avec le changement de pH > 13 à pH < 9 se produisant sur quelques mm de béton

### Carbonation of Concrete



$t_i > t_3$

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

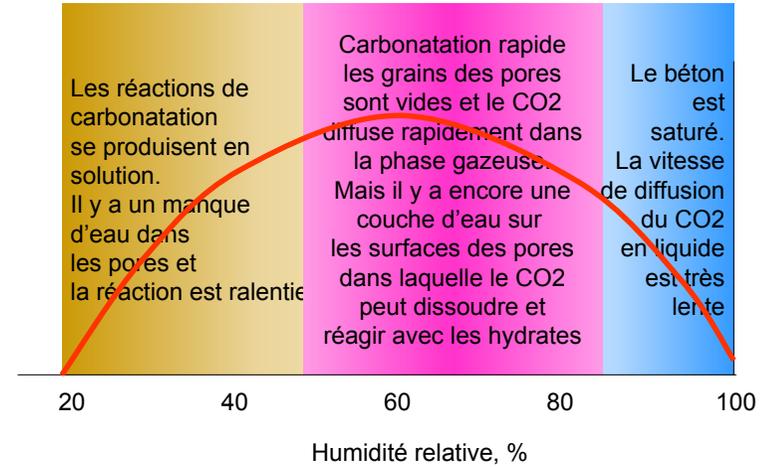


La photo 1 montre un éclat de béton résultant de la corrosion d'une barre d'armature – à noter les taches de rouille où la fissure atteint l'acier. Après avoir sprayé la surface fraîchement fissurée avec de la phenolphthaléine (Photo 2), on peut voir que la couche de béton sur la surface extérieure de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

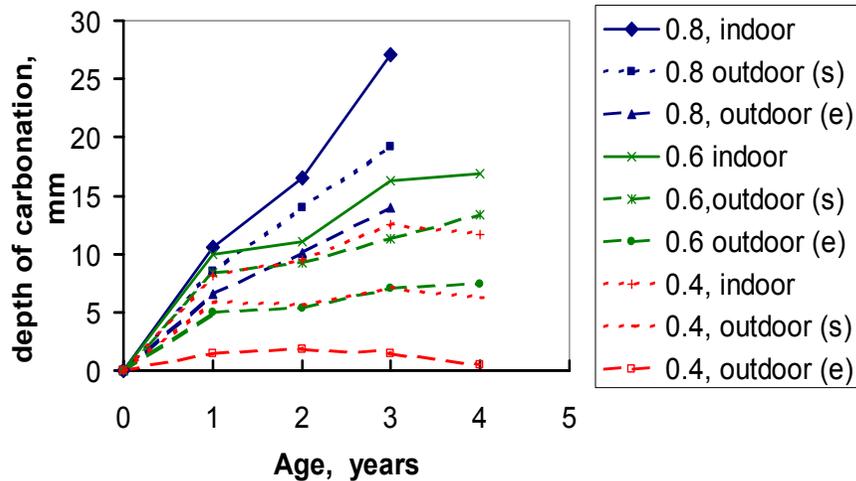
<http://www.comprehensus.com/comprehensus.html>



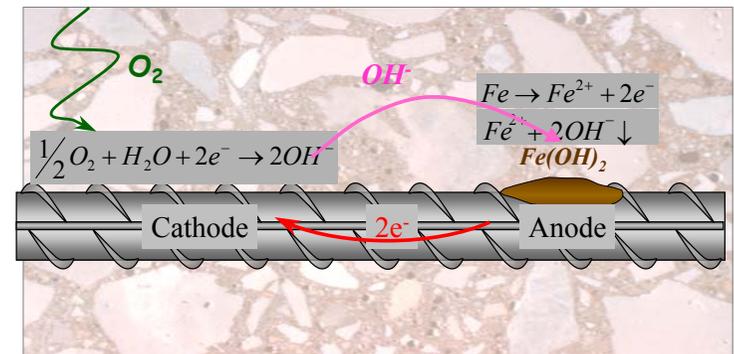
## Vitesse de carbonatation



## Epaisseur carbonatée



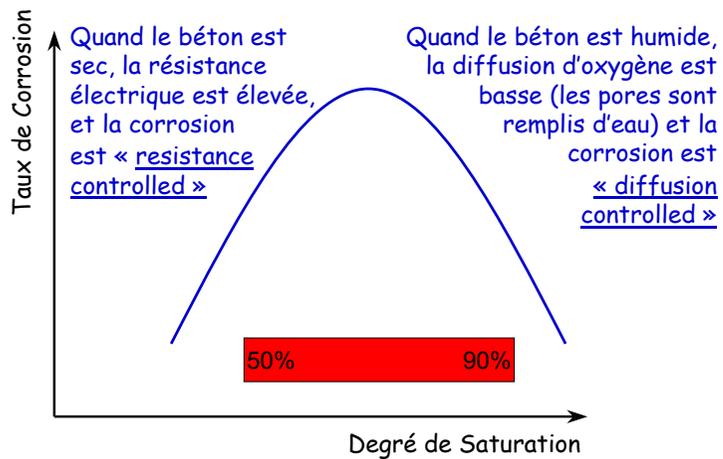
## Quand l'alcalinité est réduite:



**Corrosion active** - la vitesse est contrôlée par:

- l'arrivée d'oxygène à la cathode
  - Le transfert des ions  $OH^-$  de la cathode à l'anode
- PERMEABILITÉ**  
**DIFFUSION**  
**RESISTIVITÉ**

## Effet de la teneur en eau sur vitesse de corrosion



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

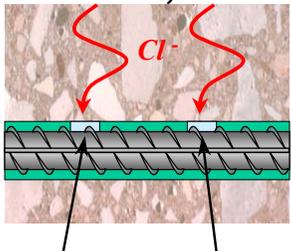
## Effet des chlorures

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

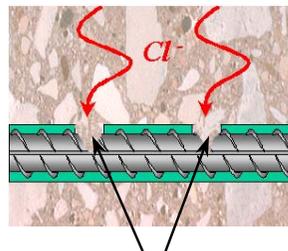
- La structure de la couche passive et sa dégradation par les chlorures n'est pas totalement comprise
- On pense généralement que les ions chlore s'introduisent dans la couche passive - remplaçant un peu de l'oxygène et augmentant à la fois sa solubilité, sa perméabilité et sa conductivité ionique
-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

## Effet des chlorures

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

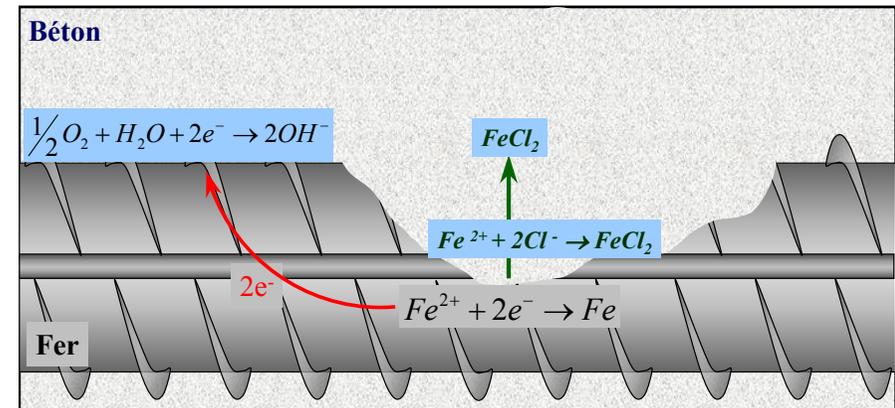


Défauts dans la couche passive et/ou  $Cl^-$  élevé



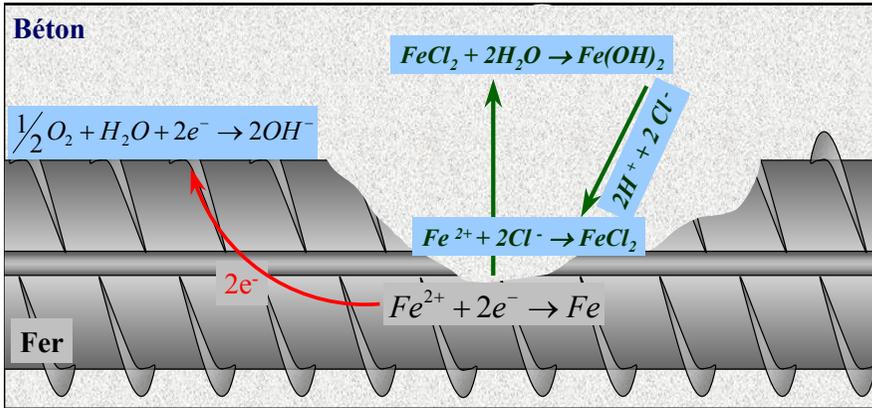
Piqûres

## Rôle des chlorures dans la corrosion par piqûre



La présence de chlorures favorise également la formation chlorure ferreux, qui est soluble dans le faible pH qui existe à l'anode. Le  $FeCl_2$  est facilement évacué de l'anode, empêchant par conséquent la fabrication de ions  $Fe^{2+}$  qui pourraient freiner le processus de corrosion.

## Rôle des chlorures dans la corrosion par piqûre



A quelque distance de l'anode, où la concentration de pH et d' $O_2$  est plus élevée, le  $FeCl_2$  se dégrade,  $Fe(OH)_2$  précipite, le  $Cl^-$  et  $H^+$  retournent à l'anode.

Ainsi le processus se reproduit sans cesse et au lieu de s'étendre le long de la barre – la corrosion se poursuit localement à l'anode et des piqûres profondes se forment.

Piqûre profonde causée par une attaque de chlorure



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

## Sources de chlorures dans le béton

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

Provenance interne de chlorures

Les normes limitent la teneur en chlorures des bétons.

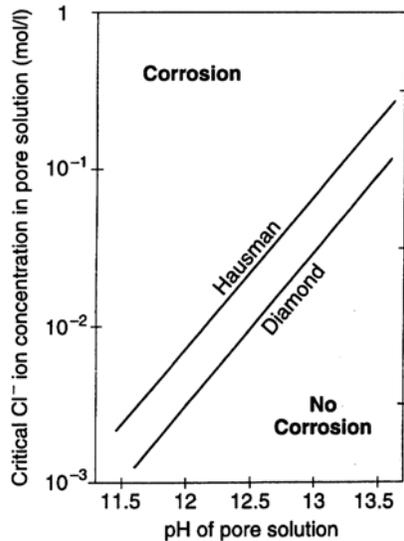
EX. norme canadienne	% Chlorure (soluble) (par masse béton)
Béton précontraint	0.06
Béton armé dans un environnement humide et/ou avec présence de chlorures	0.15
Béton armé en atmosphère sèche, en absence de chlorures	1.0

## Sources de chlorures dans le béton

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

Sources externes de chlorures

## Concentration critique de chlorures



**Actions contradictoires vis-à-vis de la couche passive:**

$Cl^- \rightarrow$  destruction

$OH^- \rightarrow$  stabilisation

Il a été montré que le rapport molaire des ions chlore aux ions hydroxydes est le facteur critique qui gouverne le développement de la corrosion de l'acier dans le béton. Diamond suggère que la corrosion est probable lorsque:

$$\frac{[Cl^-]}{[OH^-]} > 0.3$$

*Bentur et al, 1997*

## pH du béton



30 g eau

120 g ciment hydraté

} à 70% d'hydratation

Dans la solution ci-dessus, la concentration de  $OH^-$  est de 0.47 mol par litre.

La concentration critique en chlorures sera donc de  $0.3 \times 0.47 = 0.14 \text{ mol/L } Cl^-$   
– soit 5 g/L  $Cl^-$ .

## Concentration critique de chlorures

Il est plus courant de spécifier la teneur en chlorures par rapport à la masse du béton, plutôt qu'en concentration de solution dans les pores.

La teneur en chlorures peut être exprimée en % de la masse du ciment (courant en Europe) ou du béton (Amérique du Nord).

La teneur en chlorures est exprimée par rapport à la masse du ciment de façon à tenir compte du taux d'alcalinité du système ( $OH^-$ ) qui dépend du ciment.

L'alcalinité du béton dépend entre autres de la teneur en alcalis du ciment et du rapport E/C.

Il est difficile de déterminer la teneur en ciment du béton durci, c'est pourquoi il est plus simple d'exprimer les chlorures en % de la masse du béton.

La teneur en chlorures dépend de son mode de détermination - i.e.

**Chlorures totaux > chlorures solubles dans l'acide > chlorures solubles dans l'eau**

## Concentration critique de chlorures

Beaucoup d'études empiriques ont été effectuées, visant à déterminer la teneur en chlorures critique ou la valeur limite de la teneur en chlorures.

Des études menées par le

“*Building Research*

*Establishment*” ont établi les

directives suivantes (*BRE*

*Digest 263, 1982*) →

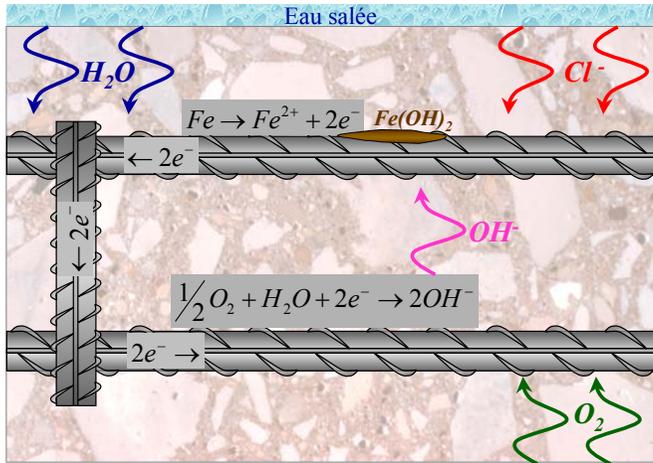
Total Chlorures (%-masse de ciment)	Risque de corrosion
< 0.2	Négligeable
0.2 to 0.4	Bas
0.4 to 1.0	Moderé
> 1.0	Elevé

La valeur limite de la teneur en chlorures,  $C_t = 0.4\%$  par masse de ciment est fréquemment utilisée lors d'études de corrosion (e.g. prévision durée de vie, etc.)

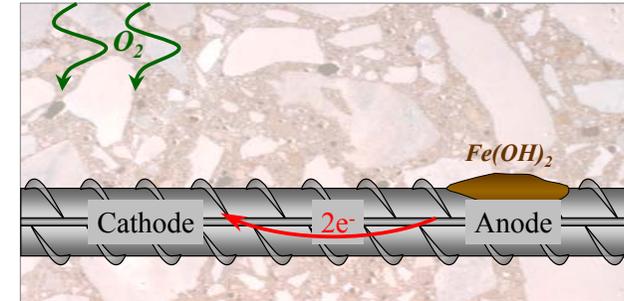
**Pour des bétons avec des teneurs en ciment de 300 à 400 kg/m<sup>3</sup> cette valeur se traduit par  $C_t = 0.05$  to  $0.07\%$  par masse de béton (en supposant une densité du béton de 2350 kg/m<sup>3</sup>)**

**Pour les besoins de ce cours, nous supposons que la valeur limite de la teneur en chlorures acide-soluble est  $C_t = 0.05\%$  par masse de béton.**

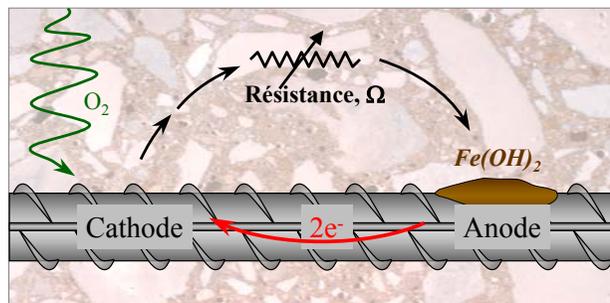
## Corrosion macrocellulaire dans le béton



## Corrosion microcellulaire dans le béton



## Taux de corrosion dans le béton

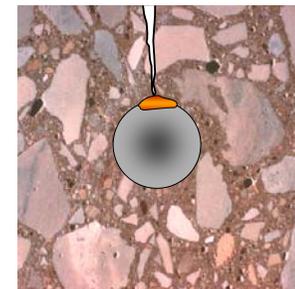


Le taux de corrosion, une fois débuté est contrôlé par:

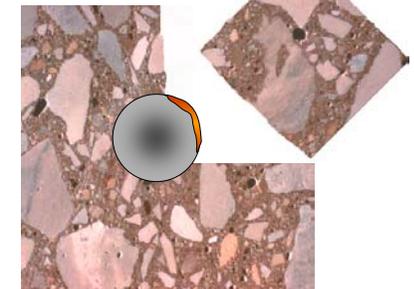
- Le taux de diffusion d'oxygène
- La résistance électrique du béton entre anode & cathode

Le taux de corrosion peut être réduit par l'utilisation de béton à faible diffusion d'oxygène et haute résistance électrique – 2 caractéristiques de béton à faible pourcentage de E/C et contenant des matériaux cimentaires supplémentaires (i.e. Béton haute performance)

## Conséquences de la corrosion sur le béton

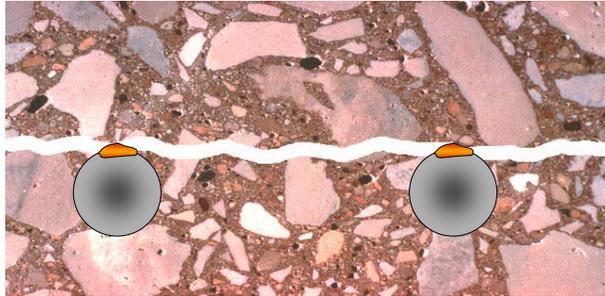


Fissuration



Spalling

## Conséquences de la corrosion sur le béton

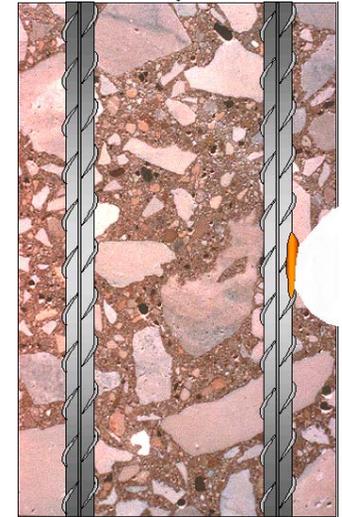


Délamination

## Conséquences de la corrosion sur le béton

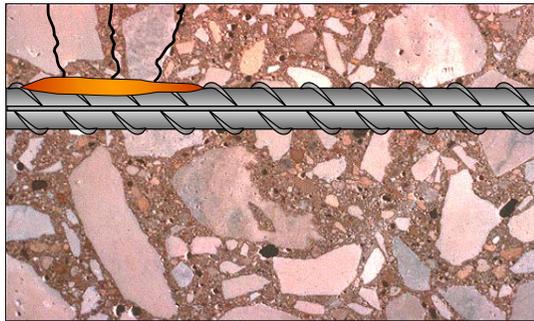


Perte de section



Excentricité

## Conséquences de la corrosion sur le béton



Perte d'adhérence

## Autres conditions de corrosion

### Dégât dans le béton précontraint

#### ➤ Corrosion sous contrainte

- Se produit en présence de forte contrainte dans un environnement corrosif.
- Peut être considéré comme un cas extrême de corrosion par piqûre avec la formation d'une micro cavité.
- Le fond de la cavité est sujet à une forte concentration de contraintes, pendant la dissolution anodique.
- Cet ensemble de sollicitations induit une propagation rapide de la fissure en fond de cavité.
- Ce processus se développe à une échelle macroscopique conduisant à des ruptures fragiles.

Comment augmenter le temps avant carbonatation ou pénétration des ions chlore, jusqu'au renforcement

- **Augmenter la couche de béton entre l'environnement et les armatures – « cover »**
- **Diminuer la vitesse de pénétration du CO<sub>2</sub> ou Cl- – “perméabilité”**