

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

Approche stochastique pour l'optimisation de l'inspection de structures de béton armé soumises à la pénétration des ions chlorure

Par :

E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, A. Chateauneuf
D. Breyse, E. Sheils, A. O'Connor

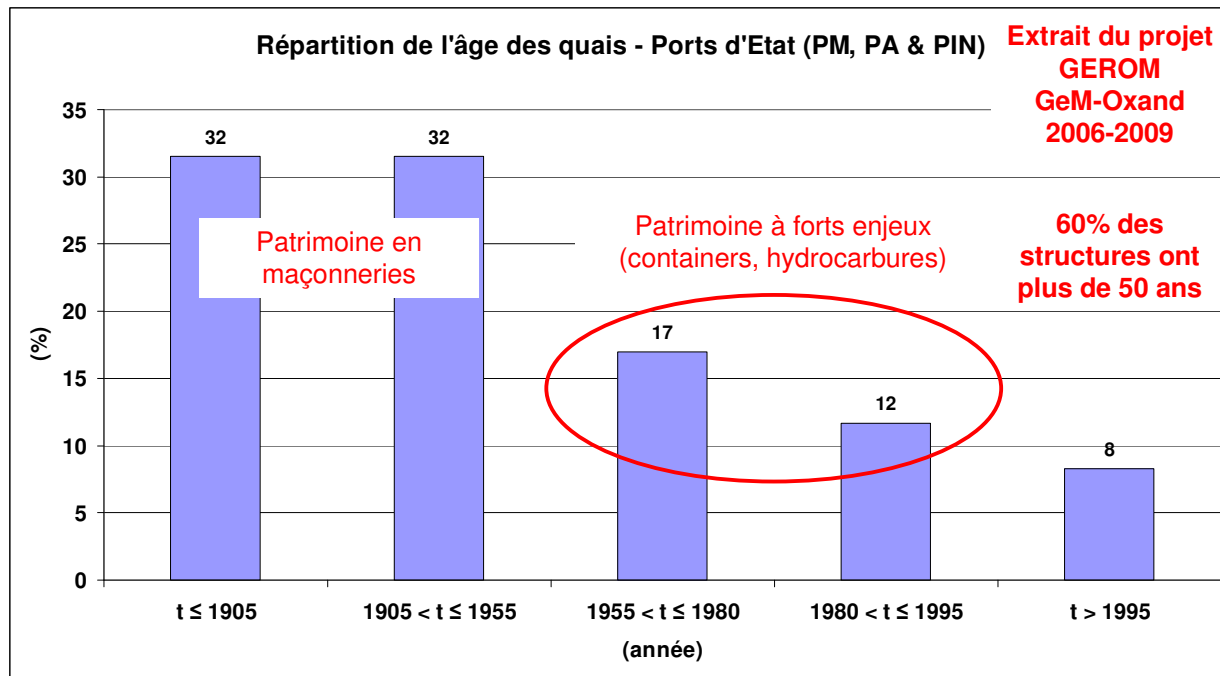
24-25-26 Mars 2010 –Toulouse



Plan de la exposé

1. Introduction
 2. Modélisation probabiliste des inspections/réparations
 3. Matrices de transition pour la modélisation de la pénétration des chlorures
 4. Analyse de coûts
 5. Exemple numérique
- Conclusions

1. Introduction



- ▶ Enjeux de la conception et du management des infrastructures :
 - réduction l'impact environnemental,
 - optimisation la gestion des ressources et
 - diminution la production des déchets

- ▶ Objectif:
 - développer une méthode pour optimiser les intervalles d'inspection des structures en béton armé soumises à la pénétration des ions chlorure.

2. Modélisation probabiliste des inspections/réparations

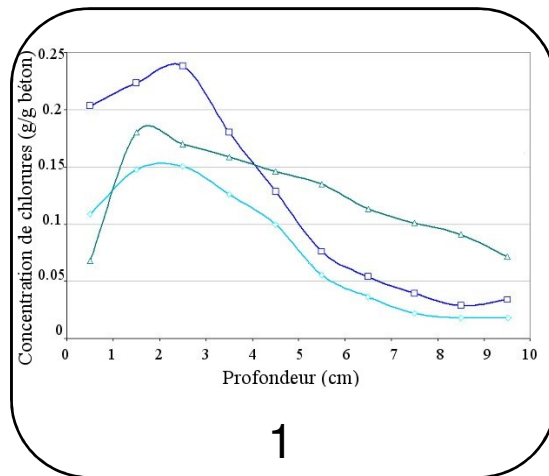
2.1. Stratégie d'inspection/réparation

- ▶ Définie dans le cadre du projet MAREO **MA**intenance et **RE**paration d'Ouvrages littoraux et fluviaux en béton: **Optimisation par analyse de risque**

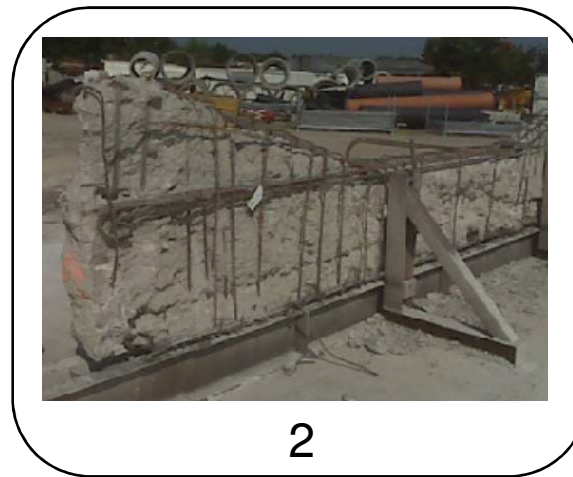
- maîtres d'ouvrage,
- entreprises et
- laboratoires de recherche

- ▶ Stratégie

1. Profils de chlorures => carottage
2. Démolition du béton pollué
3. Reconstruction de l'enrobage



1



2



3

2. Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

2.2. Modèle d'inspection

- ▶ Inspections périodiques => Δt années
- ▶ But => déterminer la concentration des chlorures à la profondeur de l'enrobage C
- ▶ Résultat de l'inspection => évaluation bruitée

$$\hat{C} = C + \eta$$

- ▶ le bruit η
 - sans biais
 - indépendant de la concentration de chlorures mesurée \hat{C} (Schoefs *et al.* 2009).
 - suit une loi normale
- ▶ probabilité de détection, PoD :

$$PoD = P\left(\hat{C} \geq C_{min} \mid \hat{C} \geq C_{min}\right) = \Phi\left(\frac{\hat{C} - C_{min}}{\sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_\eta^2}}\right)$$

2. Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

2.2. Modèle de réparation

- ▶ Critère de réparation => reconstruction quand la concentration des ions chlorure mesurée atteint une valeur seuil C_{th} (dépassivation de l'acier ou initiation de la corrosion)
- ▶ Seuil C_{th} => loi normale (Duracrete, 2000)
- ▶ Probabilité d'initiation de la corrosion entre les périodes d'inspection:

$$p_f = \Phi\left(\frac{\bar{C} - C_{th}}{\sigma_{C_{th}}}\right)$$

3. Matrices de transition pour la modélisation de la pénétration des chlorures

- ▶ Processus de Markov => prédire le futur en sachant l'état présent

- ▶ Méthode

- discrétisation de l'espace de la variable d'intérêt en M états
- détermination de la matrice de transition \mathbf{P}

- ▶ Chapman-Kolmogorov :

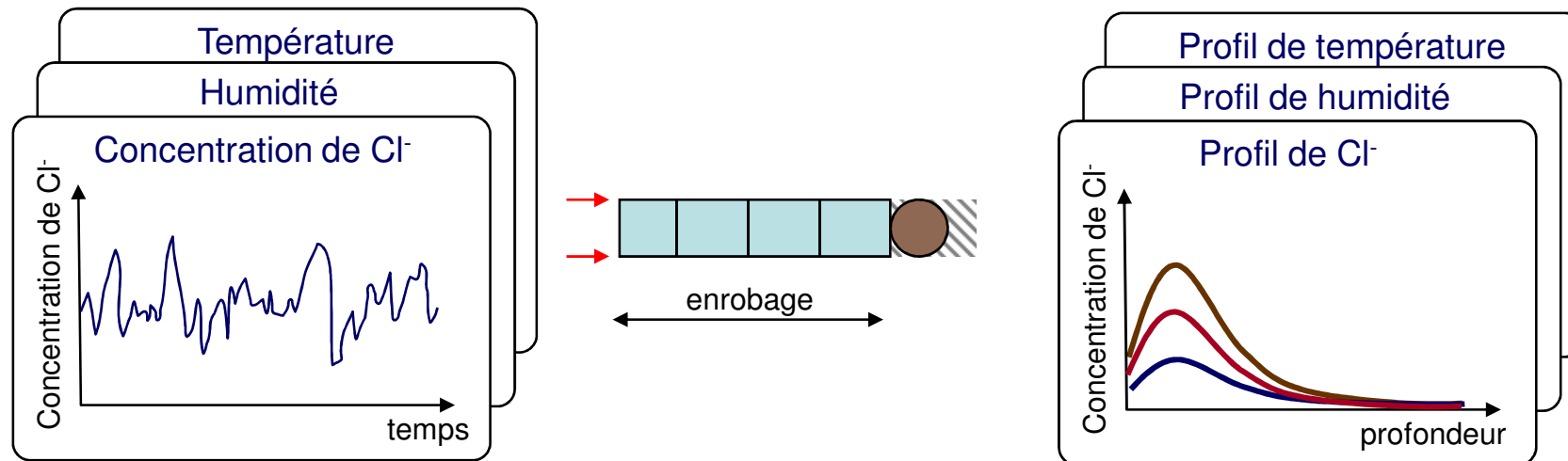
$$\mathbf{q}(t) = \mathbf{q}_{ini} \mathbf{P}^t$$

- ▶ Variable d'intérêt => concentration des chlorures à la profondeur de l'enrobage
- ▶ Problèmes avec la détermination de \mathbf{P}
 - longue durée des essais de pénétration d'ions chlorure
 - grand nombre de mesures nécessaires pour bien représenter le phénomène
- ▶ Solution proposée => détermination à partir de simulations de Monte Carlo d'un modèle étendu de pénétration des chlorures

3. Matrices de transition pour la modélisation de la pénétration des chlorures

3.1. Modélisation de la pénétration des chlorures

- ▶ Loi de Fick => 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. Matrices de transition pour la modélisation de la pénétration des chlorures

3.1. Modélisation de la pénétration des chlorures

- Variables aléatoires de base (Bastidas-Arteaga et al., 2009)

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
– 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°C)	beta sur [1.4;3.6]	2.5	0.20
– Capacité thermique spécifique du béton, c_q	J/(kg°C)	beta sur [840;1170]	1000	0.10
– Densité du béton, ρ_c	kg/m ³	normale	2400	0.20

3. Matrices de transition pour la modélisation de la pénétration des chlorures

3.2. Obtention des matrices de transition à partir des simulations

- ▶ Simulations => détermination d'un histogramme de concentrations à un instant donné

$$\hat{q}_j(t) = \frac{n_o(t)}{N}$$

où $n_o(t)$ est le nombre d'observations dans l'état j mesurées à un instant t et N le nombre de simulations

- ▶ États utilisés pour la discretization du problème

État i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C minimum (kg/m ³)	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6
C maximum (kg/m ³)	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0

- ▶ Les probabilités de transition \mathbf{a} => optimisation multi-objectif

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\mathbf{a}} \max_{\mathbf{F}} \mathbf{F}(\mathbf{a}) = (f_1(\mathbf{a}), f_2(\mathbf{a}), \dots, f_M(\mathbf{a}))^T \\ \text{s.c. } a_{ij} \geq 0 \text{ et } \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij} = 1 \end{array} \right. \quad \text{avec } \Rightarrow \quad f_j(\mathbf{a}) = \sum_{t=0}^{t_{ana}} |\hat{q}_j(t) - q_j(t, \mathbf{a})|$$

4. Analyse de coûts

- ▶ Les coûts sont calculés comme une fraction du coût initial de construction C_0

- ▶ coûts d'inspection

$$C_I = C_0 k_I$$

- ▶ coûts réparation

$$C_R = C_0 k_R$$

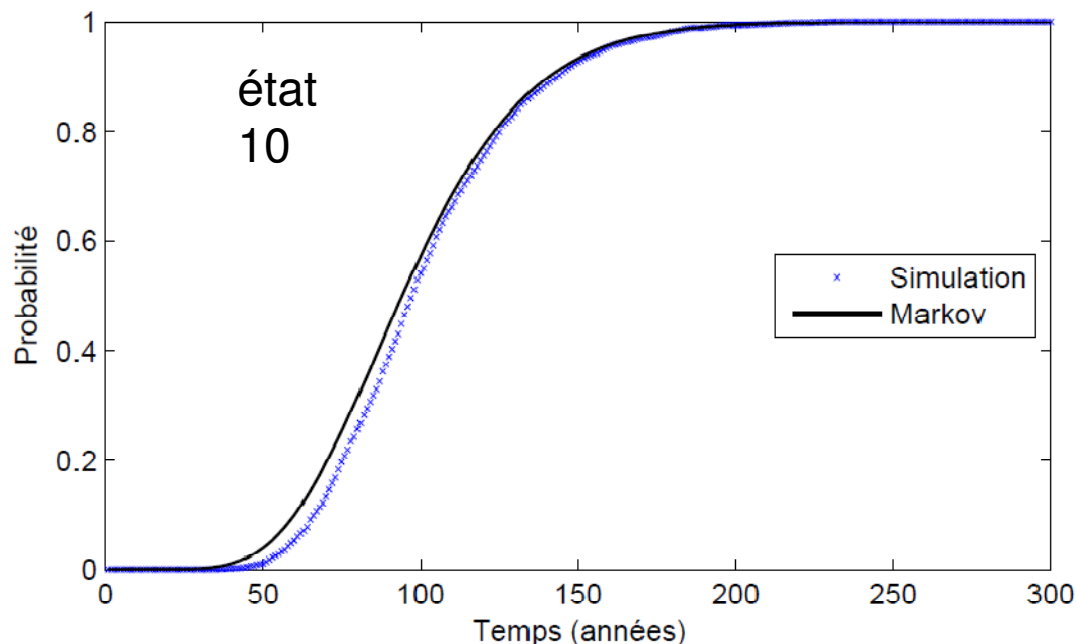
- ▶ coûts de défaillance

$$C_F = C_0 k_F$$

où k_I , k_R et k_F sont des coefficients de pondération des coûts d'inspection, de réparation et de défaillance, respectivement.

5. Exemple numérique

- ▶ 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/m³ (très corrosif) (Weyers, 1994)
 - coefficient de variation = 0.2
- ▶ Obtention des matrices de Markov :



- $M = 10$ états
- 27 probabilités de transition à déterminer
- 10000 simulations pour
- enrobage de 5cm

5. Exemple numérique

- Paramètres retenus pour les modèles => jugement

Modèle d'inspection/réparation

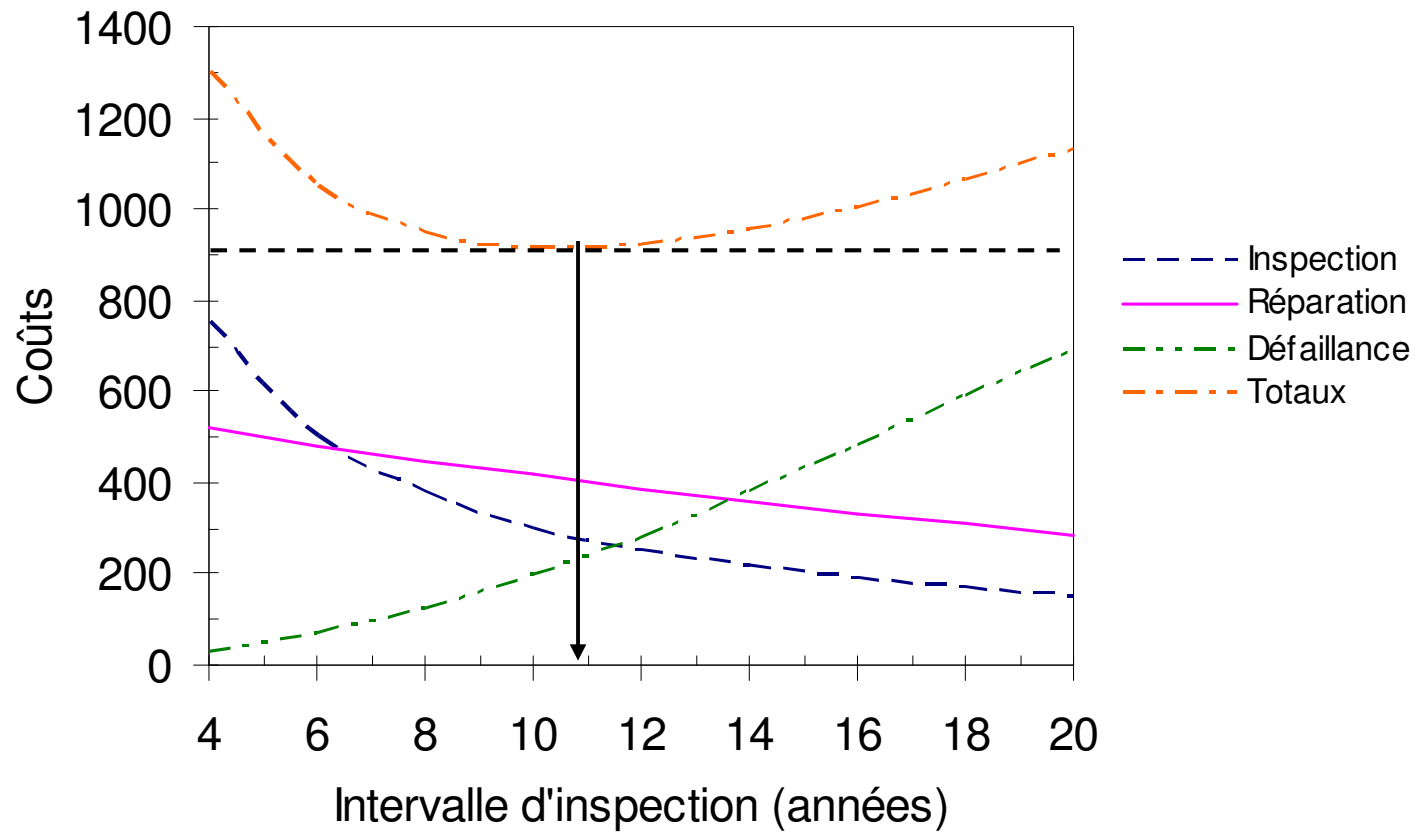
Bruit de la mesure, η , km/m ³	0.30
Écart type du bruit, σ_η , km/m ³	0.50
Seuil de détection C_{min} , km/m ³	0.10
Écart type de la mesure, σ_C , km/m ³	0.20
Concentration seuil, C_{th} , km/m ³	2.00
Écart type de la concentration seuil $\sigma_{C_{th}}$, km/m ³	0.40
Probabilité annuelle de défaillance acceptable, p_a	0.95

Modèles de coût

Coût initial de construction, C_0	1000
Coefficient d'inspection, k_i	0.05
Coefficient de réparation, k_r	0.3
Coefficient d'impact de la défaillance, k_f	1

5. Exemple numérique

- Evolution des coûts avec l'intervalle d'inspection



Conclusions

- ▶ Approche globale de l'optimisation IMR disponible
- ▶ Compatible avec une mise à jour par réseaux bayésiens (travail actuel)
- ▶ Données réelles disponibles à partir de mars (coûts, efficacité)
- ▶ Approche multicritère – développement durable (Bastidas-Arteaga et al. 2010)

Perspectives :

- ▶ Prise en compte de la variabilité spatiale et de la pénétration 2-D
- ▶ Optimisation multi-critère de la quantité de matériau à enlevée (multi-matériau, modélisation de l'aléa géométrique)
- ▶ Maintenance simultanée sur critères ELS - ELU

The partners:

- GEM (PGCO), LCPC (PGCO), IFREMER, CERIB (PGCO), LMDC, CETE de l'Ouest (PGCO),
- SEMEN-TP (PGCO), ETPO (PGCO), ARCADIS-ESG (PGCO), OXAND, ETPO (PGCO), CG44 et PANSN (PGCO, associated members), Trinity College of Dublin (IRELAND)

PGCO : Pôle Génie Civil Ouest (West Competitiveness Pole for Civil Engineering)

Contact us:

This project is led by ARCADIS ESG and scientifically coordinated by the Institute for research in civil and mechanical engineering (GeM, Nantes Atlantic University)

Dr Franck Schoefs: franck.schoefs@univ-nantes.fr

This project supports a Master of Science: MASTER RISOME (Nantes Atlantic University)



2007-2010

MAREO

Original design: LNEC, Portugal

Maintenance and REpair of concrete coastal structures: risk based Optimization