

Fiabilité des Matériaux et des Structures 2010
6^{èmes} Journées Nationales de Fiabilité

Caractérisation de l'aléa de la profondeur de l'enrobage de structures en béton armé : Étude de son influence sur la probabilité d'initiation de la corrosion induite par la pénétration des chlorures

Par :

E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs et E. Leonel

24-25-26 Mars 2010 –Toulouse

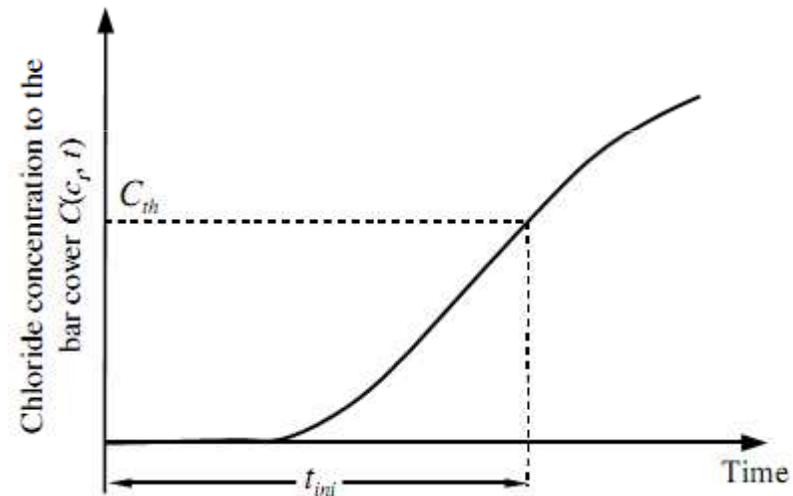
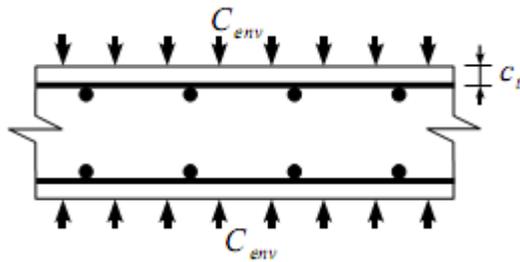


Plan de la exposé

1. Introduction
2. Modélisation de la pénétration des ions chlorures
 - Diffusion des chlorures
 - Diffusion de l'humidité
 - Transfert de la chaleur
3. Exemple
4. Conclusions

1. Introduction

- ▶ Facteurs qui réduisent la durabilité des structures en béton armé:
 - pénétration des chlorures,
 - carbonatation,
 - fatigue,
 - fluage, etc
- ▶ Temps d'initiation de la corrosion :



- ▶ Objectif:
 - Étudier l'influence de la profondeur de l'enrobage sur la probabilité d'initiation de la corrosion

2. Caractérisation de l'aléa de la profondeur de l'enrobage

- ▶ La profondeur de l'enrobage => définie par les normes en fonction des conditions d'exposition (i.e., EN206)
- ▶ Principale source d'aléa => qualité de la construction (Duracrete, 2000)
- ▶ Modèles probabilistes de la profondeur de l'enrobage :

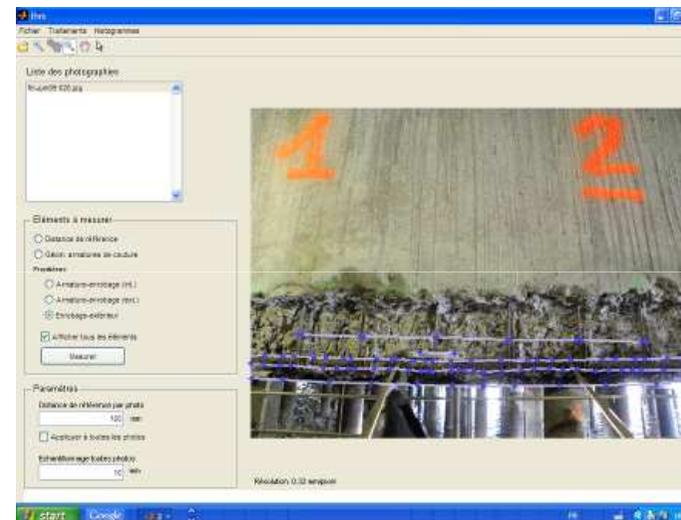
Référence	Distribution	Moy.	COV
Duracrete, 2000	Log-normale	VS	0.30
Vu et Stewart, 2000	Normale tr. à 15 mm	VS + 8.6	$\sigma = 14.7$ mm
Vu, 2003	Normale	VS + 3.2mm	$\sigma = 9.5$ mm
Val et Stewart, 2003	Normale	VS + 6mm	$\sigma = 11.5$ mm
Lounis, 2005	Normale	VR	0.45
Duprat, 2007	Log-normale	VS	0.10-0.20
Val et Trapper, 2008	Normale tr. à 10 mm	VS + 6mm	0.25
Sudret, 2008	Log-normale	VS	0.20
Suo et Stewart 2009	Normale	VS + 3.2mm	$\sigma = 9.2$ mm

VS : Valeur spécifiée par la norme ou par le spécialiste.

VR : Valeur réelle.

2. Caractérisation de l'aléa de la profondeur de l'enrobage

- ▶ Caractérisation => analyse d'images provenant d'un chantier du Port Atlantique de Nantes St Nazaire
- ▶ Logiciel => Visiodefect® (cellule de compétences IXEAD)



- ▶ Résultats :
 - valeur de conception 30 mm
 - moyenne = 36.2 mm
 - COV = 8%
 - minimum = 27mm et maximum = 37mm

3. Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

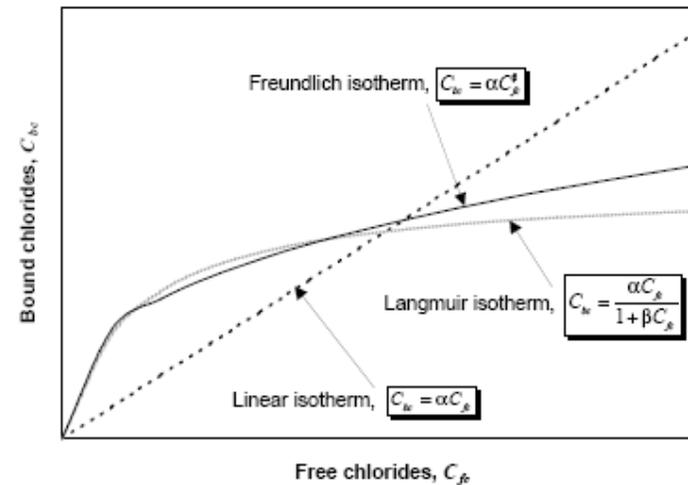
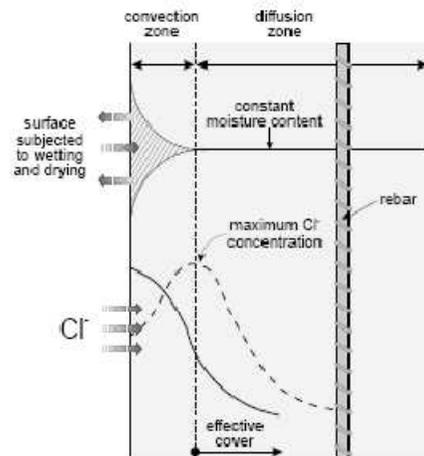
3.1. Modélisation de la pénétration des chlorures

- ▶ Loi de Fick :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{cl} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad \Rightarrow \quad C(x,t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}} \right) \right]$$

- ▶ Problèmes avec l'approche simplifiée :

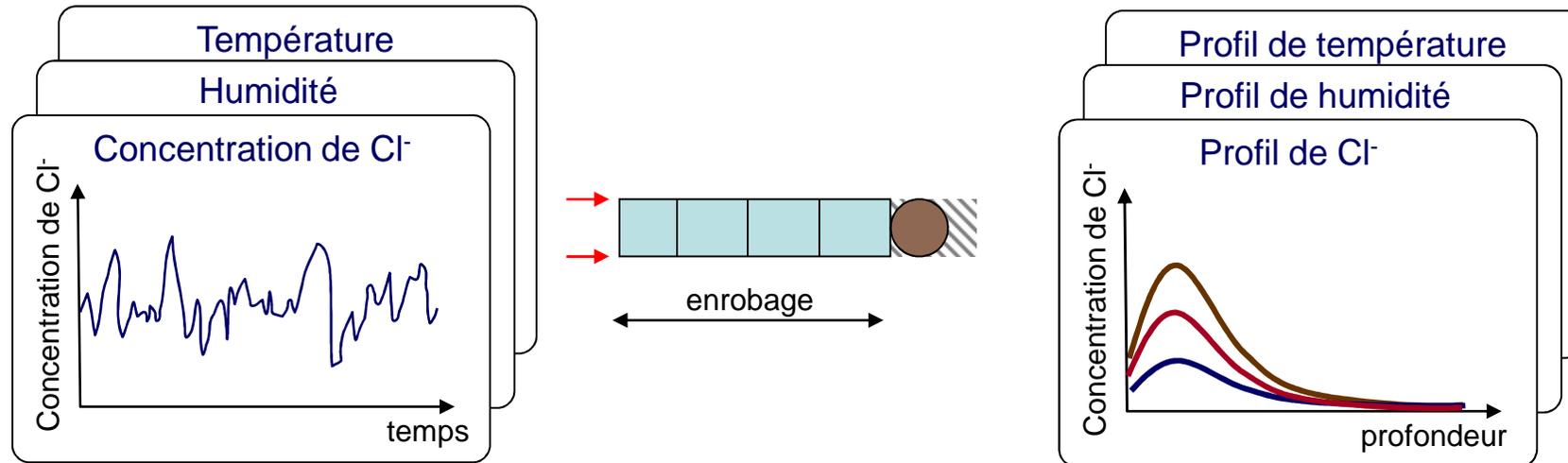
- $C_s \rightarrow$ constant
- béton \rightarrow conditions de saturation
- dépendance de la température, l'humidité et le vieillissement
- fixation



3. Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

3.1. Modélisation de la pénétration des chlorures

- ▶ Approche numérique (différences et éléments finis)

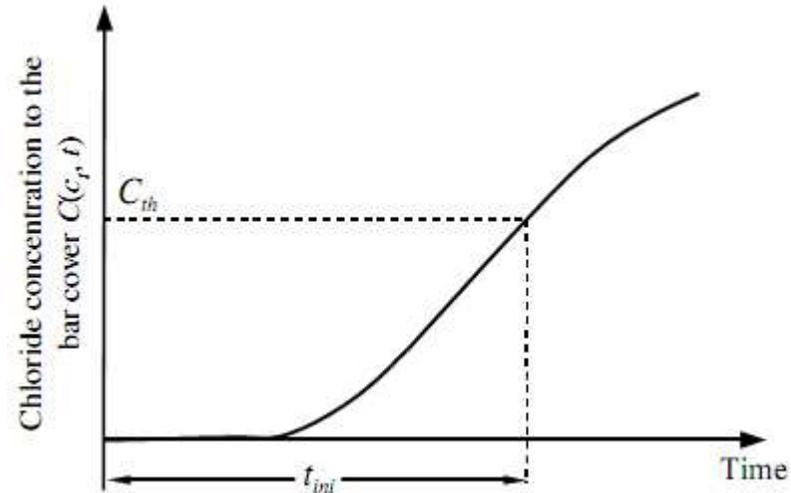


- ▶ Avantages

- $C_s \rightarrow$ variable
- dépendance de la température, l'humidité et le vieillissement
- béton \rightarrow conditions de non-saturation
- fixation des chlorures
- variables d'entrée \rightarrow dépendantes du temps, stochastiques
- flux des chlorures en deux dimensions
- conditions de borne \rightarrow Robin

3. Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

3.2. Probabilité d'initiation de la corrosion



- ▶ Fonction d'état limite :

$$g(\underline{x}, t) = C_{th}(\underline{x}) - C_{tc}(\underline{x}, t, c_t) \rightarrow \text{Modèle}$$

- ▶ Probabilité d'initiation de la corrosion :

$$p_{corr}(t) = P[g(\underline{x}, t) \leq 0 | t]$$

4. Influence sur la probabilité d'initiation de la corrosion

► Variables aléatoires de base

Variable	Unité	Distribution	Moy.	COV
– Coefficient de référence de la diffusion des ions chlorure, $D_{c,ref}$	m^2/s	log-normale	$3 \cdot 10^{-11}$	0.20
– Concentration seuil d'initiation de la corrosion, C_{th}	wt% cim	normale	0.48	0.30
– Énergie d'activation du processus de diffusion des ions chlorure, U_c	kJ/mol	beta sur [32;44.6]	41.8	0.10
– Facteur de réduction de l'âge, m		beta sur [0;1]	0.15	0.30
– Coefficient de référence de la diffusion de l'humidité, $D_{h,ref}$	m^2/s	log-normale	$3 \cdot 10^{-10}$	0.20
– Paramètre représentant le quotient $D_{h,min}/D_{h,max}$, α_0		beta sur [0.025;0.1]	0.05	0.20
– Paramètre caractérisant l'étendue du saut en D_h , n		beta sur [6;16]	11	0.10
– Conductivité thermique du béton, λ	W/($m^\circ C$)	beta sur [1.4;3.6]	2.5	0.20
– Capacité thermique spécifique du béton, c_q	J/($kg^\circ C$)	beta sur [840;1170]	1000	0.10
– Densité du béton, ρ_c	kg/m^3	normale	2400	0.20

► Modélisation stochastique du climat (Bastidas-Arteaga et al. 2009)

- variation moyenne annuelle de la température => 5 à 25 °C
- variation moyenne annuelle de l'humidité relative => 0.6 à 0.8

► Modélisation stochastique de la concentration d'ions chlorure à la surface :

- moyenne = 6 kg/m^3 (très corrosif) (Weyers, 1994)
- coefficient de variation = 0.2

4. Influence sur la probabilité d'initiation de la corrosion

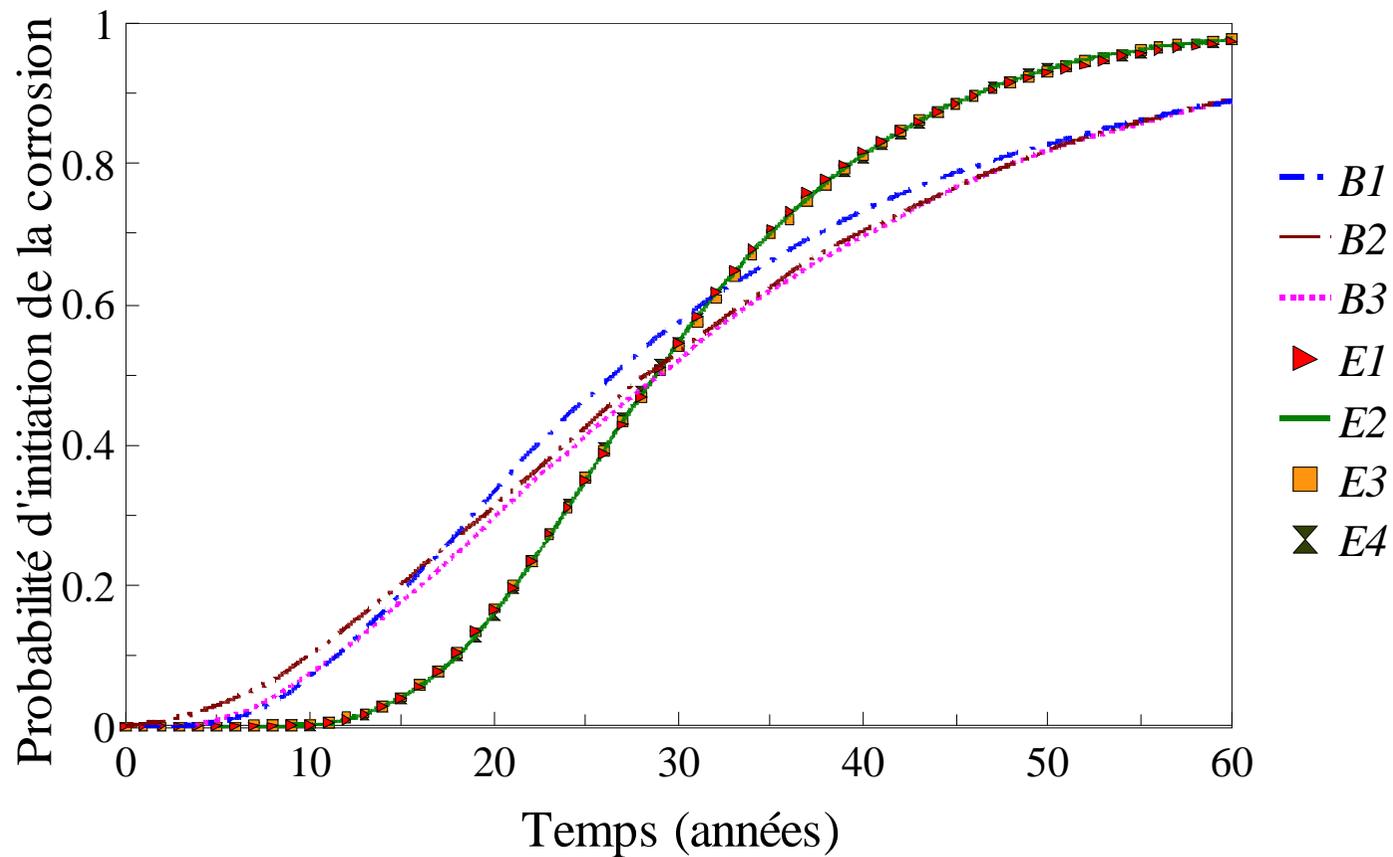
- Modèles probabilistes de la profondeur de l'enrobage à tester :

Nom.	Distribution	Moy. (mm)	COV
B1	Log-normale	36.2	0.30
B2	Normale	36.2	0.30
B3	Normale tronquée à 15 mm	36.2	0.30
E1	Log-normale	36.2	0.08
E2	Normale	36.2	0.08
E3	Normale tronquée à 27 mm	36.2	0.08
E4	Beta sur [27;47]	36.2	0.08

- Où :
 - B1, B2 B3 => littérature
 - E1, E2, E3 et E4 => analyse d'images

4. Influence sur la probabilité d'initiation de la corrosion

- Influence du type de modèle de la profondeur de l'enrobage sur la probabilité d'initiation de la corrosion :



Conclusions

- ▶ Variabilité de la profondeur de l'enrobage
- ▶ Modèles probabilistes
- ▶ Des données par analyse d'images et modèle numérique
- ▶ Importance de la bonne caractérisation de l'aléa de la profondeur d'enrobage

Merci de votre attention!