

Marseille, le 27 novembre 2013

## La protection des bétons en zone littorale

### *STRRES – FNTP*

Contrôle des Matériaux



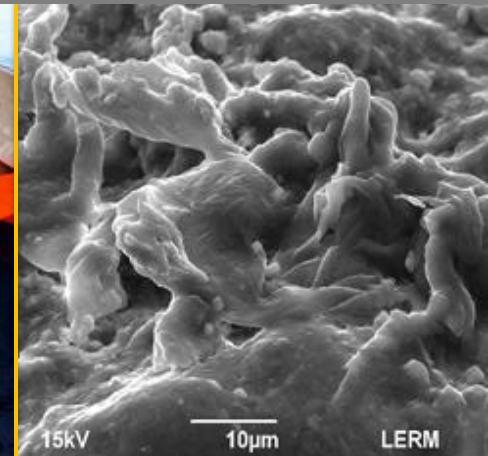
Diagnostic Constructions



Expertise Durabilité



Innovation Matériaux



# Le diagnostic des chlorures en laboratoire



[bernard.quenee@lerm.setec.fr](mailto:bernard.quenee@lerm.setec.fr)

**Il existe 2 phénomènes inducteurs de la corrosion des aciers dans le béton :**

- la **carbonatation** du béton par pénétration d'un front de  $\text{CO}_2$  de la surface vers le cœur du béton
- la **pénétration des ions chlorure** pour les ouvrages en milieu marin (immergés, en zone de marnage, soumis aux éclaboussures ou aux embruns...) ou exposés aux sels de déverglaçage dans les environnements présentant des risques de gel (contact direct, projections, ruissellement...).

# Déclanchement de la corrosion

La pénétration des ions chlorure dans le béton requiert la présence d'une **phase liquide**.

En milieu **saturé** (par ex. structures immergées en eau de mer), les ions chlorure pénètrent dans le béton par **diffusion**, sous gradient de concentration.

La pénétration des chlorures dépend donc des caractéristiques du matériau et des cycles d'humidification/séchage qu'il subit (durée, conditions climatiques).

**Chlorures totaux, libres ou liés ?**

**Il existe 2 formes de chlorures dans les bétons :**

- chlorures libres (NaCl) : *adsorbés en surface des C-S-H*
- chlorures liés (chloro-aluminates de calcium hydratés ou sel de Friedel,  $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ) : *liés dans la matrice cimentaire*

**L'ensemble constitue les chlorures totaux.**

**Chlorures totaux = extraits après solubilisation par attaque acide**

**Chlorures libres = extraits par extraction aqueuse**

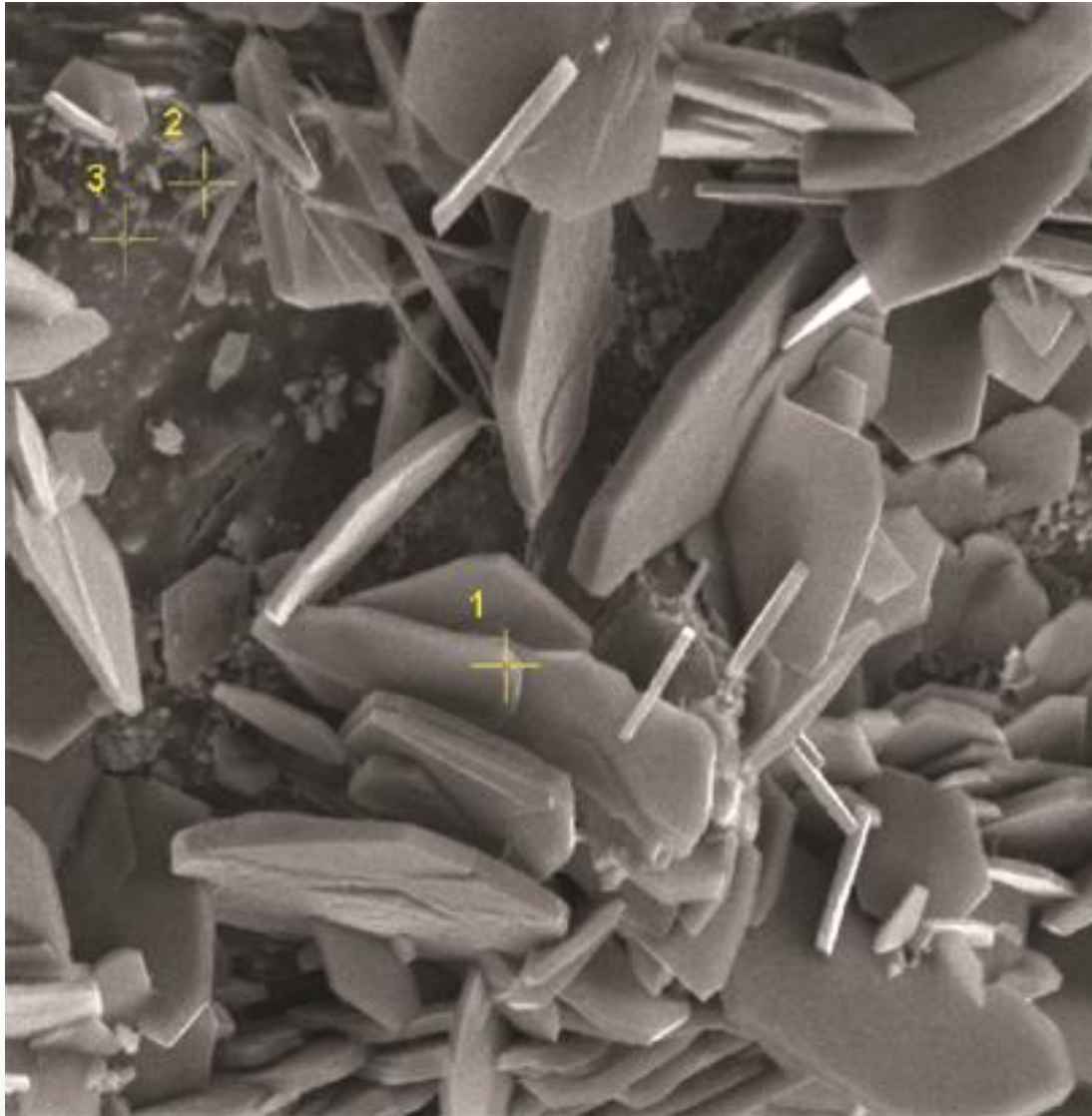
**=> Chlorures liés (ou fixés) = différence des deux**

*La fixation des ions chlorure dépend fortement de la nature du ciment utilisé et principalement de sa teneur en C3A mais l'alumino-ferrite de calcium C4AF ainsi que les sulfates jouent également un rôle.*

On considère que seuls les **chlorures libres** peuvent diffuser et jouer un rôle actif dans le processus de **dépassivation** et de **corrosion** des armatures.

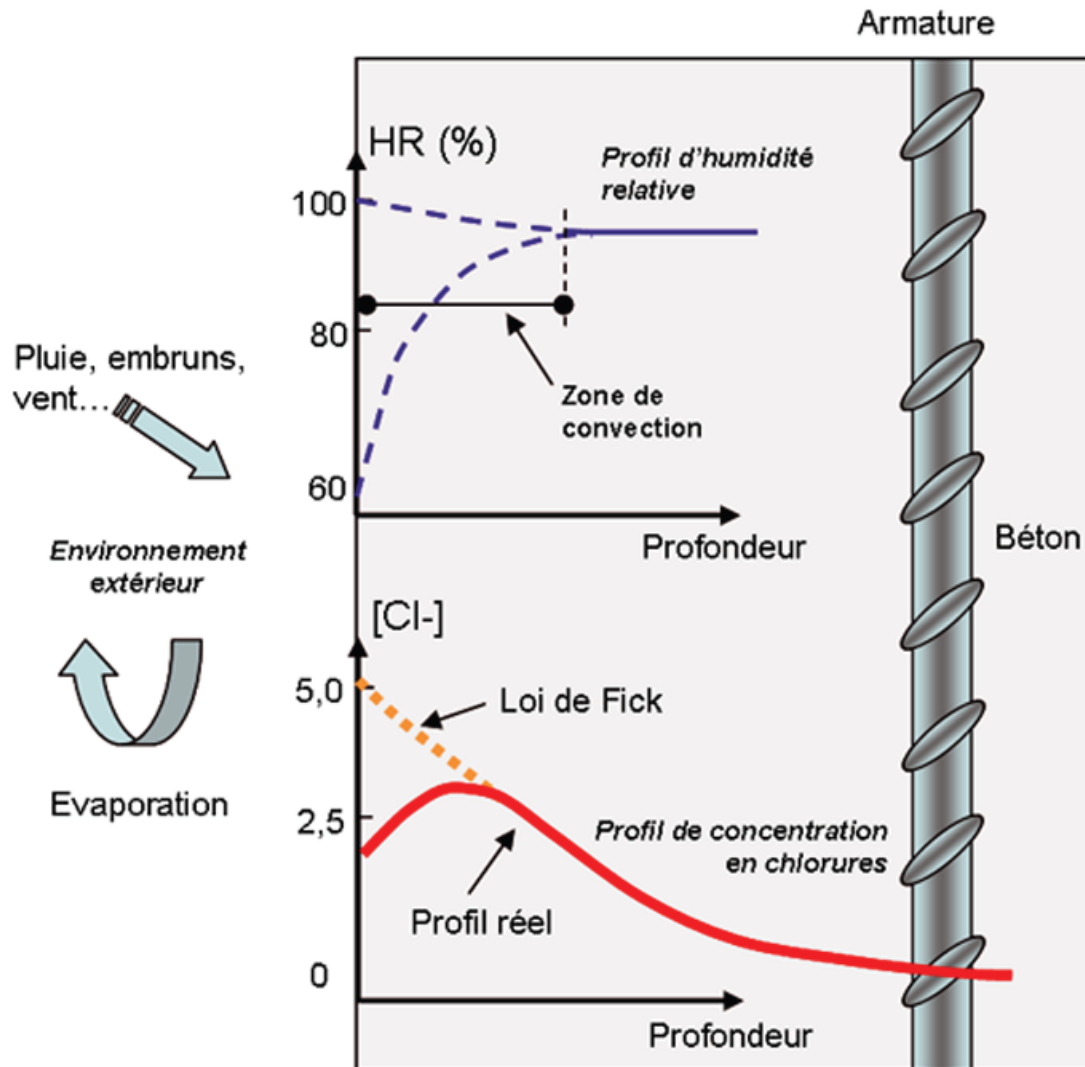
Ces constatations expliquent le fait que les bétons à base de **CEM I à teneur relativement élevée en C3A** soient plus résistants à la corrosion induite par les chlorures en raison de leur capacité à fixer une quantité importante de chlorures, plus disponibles pour dépassiver les aciers.

# Chlorures liés : les chloro-aluminates de Ca



# Mouvements des chlorures en surface des bétons

*Illustration de la zone de convection dans une structure en béton armé soumise à des transferts hydriques et de chlorures (d'après La durabilité des bétons )*



# Corrosion liée à des ruissellements d'eau chargée en sels



# Corrosion liée à des infiltrations d'eau chargée en sels au droit de joints de chaussée



# Corrosion liée à des infiltrations d'eau chargée en sels au droit de joints de chaussée



# Corrosion d'appontements en milieu marin (Cannes)



# Corrosion de poutre en bordure de mer



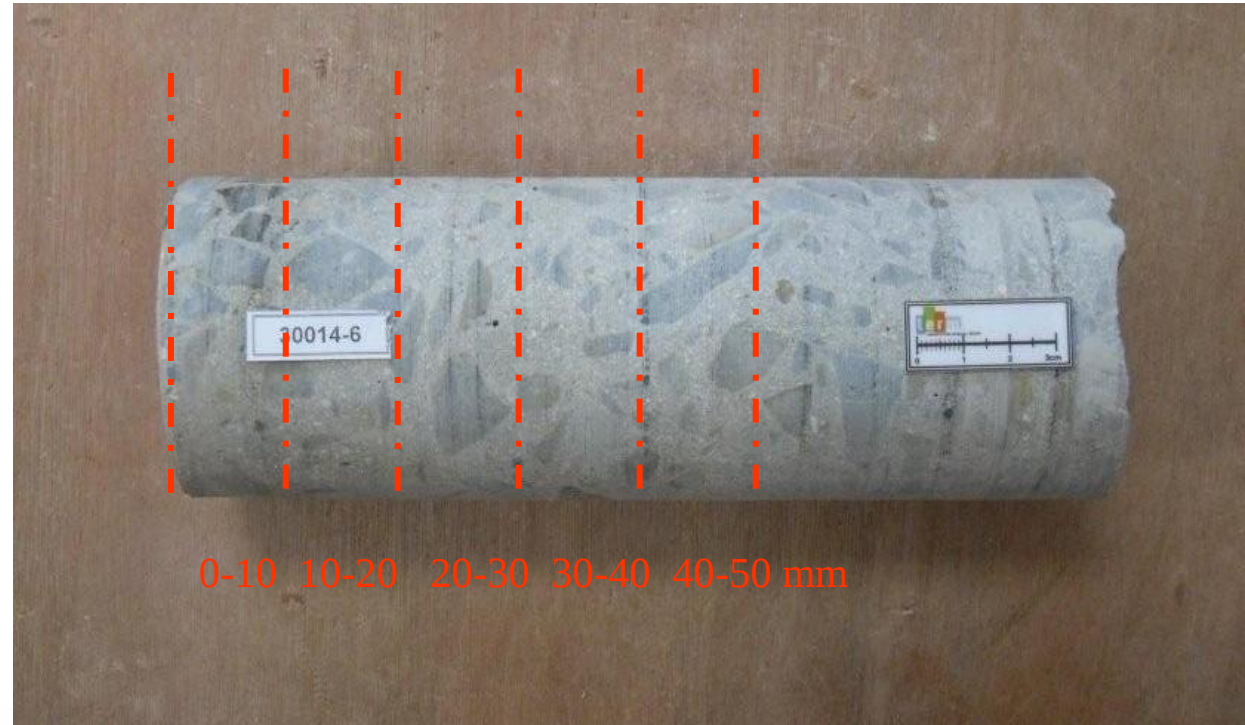
# Corrosion d'armatures en milieu marin



# Dosage des ions chlorures

- Mesure réalisée selon le mode opératoire recommandé par l'AFPC-AFREM (teneurs en chlorures libres et totaux)
- Mesures selon profil de plusieurs points en fonction de la profondeur, afin d'apprécier la profondeur de pénétration des chlorures.
- Les profondeurs de mesure seront en général : 0/10mm, 10/20 mm, 20/30 mm, 30/40 mm, 40/50 mm...

# Mesure d'un gradient chlorures (profil 5 points)



# Préparation de la carotte de béton



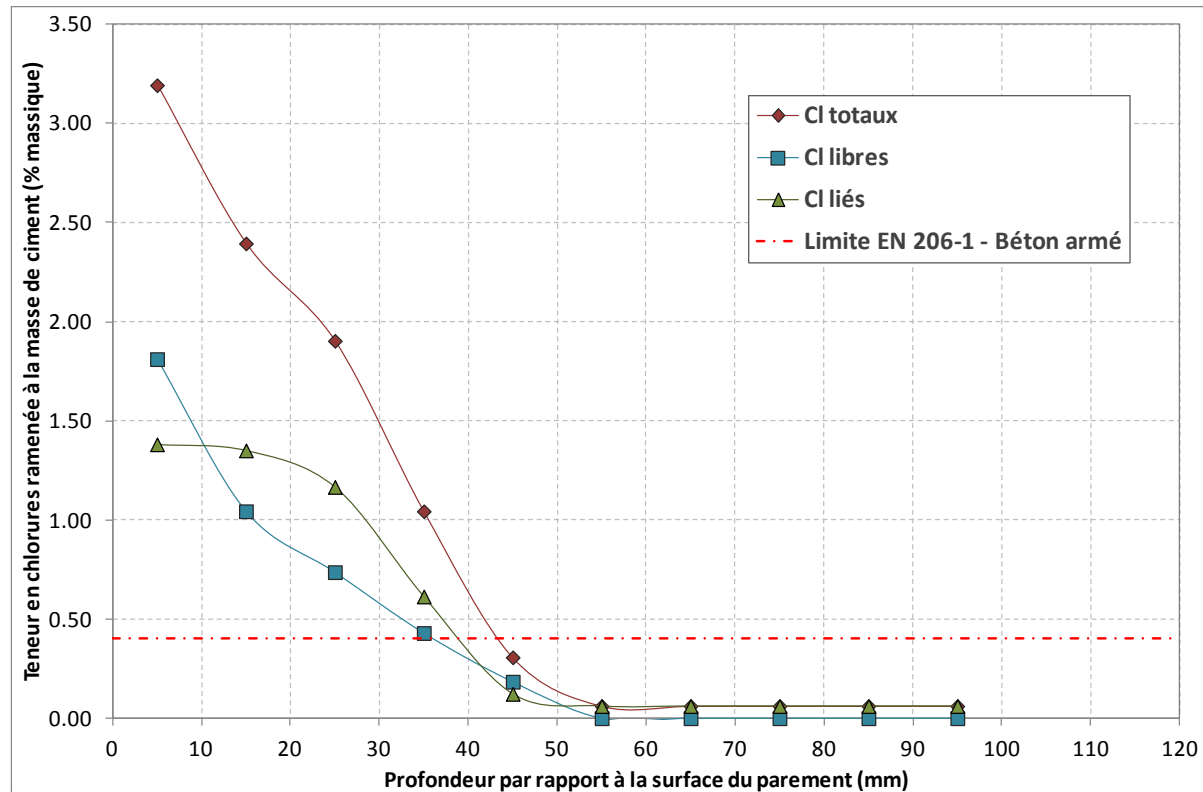
# Prélèvements de poudres pour dosage des $\text{Cl}^-$



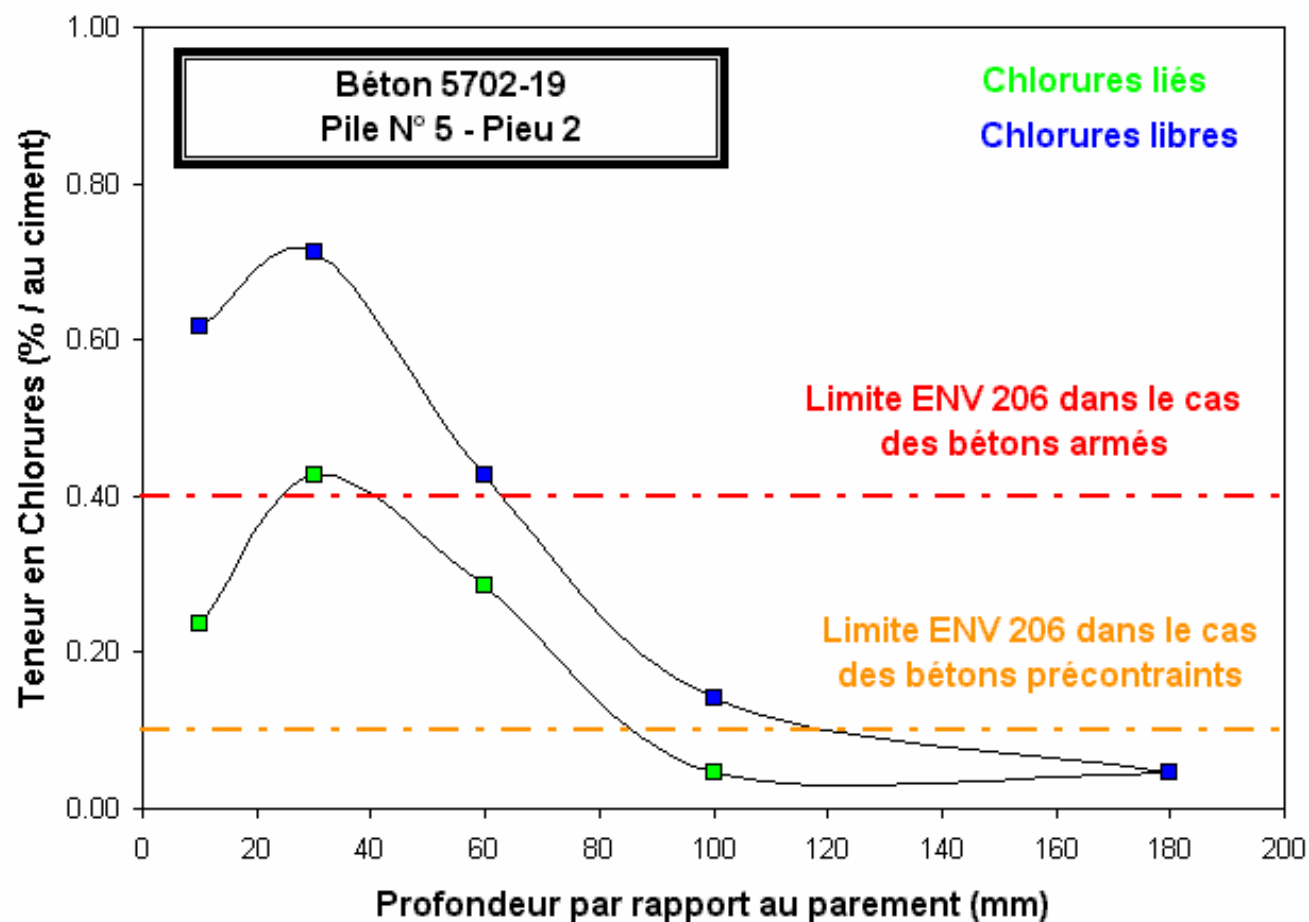
# Titrateur potentiométrique avec passeur d'échantillons



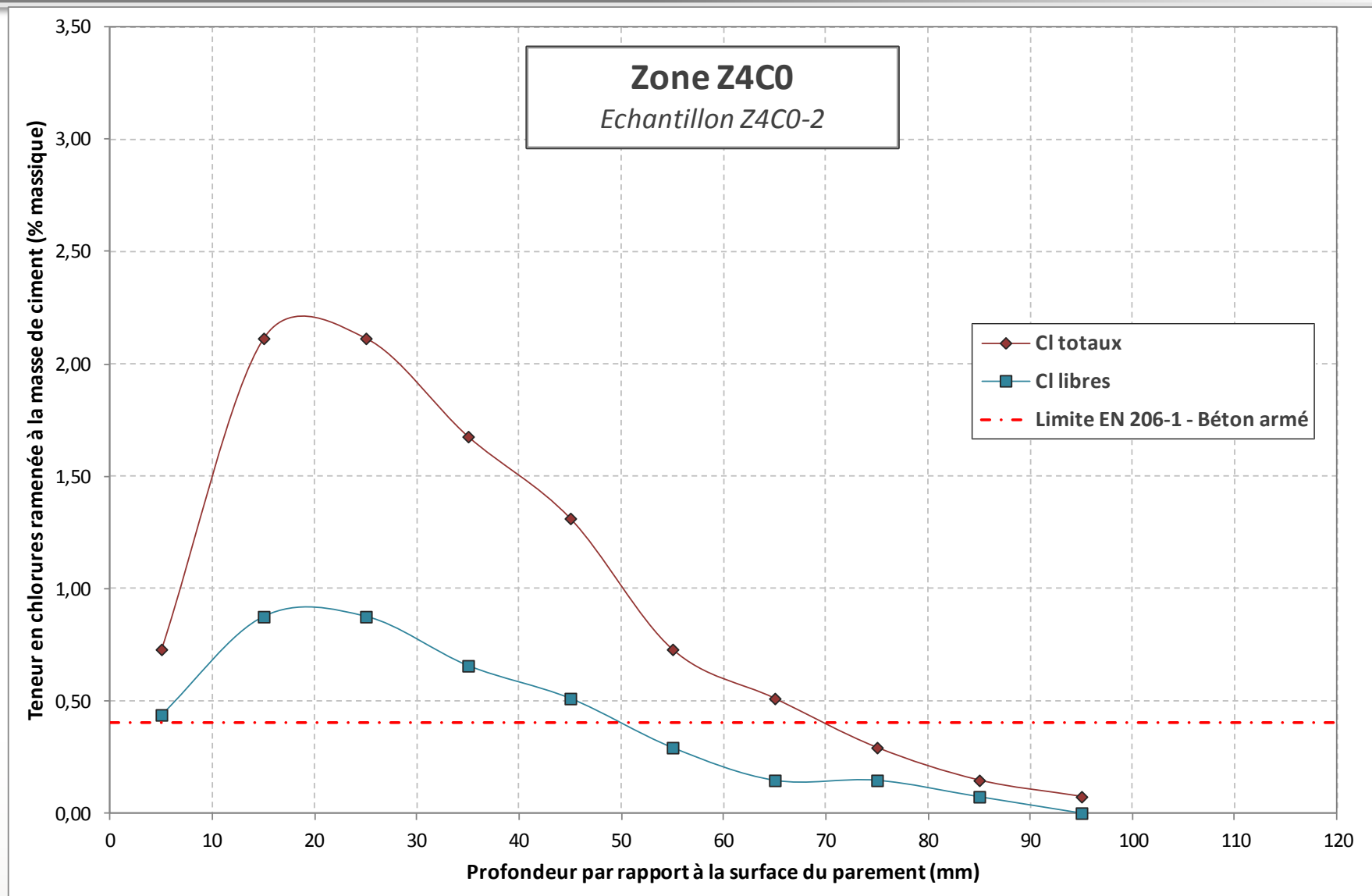
# Profil profondeur – concentration en Cl<sup>-</sup>



# Profil profondeur – concentration en Cl<sup>-</sup>



# Profil profondeur – concentration en Cl<sup>-</sup>



# Teneur critique en chlorures

**Rapport  $[Cl^- \text{ libres}] / [OH^-]$  au droit des armatures** = stabilité de la couche de passivation. Conditionne amorçage de la corrosion (plus ce rapport est élevé, plus la vitesse de corrosion sera grande).

On peut donc déduire de ce critère la valeur de la concentration « critique » en chlorures, connaissant le pH de la solution interstitielle.

**Un rapport  $[Cl^-]/[OH^-]$  compris entre 0,6 et 1 conduit généralement à une concentration « critique » en ions chlorures de l'ordre de 0,4 % par rapport à la masse de ciment pour un BA (norme NF EN 206-1), pour un béton non carbonaté (et donc à des concentrations « critiques » comprises entre 0,04 et 0,1 % par rapport à la masse de béton, suivant la formulation).**

*L'état hydrique du béton reste un paramètre déterminant vis-à-vis de la corrosion des armatures.*

La connaissance du **dosage en ciment** permet :

- de ramener précisément les teneurs en chlorures au poids de ciment (et non au poids de béton)
- de comparer ce paramètre par rapport aux spécifications actuelles (NF EN 206-1)

# Applications spécifiques



# Prévision numérique de la durée de vie résiduelle d'ouvrages



*Exemple du Pont Vasco de Gama à Lisbonne*

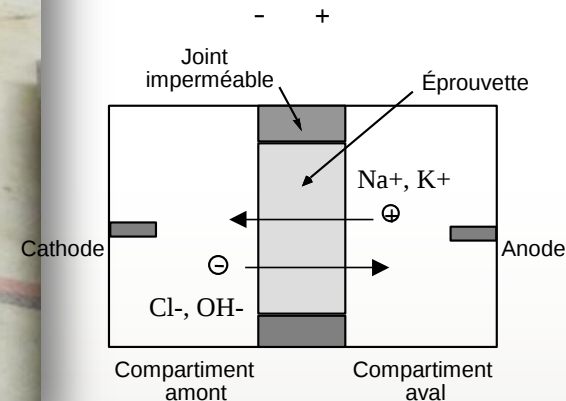
## Mesure des teneurs en chlorures libres et liés par potentiométrie



- BHP : durabilité avant performances mécaniques
- Ciment faible teneur en C3A et aux cendres
- Dosage > 400 kg/m<sup>3</sup>
- E/L : 0,33 à 0,42
- Enrobage armatures #7 cm

# Programme de durabilité – Contrôle des bétons

## Mesure du coefficient de diffusion des $\text{Cl}^-$ sous champs électrique



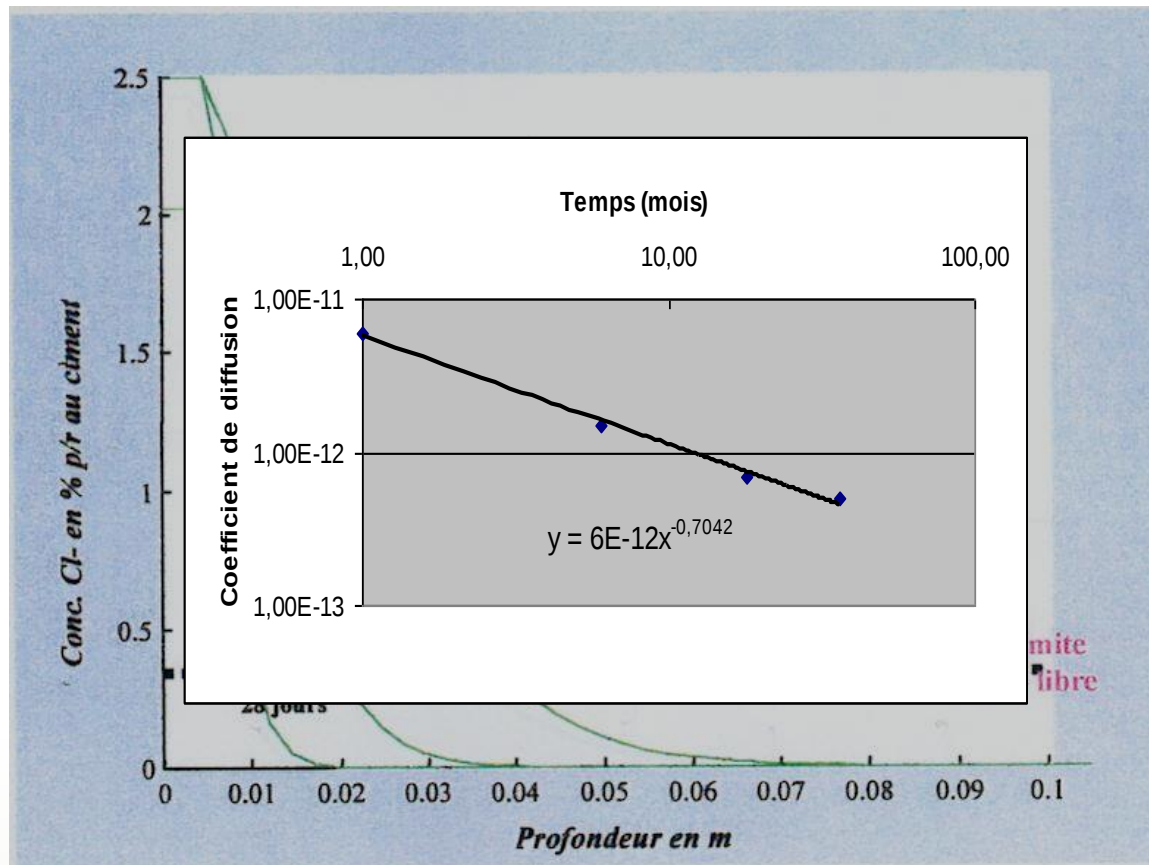
# Programme de durabilité – Contrôle des bétons

## Mesure de la perméabilité à l'oxygène



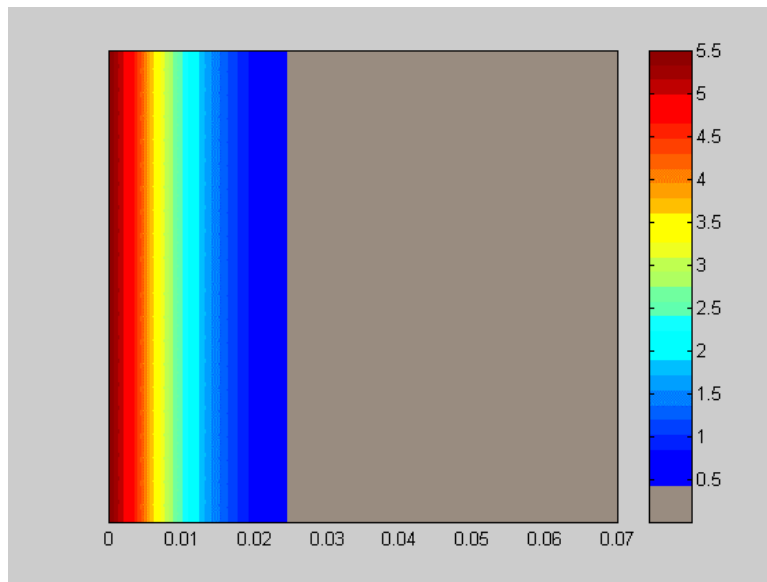
# La modélisation de durée de vie

## Développement d'un modèle prédictif de la pénétration des chlorures

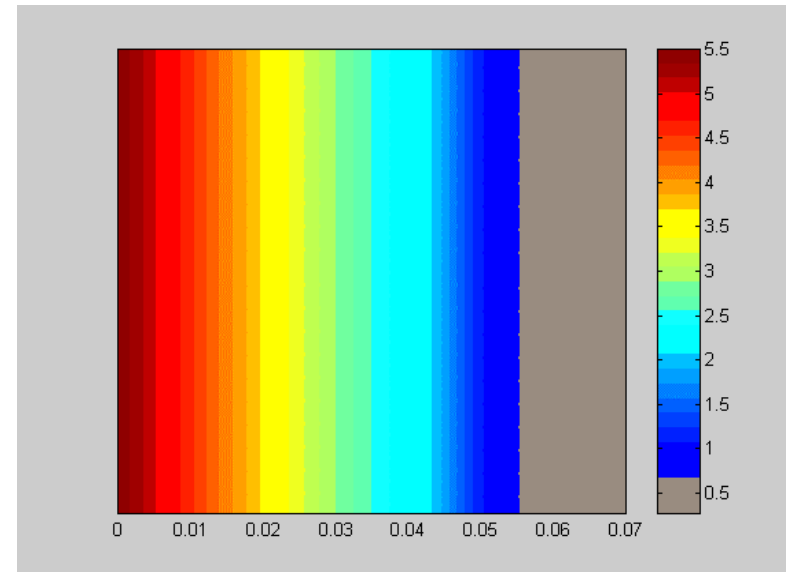


# La modélisation de durée de vie

## Développement d'un modèle prédictif de la pénétration des chlorures



36 mois après la mise en service

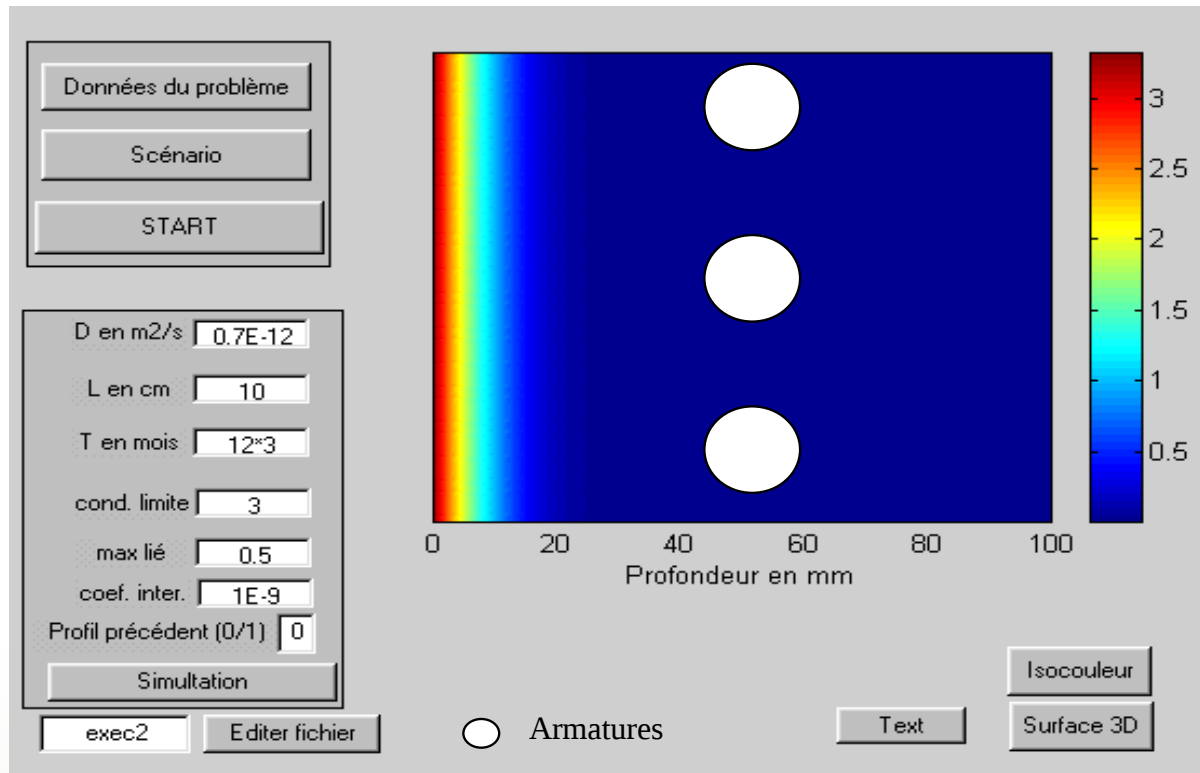


Après 120 ans

# La modélisation de durée de vie

## Développement d'un logiciel prédictif de la pénétration des chlorures

Exemple de simulation numérique



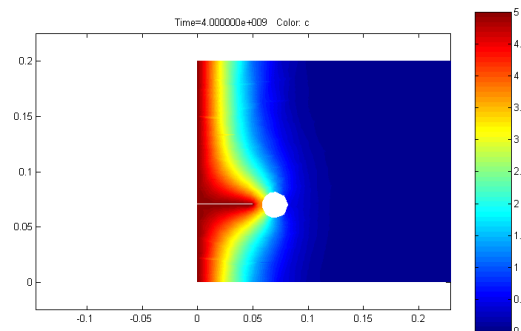
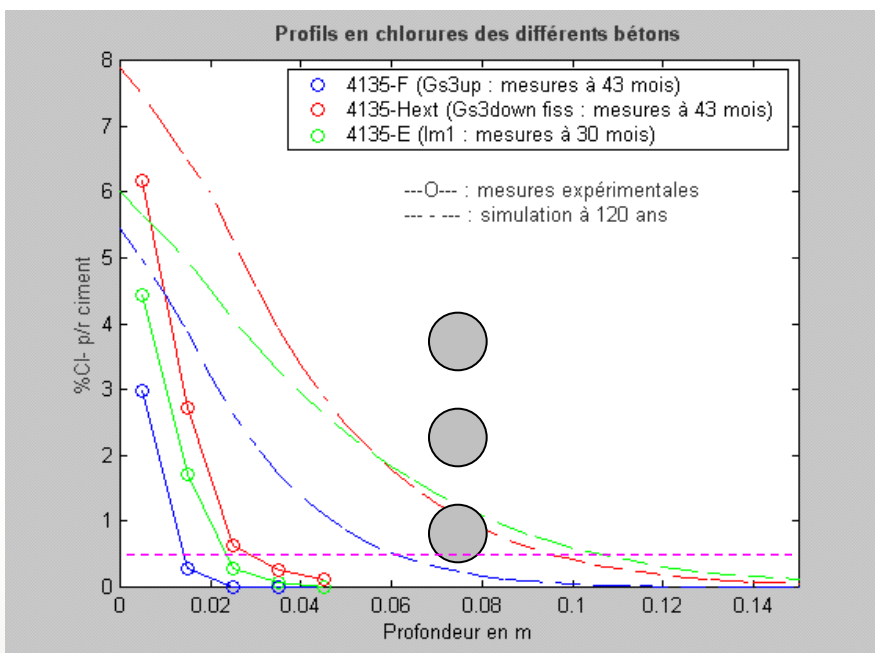
# Programme de durabilité : exemples de résultats (chlorures) (simulations numériques 18 mois après la mise en service)

Simulations numériques réalisées à partir des essais en laboratoire sur :

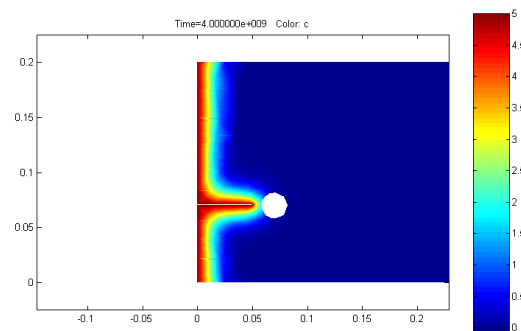
Béton sain

Béton fissuré

Béton avec défauts de mise en oeuvre



120 ans  
bon béton fissuré  
 $D=0,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$



120 ans  
très bon béton fissuré  
 $D=0,2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$

Mise en œuvre de solutions  
préventives pour garantir le critère de  
durabilité de 120 ans

# CONTACTS

➔ « LERM INFOS » : **Dossiers techniques et scientifiques** en libre consultation  
Inscription gratuite sur [www.lerm.fr](http://www.lerm.fr)

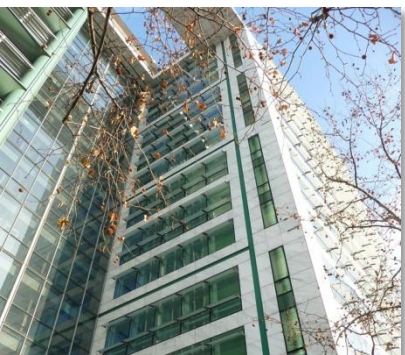


**Siège social et laboratoires** : 23, rue de la Madeleine CS 60136  
13 631 ARLES CEDEX - T: +33 (0) 4 86 52 65 00 - F: +33 (0) 4 90 96 25 27  
[contact@lerm.setec.fr](mailto:contact@lerm.setec.fr)

**Agence Ile-de-France** : Immeuble Central Seine - 42-52, quai de la Rapée  
CS 71230 - 75 583 PARIS CEDEX 12 - T: +33 (0) 1 82 51 41 00 - F: +33 (0) 1 82 51 41 19

**Agence Rhône-Alpes** : Les Portes de Crolles Rond-point du Raffour 38920 Crolles  
T: +33 (0) 4 76 78 83 42 - F: +33 (0) 4 76 78 80 41

**Agence Grand Ouest** : 4, avenue Charles Tillon 35 000 RENNES  
T: +33 (0) 1 82 51 40 99 - F: +33 (0) 4 90 96 25 27



Détail complet de nos prestations : [www.lerm.fr](http://www.lerm.fr)

***MERCI POUR VOTRE ATTENTION...***

