

Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

Évaluation de la durée de vie résiduelle d'un ouvrage en service

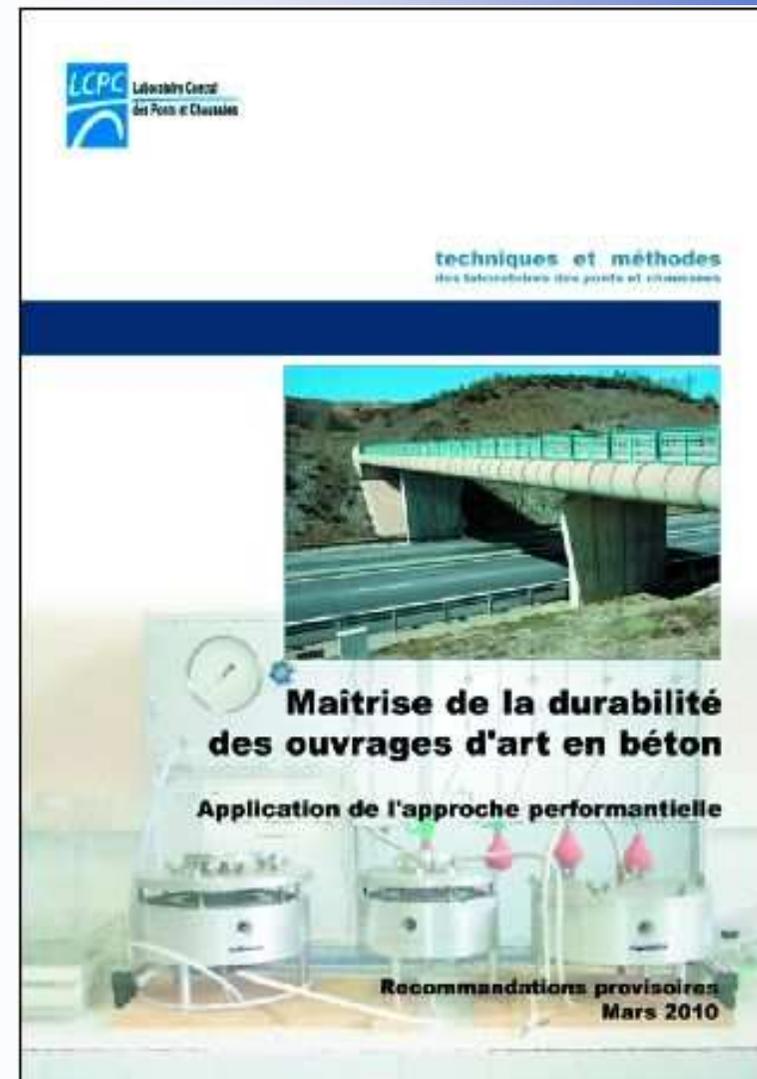
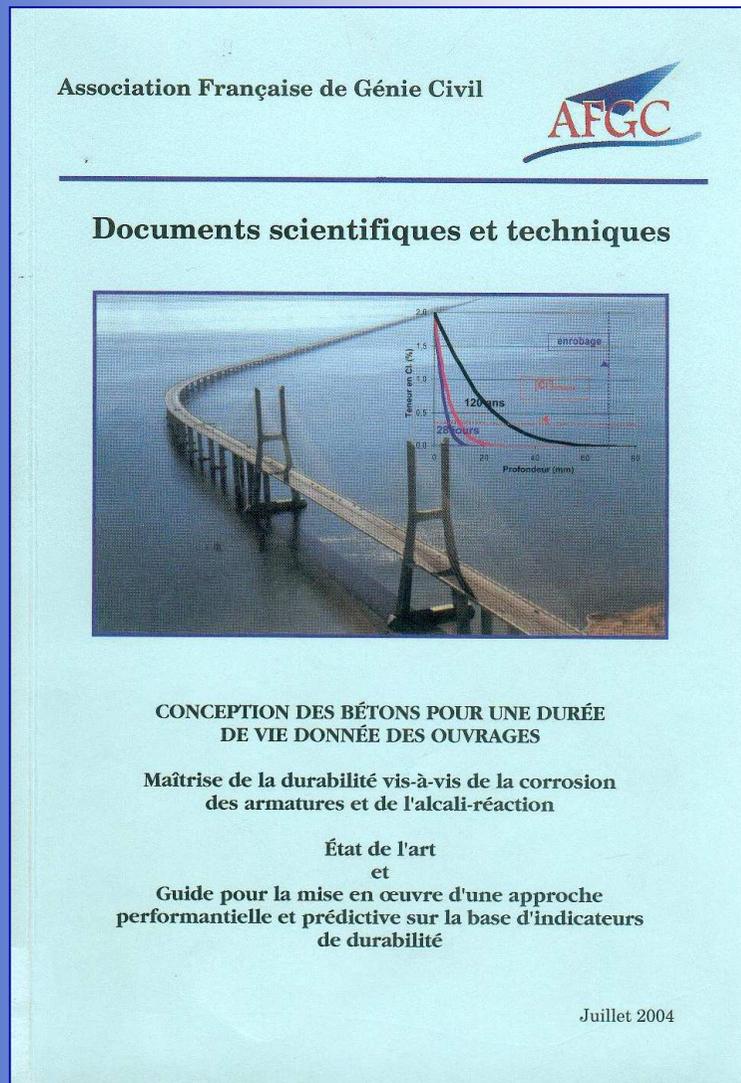


Alexandre PAVOINE

**Remerciements à
C.Aubagnac et B. Thauvin (Cerema)
pour leur contribution à l'exposé**

ENPC Marne-la-Vallée - 23 octobre 2014

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage Référentiel



Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Contexte et enjeux

Le contexte

- Importance du patrimoine des ouvrages d'art en béton
- Vieillesse, dégradation (corrosion, gel interne et écaillage, RGI...)

Les enjeux

- Anticiper l'apparition des dégradations:
 - Surveiller les structures en béton (armé)
 - Évaluer l'avancement des phénomènes de dégradation
 - Pronostiquer l'échéance d'apparition des dégradations
- Programmer des actions de maintenance préventive
- Évaluer l'efficacité des réparations éventuelles

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

La problématique

Dégradations du béton :

▶ Corrosion des armatures (Cl^- et CO_2)

▶ Alkali-réaction

▶ Réaction Sulfatique Interne

▶ Gel/dégel

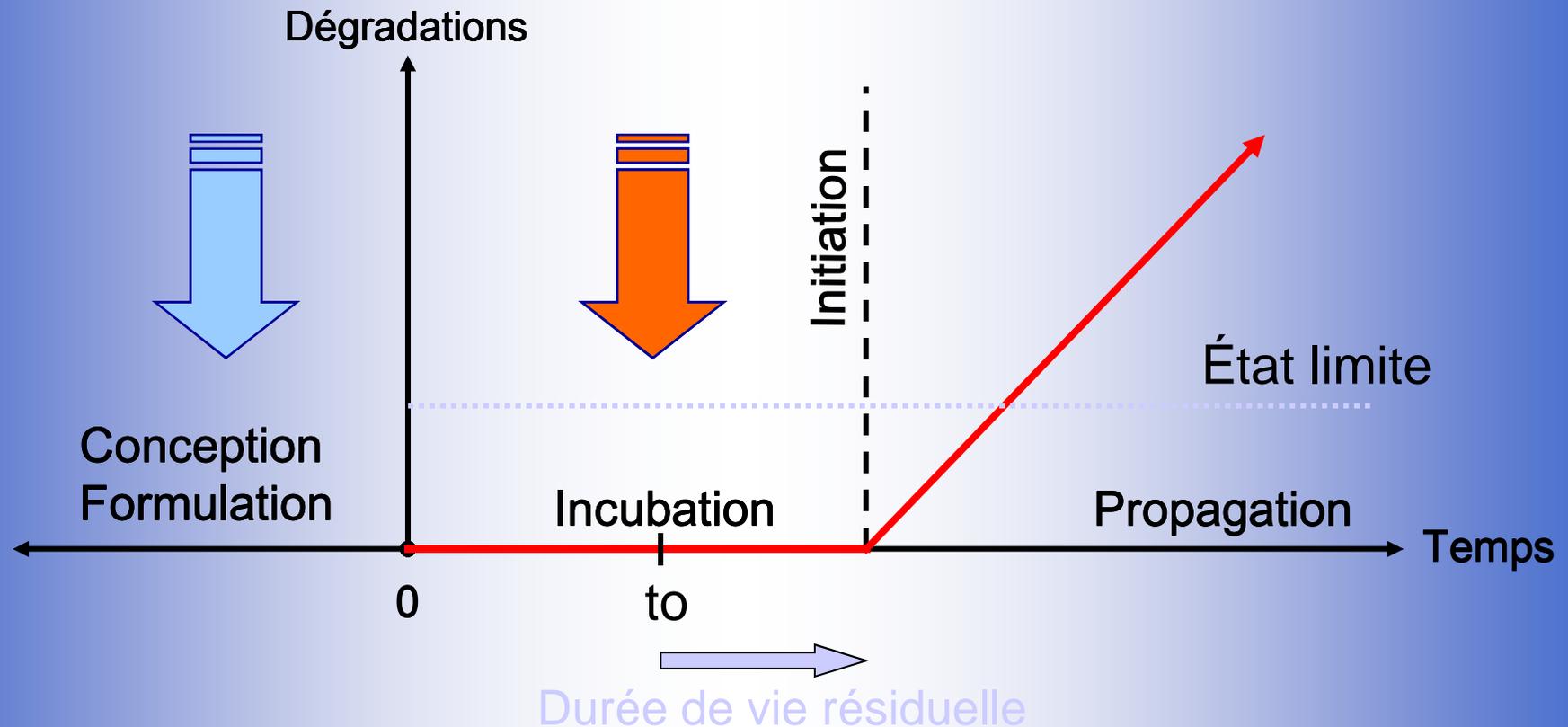
Objectifs :

▶ Évaluer l'état de la structure vis-à-vis de la dégradation

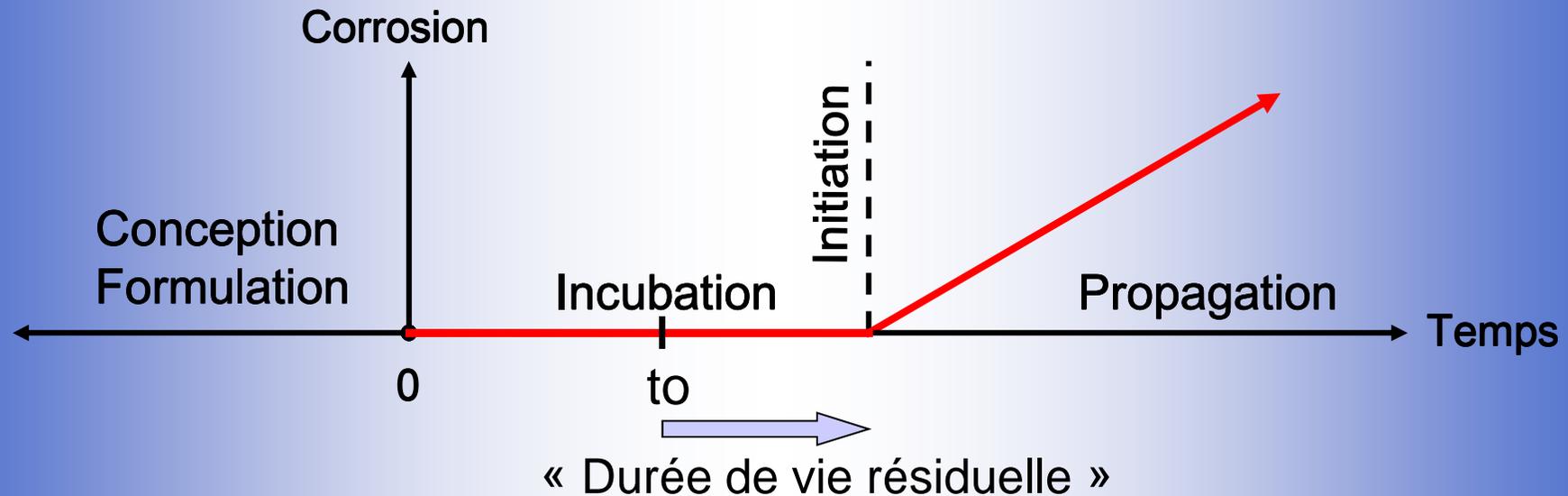
▶ Prédire/pronostiquer l'évolution de la dégradation

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage La problématique

Gestion des ouvrages par le maître d'ouvrage ou le gestionnaire



Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage « durée de vie résiduelle » vis à vis de la corrosion



« Durée de vie résiduelle » du béton armé vis-à-vis de la corrosion des armatures (phase d'incubation) :
Temps au bout duquel le front de chlorures et/ou le front de carbonatation atteint les armatures

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Méthodologie de diagnostic

Indicateurs de durabilité

Caractérisent les propriétés du béton vis à vis d'une dégradation donnée

Essais en laboratoire sur éprouvettes

Données de conception/réalisation
Données environnementales

Témoins de durée de vie

Évaluent l'avancement du processus de dégradation

Essais in situ ou sur prélèvements

Évaluation de l'état de la structure à un instant t_0

Prédiction/pronostic de l'état de la structure à $t_0 + \Delta t$
Évaluation de la « durée de vie résiduelle »

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Méthodologie de diagnostic

Indicateurs de durabilité

- ✓ Porosité accessible à l'eau (P_{eau})
- ✓ Coef. de Dif. des chlorures (D_{app})
- ✓ Perméabilité au gaz (K_{gaz})

- ✓ Teneur en portlandite (Ca(OH)_2)

- ✓ Résistivité électrique (ρ)

Données de conception et de réalisation

- ✓ Enrobage des armatures (e)
- ✓ Fissuration, hétérogénéités

Témoins de durée de vie

- ✓ Profondeur de carbonatation (X_c)
- ✓ Position du front de chlorures
- ✓ Profil de pénétration des chlorures (X_d)
(+ méthodes électrochimiques)

Données environnementales

Exposition du béton :

- ✓ humidité
- ✓ sels marins ou de déverglaçage
- ✓ milieu agressif

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage Méthodologie de diagnostic

**Témoins de
durée de vie**



Détermination de la profondeur de carbonatation (X_c) par méthode colorimétrique (phénol-phtaléine)

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage Méthodologie de diagnostic

**Témoins de
durée de vie**

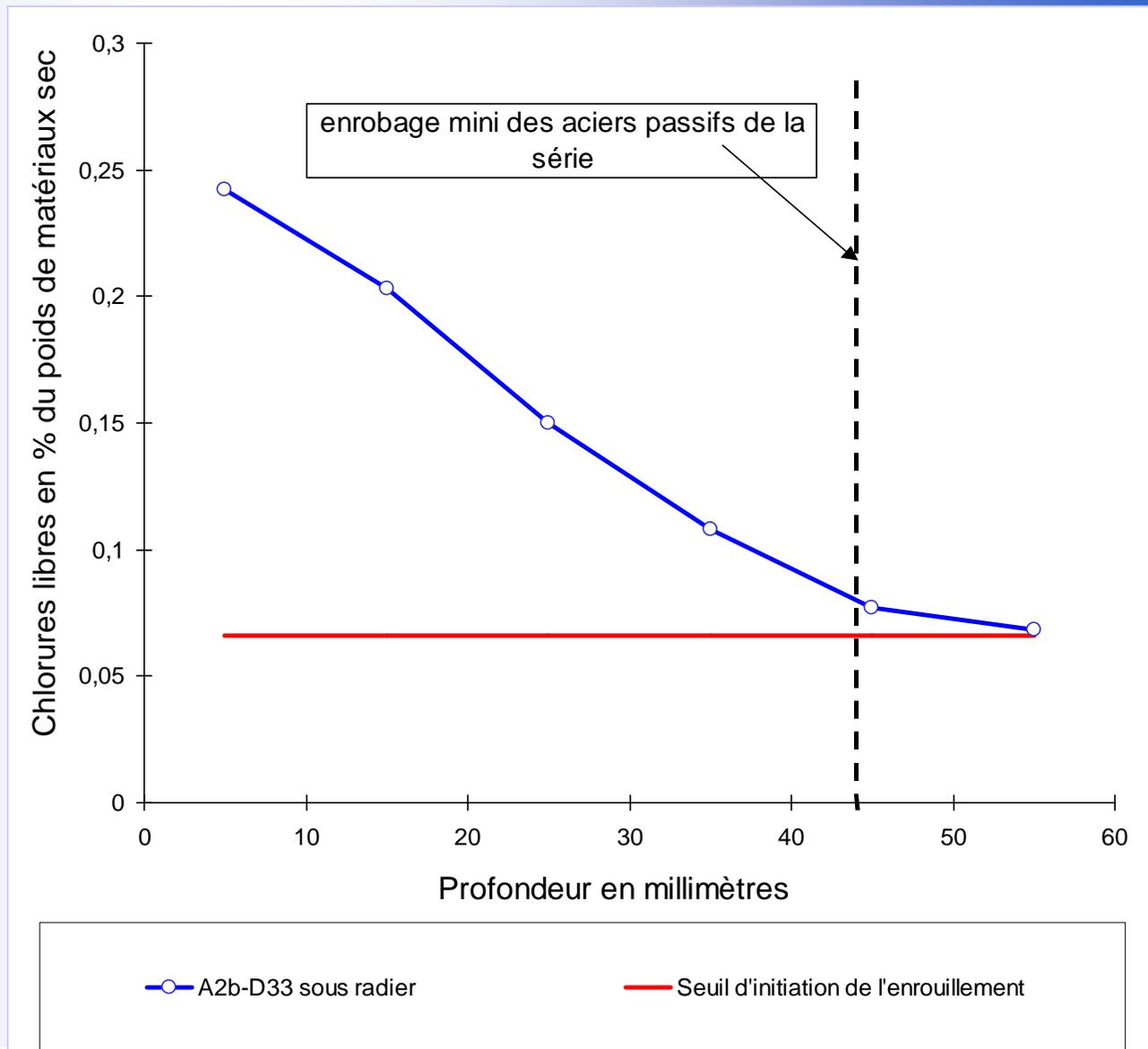
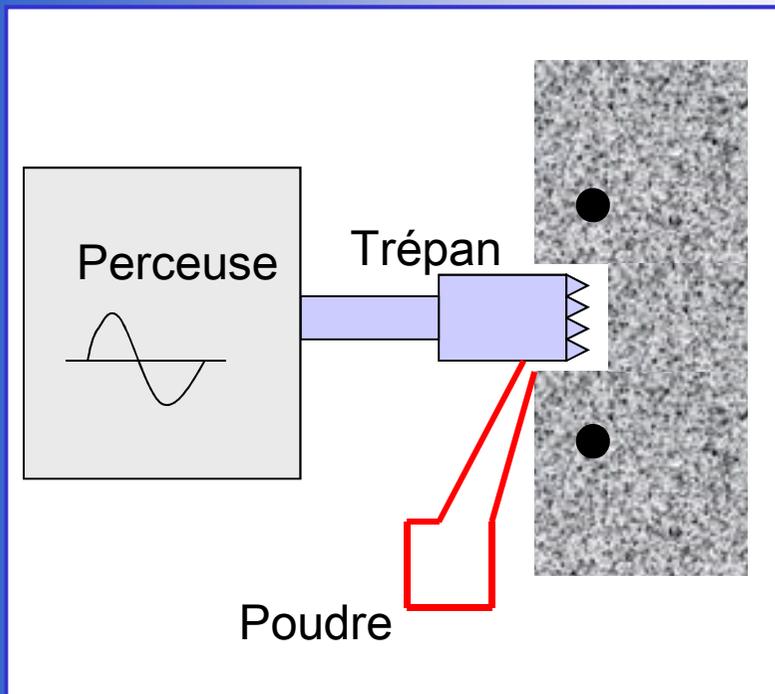


Détermination de la position du front de chlorures par
la méthode colorimétrique (nitrate d'argent)

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Méthodologie de diagnostic

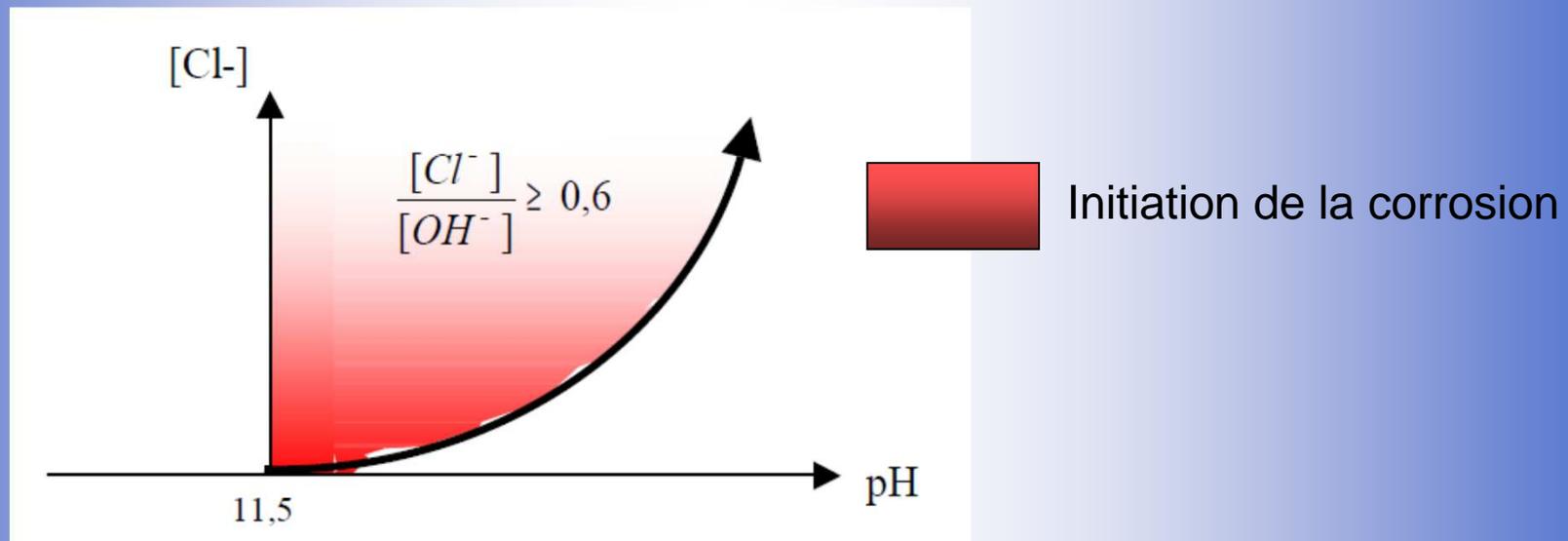
Profil de pénétration des chlorures dans l'enrobage



Témoins de durée de vie

► Pénétration des chlorures

Concentration critique d'initiation de la corrosion :
Concentration à partir de laquelle s'initie la corrosion



Si béton non carbonaté :

$[Cl^-]/[OH^-] = 0,6 \Leftrightarrow [Cl^-] = 0,4\%$ (en % masse de ciment)

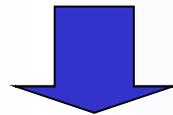
Témoins de durée de vie

► Pénétration des chlorures

Concentration critique d'initiation de la corrosion :
Concentration à partir de laquelle s'initie la corrosion

$$[Cl]_{cr} = 0,4\% \text{ (\% masse de ciment)}$$

Profils chlorures : % masse de béton

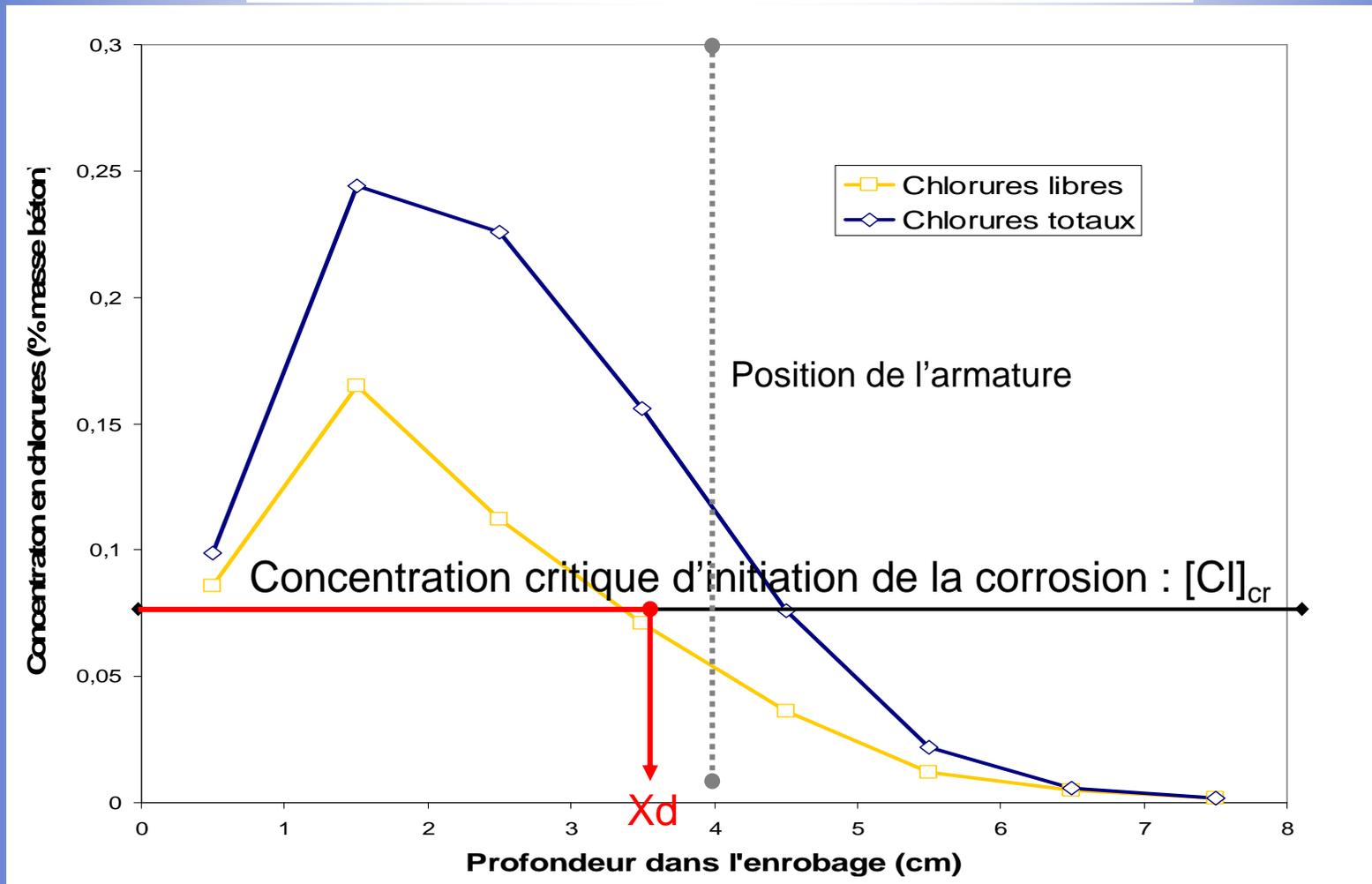


Conversion de $[Cl]_{cr}$

- Hypothèses sur masse volumique et dosage en ciment du béton...
- Avec 2500 kg/m^3 et $350\text{-}400 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \simeq 0,06\%$ (% masse de béton)

Témoins de durée de vie

Profondeur de front de chlorures X_d



Application à un ouvrage en environnement marin

Présentation de l'ouvrage



- travée isostatique (63 m)
- 4 poutres longitudinales
- 13 entretoises (tous les 5,25m)
- construction en 1957-1958 par Campenon Bernard
- zone de marnage, d'éclaboussures et d'embruns

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Méthodologie de diagnostic

Indicateurs de durabilité

- ✓ Porosité accessible à l'eau (P_{eau})
- ✓ Coef. de dif. des chlorures (D_{app})
- ✓ Résistivité électrique (ρ)

Données de conception et de réalisation

- ✓ Distribution statistique des enrobages (e) par technique RADAR

Témoins de durée de vie

- ✓ Profondeur de carbonatation (X_c)
- ✓ Position du front de chlorures
- ✓ Profil de pénétration des chlorures (X_d)

Données environnementales

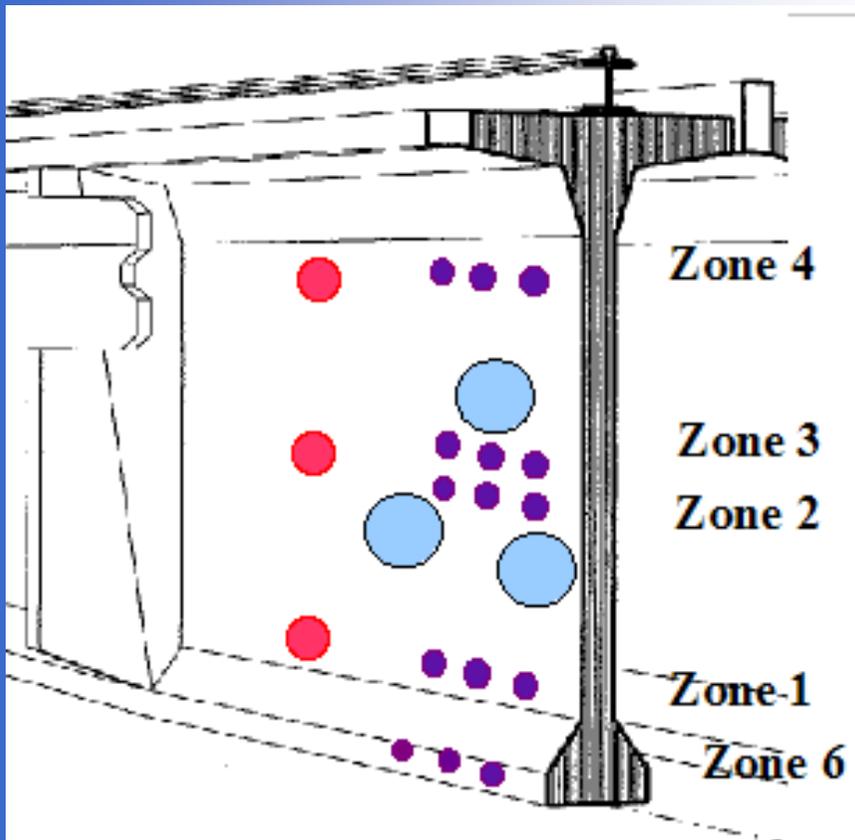
- ✓ Prise en compte de l'exposition du béton dans le lotissement des investigations

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Plan de prélèvements, échantillonnage

Les témoins de durée de vie sont directement liés à l'environnement du béton

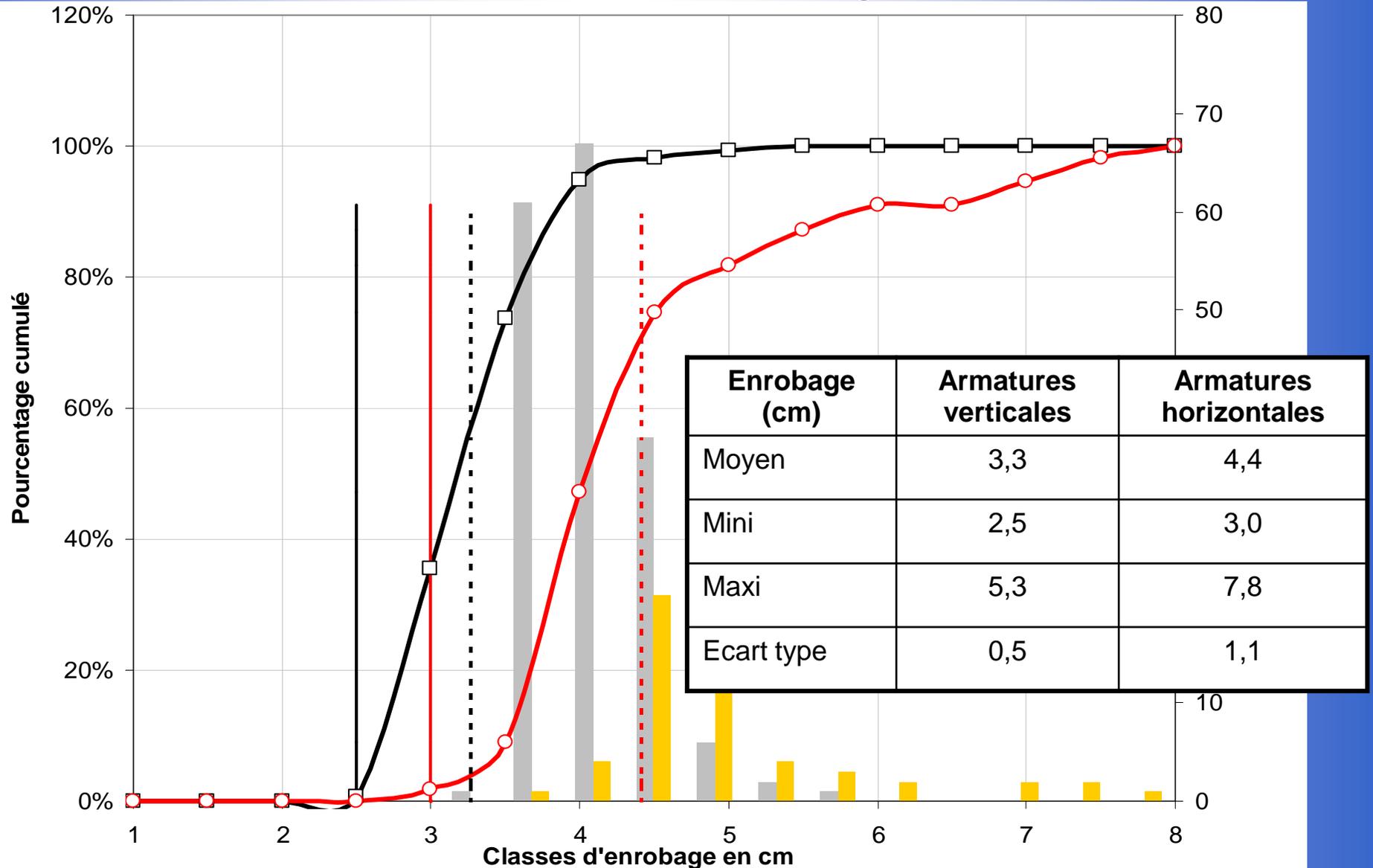
- ▶ Poutre extérieure
- ▶ Face exposée aux vents dominants
- ▶ Plan d'échantillonnage « vertical » pour tenir compte du marnage



	Nature de la donnée	Nature de l'investigation	Notation
●	Témoins de durée de vie	Profondeur de carbonatation (carottage 50mm)	Pour une zone i: 3 prélèvements: Cli1, Cli2, Cli3
●		Profils de pénétration des chlorures (prélèvement de poudre)	Pour une zone i: 1 prélèvement: Cai
●	Indicateurs de durabilité	P_{eau} , D_{app} , ρ (carottage 100mm)	

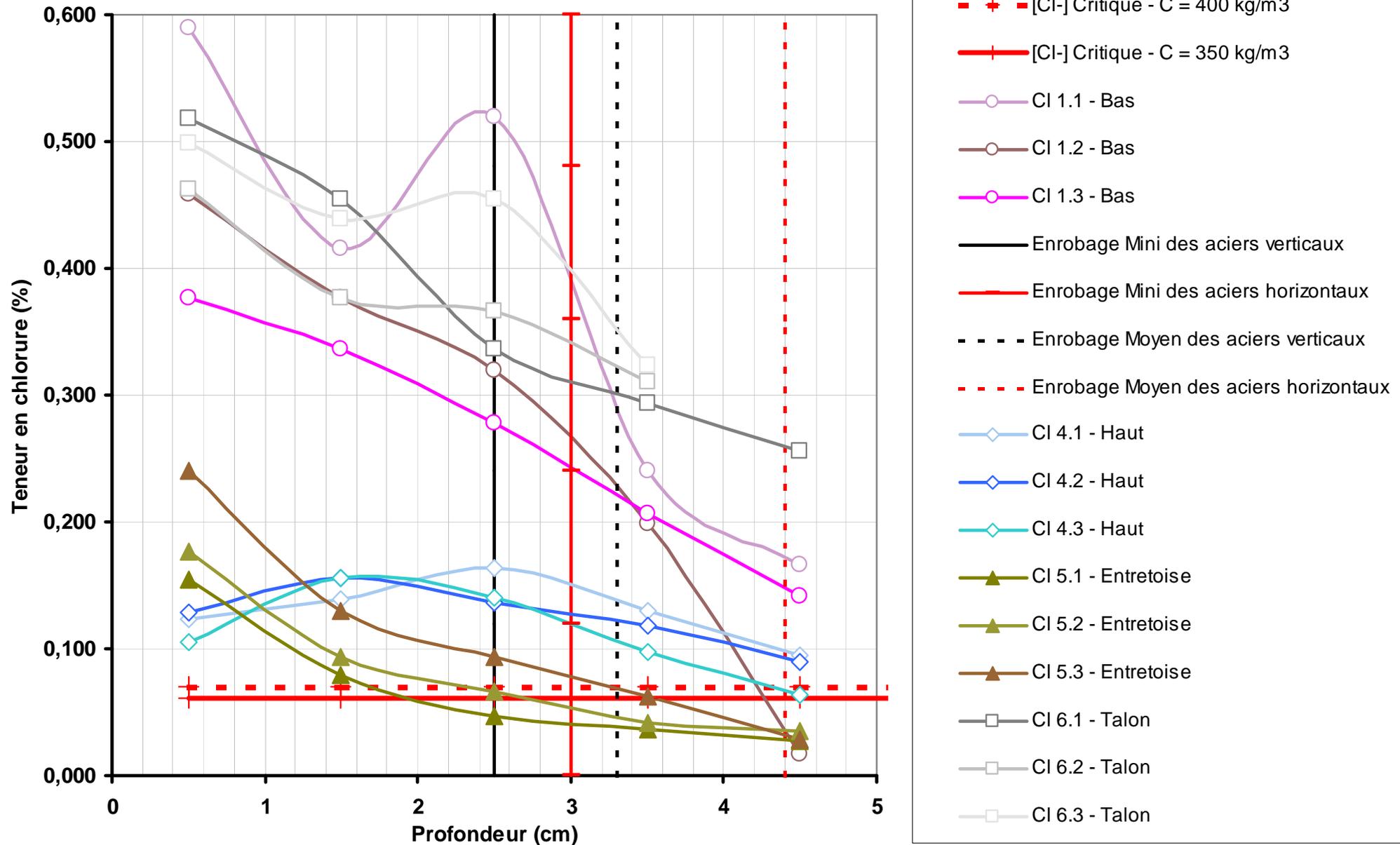
Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Distribution des enrobages



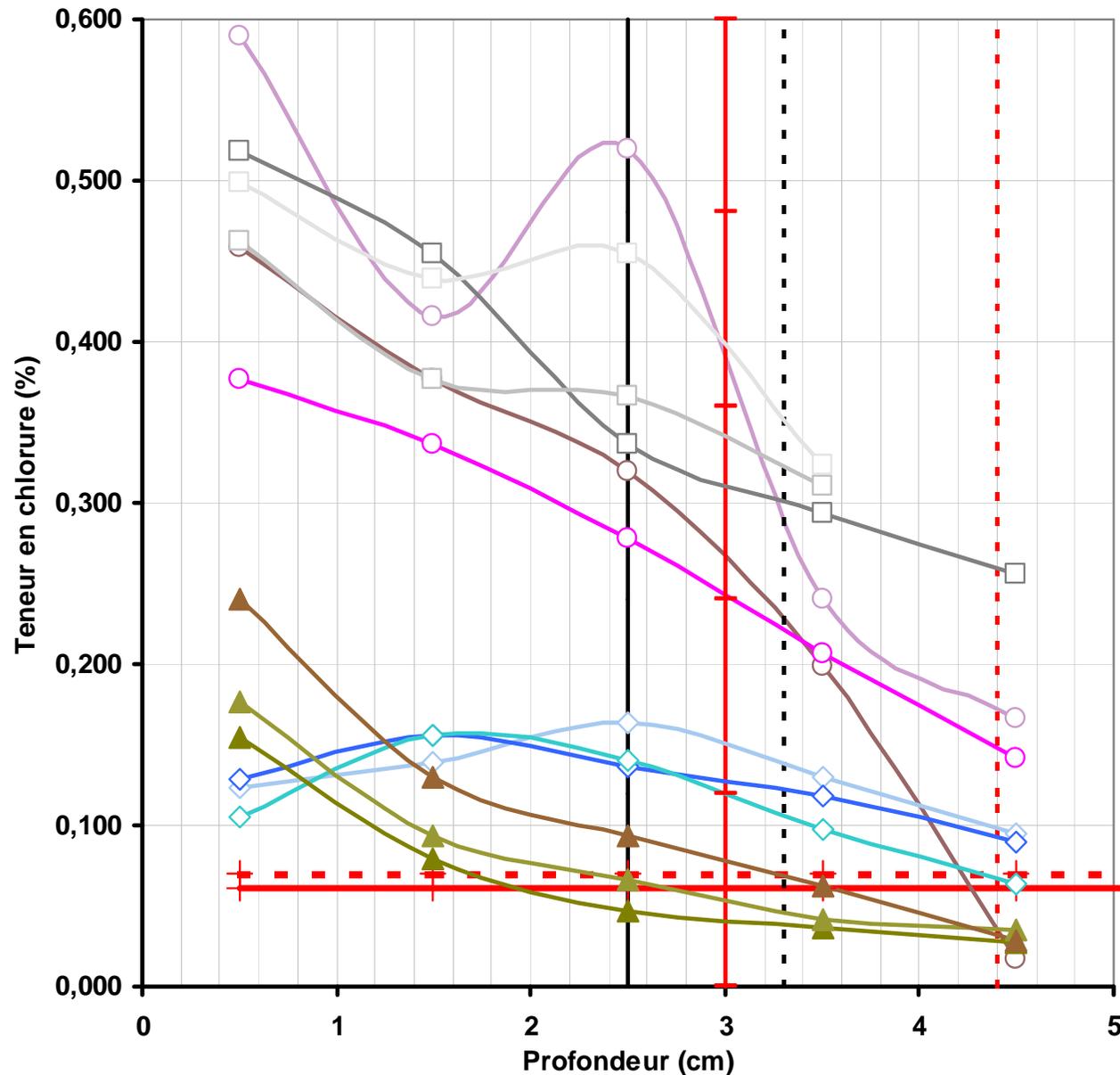
Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Profils de pénétration des chlorures



Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Profils de pénétration des chlorures



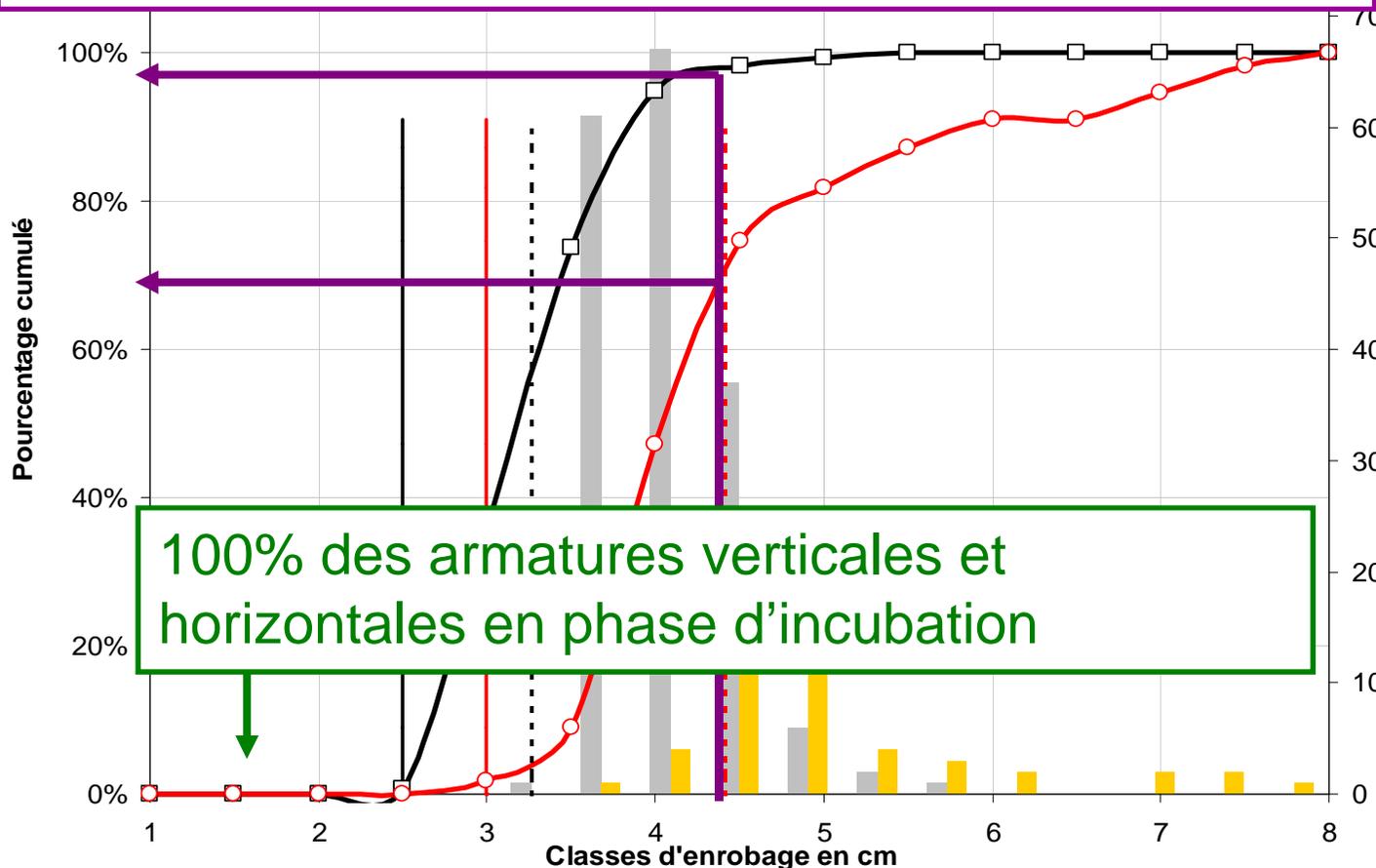
Zone	Profils	X _d (cm)
Haut	CI4.1	> 4,5
	CI4.2	> 4,5
	CI4.3	4,3
Milieu	CI2.1	< 0,5
	CI2.2	< 0,5
	CI2.3	< 0,5
Milieu	CI3.1	0,6
	CI3.2	< 0,5
	CI3.3	< 0,5
Bas	CI1.1	> 4,5
	CI1.2	4,2
	CI1.3	> 4,5
Talon	CI6.1	> 4,5
	CI6.2	> 4,5
	CI6.3	> 4,5
Entretoise	CI5.1	1,7
	CI5.2	2,3

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Profils de pénétration des chlorures et distribution des enrobages

Exploitation statistique:

98% des armatures verticales en phase de propagation
 70% des armatures horizontales en phase de propagation



Zone	Profils	X_d (cm)
Haut	CI4.1	> 4,5
	CI4.2	> 4,5
	CI4.3	4,3
Milieu	CI2.1	< 0,5
	CI2.2	< 0,5
	CI2/3	< 0,5
Milieu	CI3.1	0,6
	CI3.2	< 0,5
	CI3.3	< 0,5
Bas	CI1.1	> 4,5
	CI1.2	4,2
	CI2.3	> 4,5
Talon	CI6.1	> 4,5
	CI6.2	> 4,5
	CI6.3	> 4,5
Entretoise	CI5.1	1,7
	CI5.2	2,3

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Mesure des indicateurs de durabilité

Indicateurs de durabilité	Classes de durabilité potentielle				
	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
Porosité accessible à l'eau P_{eau} (%)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coefficient de diffusion des chlorures D_{app} ($10^{-12}.m^2.s^{-1}$)	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Résistivité électrique ($\Omega .m$)	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000

Indicateurs de durabilité	Résultats des essais
Porosité accessible à l'eau – P_{eau} (%)	13,1
Coefficient de diffusion des chlorures D_{app} ($10^{-12}.m^2.s^{-1}$)	2,6
Résistivité électrique ρ ($\Omega .m$)	325

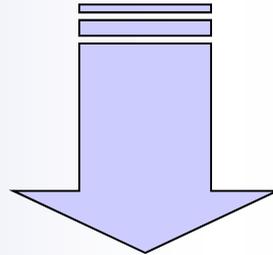
Classe de durabilité potentielle	Durée de vie
Moyenne	< 30 ans
Élevée	50 à 100 ans
Élevée	-

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Estimation de la « durée de vie résiduelle »

Objectif:

Pour les armatures en phase d'incubation, déterminer le temps au bout duquel la corrosion va s'initier.



**Choix d'un modèle de
« prédiction »**

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Estimation de la « durée de vie résiduelle »

En zone immergée:

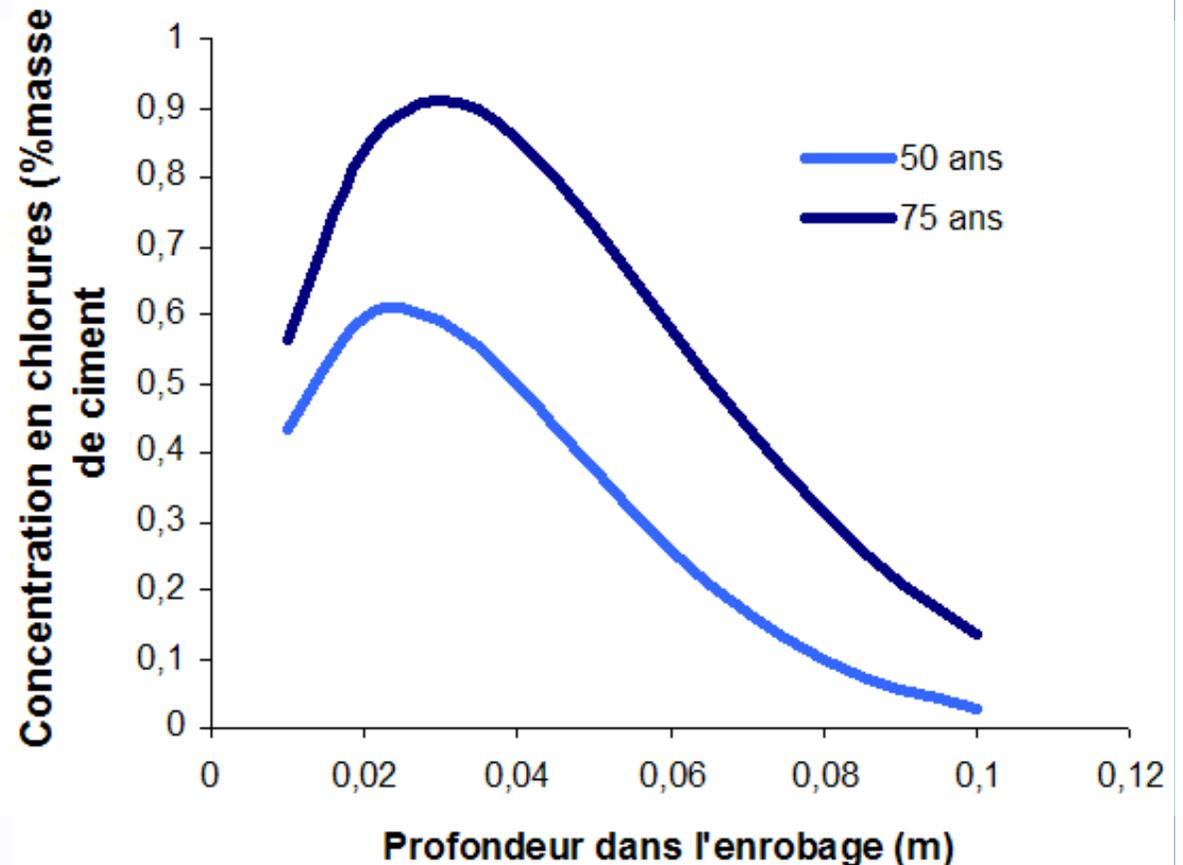
$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$C(x,t) = C_s \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}\right)$$

En zone de marnage:

$$C(x,t) = 2 \cdot W \cdot \left[\frac{2 \cdot t \cdot X}{\sqrt{\pi}} e^{-X^2} - 2 \cdot t \cdot X^2 \cdot \text{erfc}(X) \right]$$

$$X = \frac{x^2}{4 \cdot D \cdot t}$$



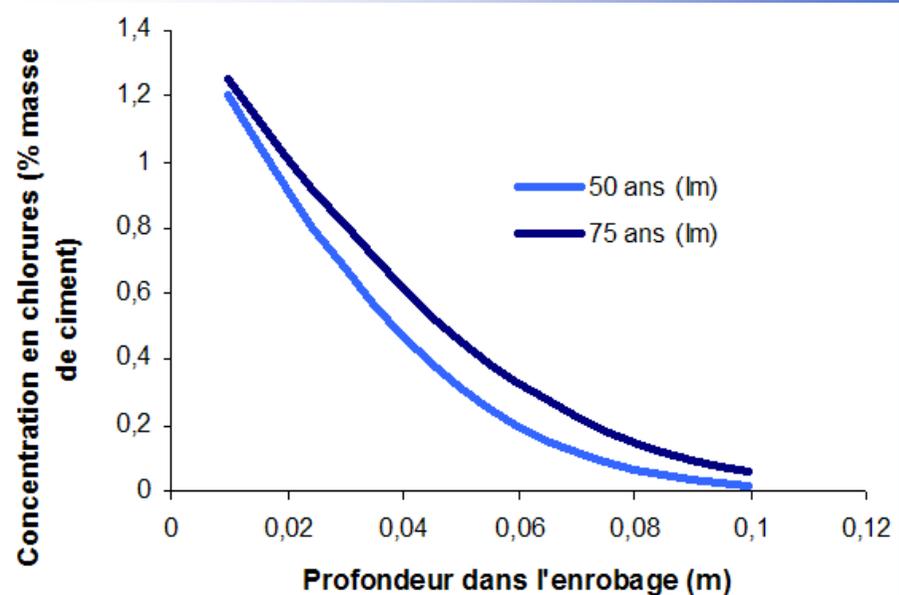
Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Estimation de la « durée de vie résiduelle »

En zone immergée:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

$$C(x,t) = C_s \cdot \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$



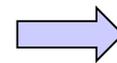
Rappel:

La corrosion s'initie lorsque le front de chlorures atteint les armatures.

Soit $X_d(t_0)$ la position du front de chlorures à l'instant t_0

Soit t_d le temps au bout duquel la corrosion s'initie

$$X_d(t_d) = e$$

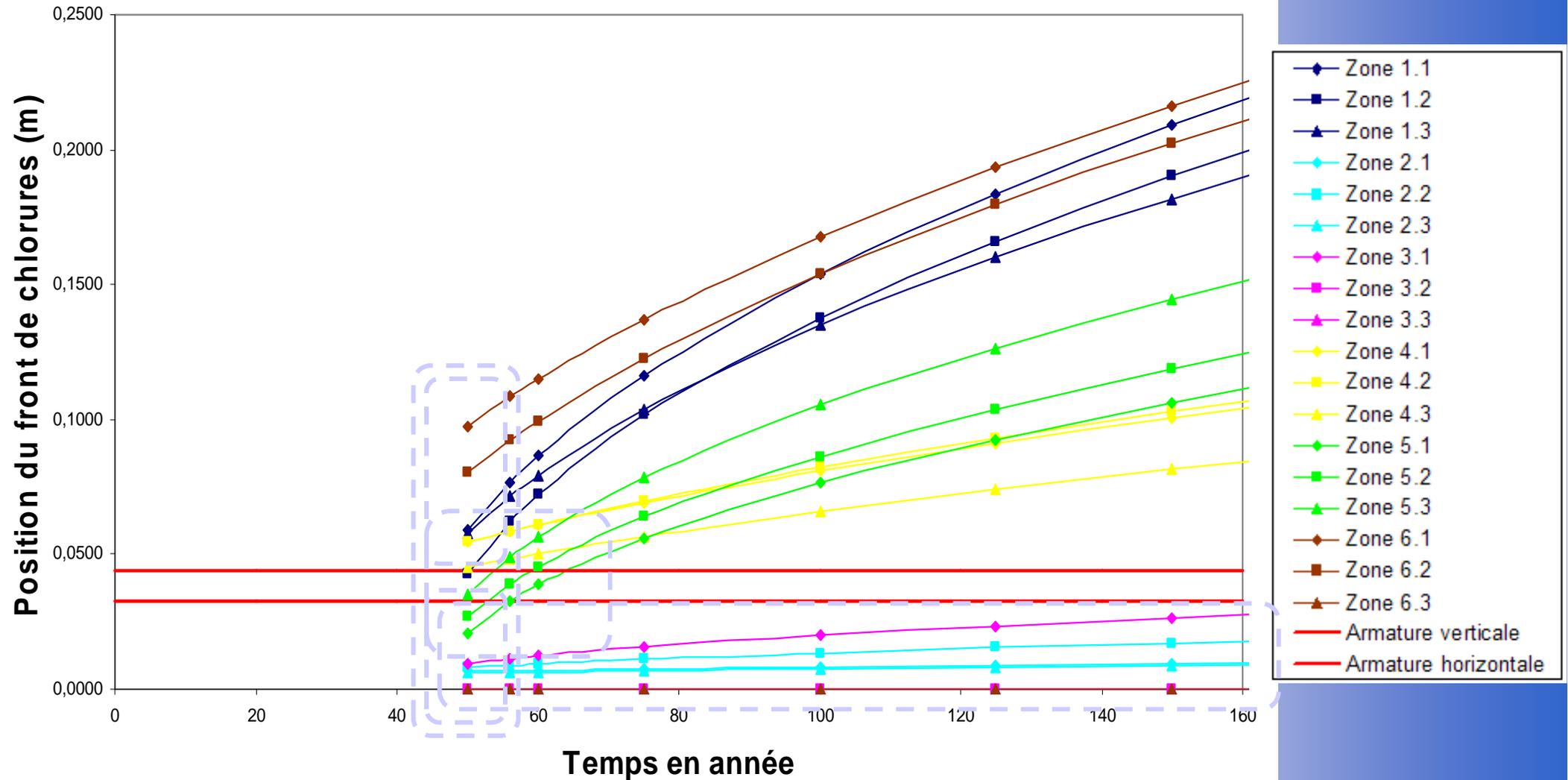


$$\Delta t = t_d - t_0$$

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Estimation de la « durée de vie résiduelle »

X_d



Témoins de durée de vie

Pourcentage d'armatures en phase de propagation

Zone	Profils	X _d (cm)	Vert.	Hor.
Haut	CI4.1	> 4,5	100%	75%
	CI4.2	> 4,5	100%	75%
	CI4.3	4,3	98%	70%
Milieu	CI2.1	< 0,5	0%	0%
	CI2.2	< 0,5	0%	0%
	CI2/3	< 0,5	0%	0%
Milieu	CI3.1	0,6	0%	0%
	CI3.2	< 0,5	0%	0%
	CI3.3	< 0,5	0%	0%
Bas	CI1.1	> 4,5	100%	75%
	CI1.2	4,2	98%	60%
	CI2.3	> 4,5	100%	75%
Talon	CI6.1	> 4,5	100%	75%
	CI6.2	> 4,5	100%	75%
	CI6.3	> 4,5	100%	75%
Entretoise	CI5.1	1,7	0%	0%
	CI5.2	2,3	0%	0%

Durée de vie résiduelle

Vert.	Hor.
0	0
0	0
0	0
> 30	> 30
> 30	> 30
> 30	> 30
> 30	> 30
> 30	> 30
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
0 à 5	10 à 15
0 à 5	5 à 10

+ Indicateurs de durabilité

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Conclusions

Témoins de durée de vie

- ▶ Formuler un diagnostic sur l'avancement de la corrosion en fonction des différentes parties de la structure
- ▶ Estimer la proportion d'armatures en phase d'incubation ou de propagation de la corrosion

Indicateurs de durabilité

- ▶ Évaluer les propriétés de durabilité du béton vis-à-vis de la corrosion des armatures
- ▶ Estimer la « durée de vie résiduelle » du béton pour chacune des parties de la structure

Orienter et aider le gestionnaire dans sa prise de décision sur le devenir de l'ouvrage

Évaluation de la « durée de vie résiduelle » d'un ouvrage

Conclusions

Intérêt de l'approche performantielle pour le diagnostic :

- ▶ Méthodologie d'expertise
- ▶ Rigueur scientifique
- ▶ Indicateurs quantifiés

Précautions :

- ▶ Corrosion : phénomène électrochimique complexe
- ▶ Incertitudes : méthodes de mesure, composition des bétons, seuil d'initiation...
- ▶ Béton armé = matériau hétérogène : enrobage, qualité béton



- Probabilisation du diagnostic
- Introduction de variables aléatoires (X_{cr} , e , D_{app} , ...)

Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives



Merci de votre attention