Lundi 7 juin 2010 – Cité internationale des congrès – Nantes – Métropole

Les Journées Scientifiques de l'Université de Nantes

ECND-PdL : un exemple de projet collaboratif en Pays de Loire

Prise en compte de l'erreur de mesure dans l'optimisation de l'auscultation de structures vieillissantes

E. BASTIDAS-ARTEAGA*, F. SCHOEFS*, S. BONNET*, M. SALTA**

* Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183 Université de Nantes, Centrale Nantes

** LNEC, Portugal

Réf. :MR-GenCi 06-05

Effets de la corrosion d'ouvrages en béton armé

- Corrosion → réduction de la capacité portante des structures :
  - perte de la section transversale des aciers ;
  - perte d'adhérence entre le béton et les aciers et
  - fissuration et éclatement du béton.

- Dégâts importants après 20 ou 30 ans [Kumar Mehta, 1997] → inspection et réparation.

Problématique

Gestion de structures en béton armé soumises à la pénétration des chlorures

Problèmes :

- Il n'y pas des modèles fiables → déterminer le comportement et établir les stratégies de maintenance.
- Réparation corrective → signes de dégradation visibles (fissuration) :
  - les dépenses ne peuvent pas être estimées à l'avance et
  - la sécurité des structures peut être compromise.

Questions des propriétaires / gestionnaires :

1. Comment la pénétration des ions chlorures affectera l'intégrité structurelle ?
2. Comment et quand l'inspection et la réparation doivent être entreprises ?
3. Comment déterminer une stratégie de maintenance durable ?

Objectifs

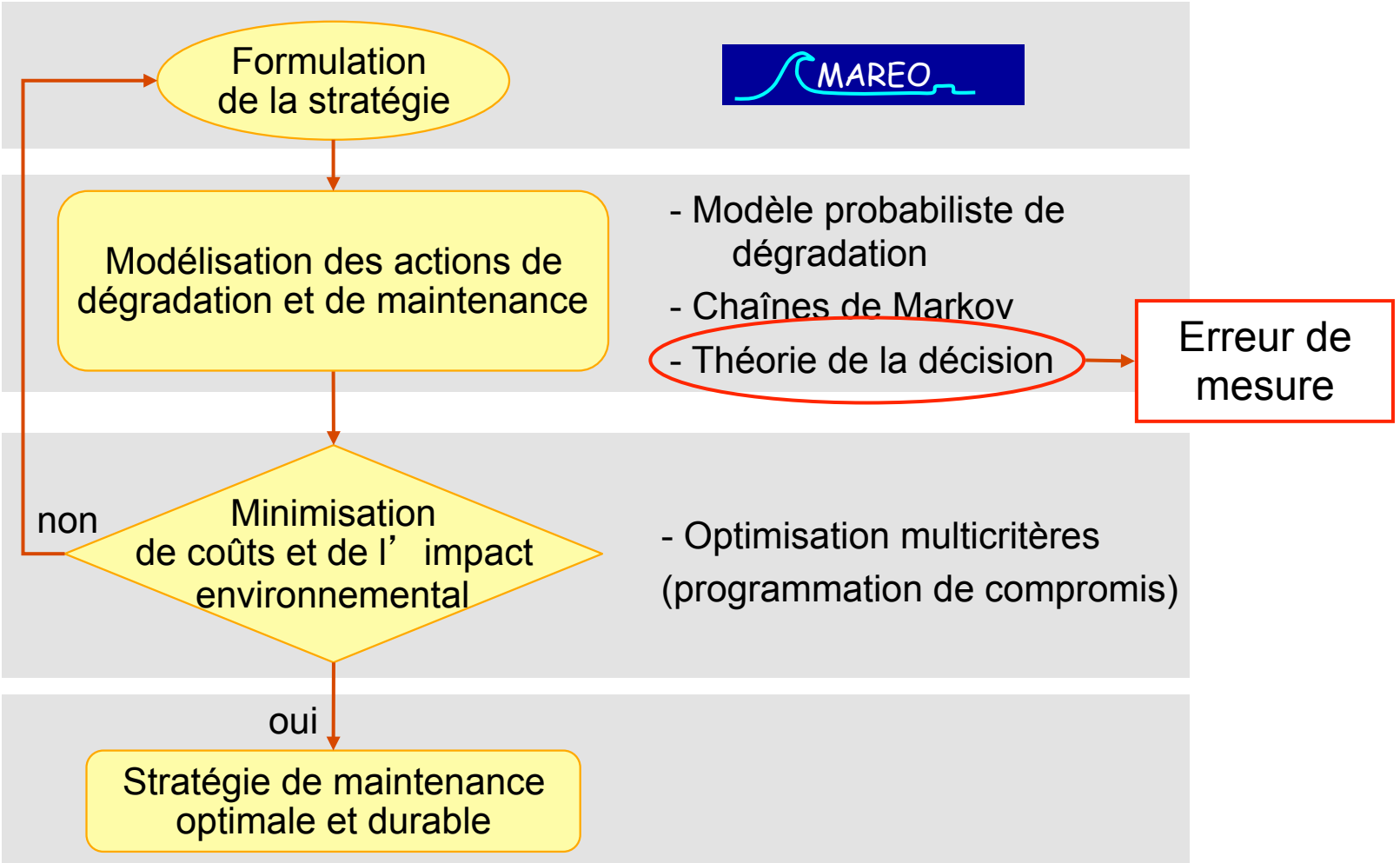
- Développer un outil de l'aide à la décision destiné à minimiser les coûts et l'impact environnemental, en assurant un niveau optimal de sûreté, pour la gestion d'ouvrages en béton armé susceptibles à la corrosion.
- Intégrer l'effet des mesures imparfaites à la stratégie de gestion.

Plan de l'exposé

Introduction

1. Description générale de la méthode
2. Stratégie de maintenance
3. Maintenance dans le cadre du développement durable
4. Exemple numérique
5. Conclusions et perspectives

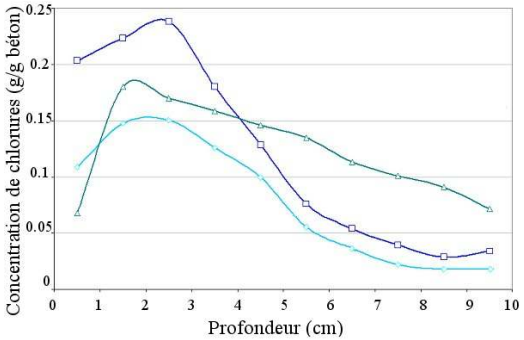
1. Description générale de la méthode



2. Stratégie de maintenance

- Réparation préventive → éviter l'initiation de la corrosion
- La structure est inspectée périodiquement tous les Δt ans
- Étapes de la stratégie de maintenance

1. Inspection : profils de chlorures → carottes prélevées sur des structures en béton

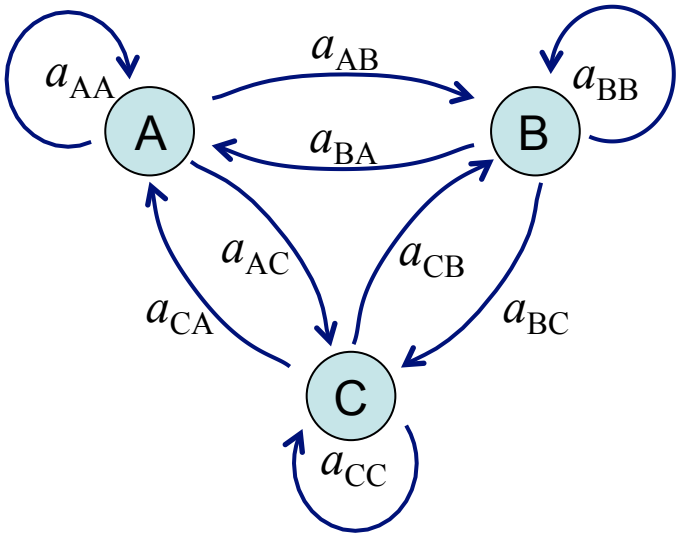


2. Réparation : reconstruction de l'enrobage

– Hydrodémolition
– Plusieurs techniques de reconstruction

2. Modèle de dégradation, d'inspection et de maintenance

- Processus de Markov



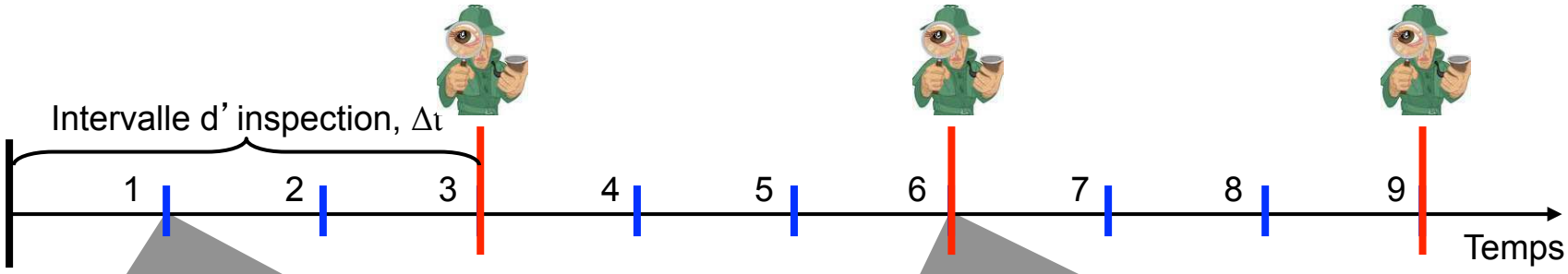
- Chapman-Kolmogorov → prédiction de l'état futur en sachant l'état présent :

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

Dégradation, inspection et maintenance

- Variable d'intérêt → concentration des chlorures à la profondeur de l'enrobage

2. Modèle de dégradation, d'inspection et de maintenance



Pour une année entre inspections

$$\mathbf{P}^{be} = \begin{bmatrix} a_{ij} & a_{ij} & a_{ij} & \cdots & a_{ij} \\ a_{ij} & a_{ij} & a_{ij} & \cdots & a_{ij} \\ a_{ij} & 0 & a_{ij} & \cdots & a_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & a_{ij} \\ a_{ij} & 0 & 0 & 0 & a_{ij} \end{bmatrix}$$

Estimation de $\mathbf{P}^{be}$

- matrice de croissance $\mathbf{P}^{gr}$
- probabilité de défaillance

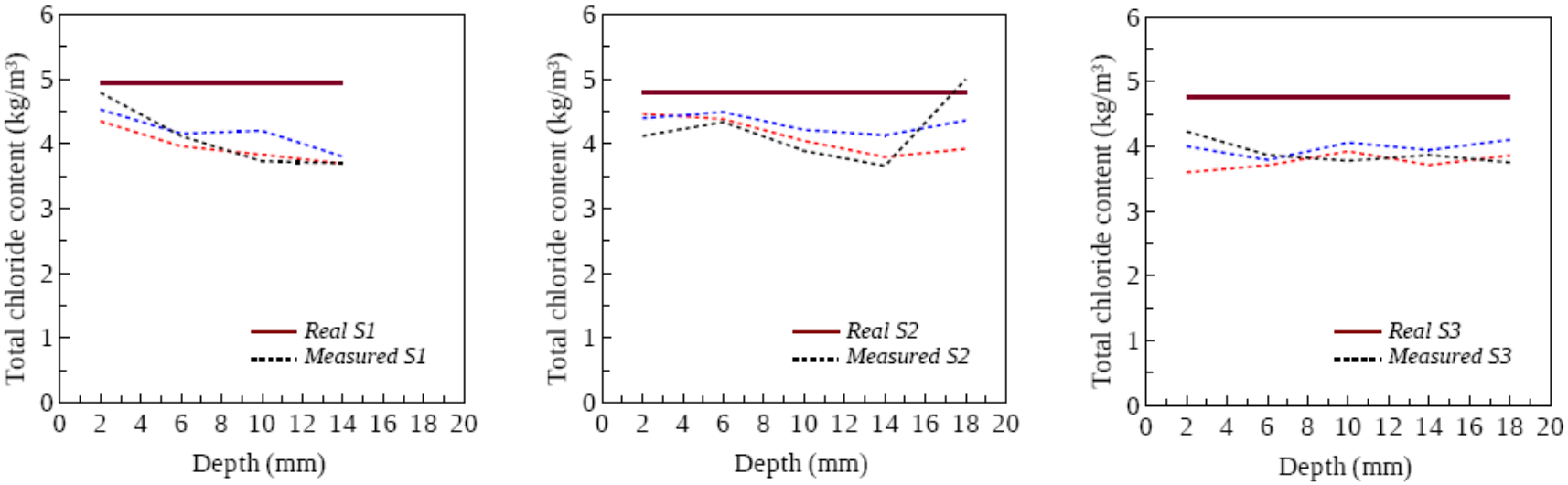
Pour une année d'inspection

$$\mathbf{P}^{in} = \begin{bmatrix} a_{ij} & a_{ij} & a_{ij} & \cdots & a_{ij} \\ a_{ij} & a_{ij} & a_{ij} & \cdots & a_{ij} \\ a_{ij} & 0 & a_{ij} & \cdots & a_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & a_{ij} \\ a_{ij} & 0 & 0 & 0 & a_{ij} \end{bmatrix}$$

Estimation de $\mathbf{P}^{in}$

- matrice de croissance $\mathbf{P}^{gr}$
- résultats d'inspection → PGA et PWA → Erreur de mesure
- probabilité de défaillance

Erreur de mesure

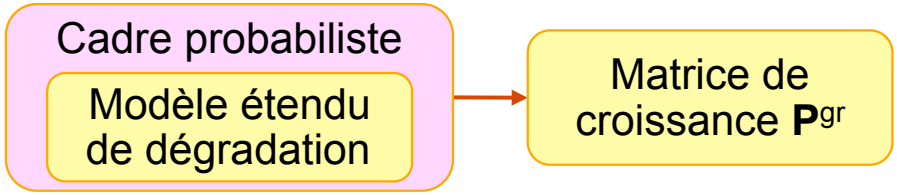


Quatre événements :

1. Inspection → pas de réparation | il n'y a pas des risques de corrosion (Bonne décision)
2. Inspection → réparation | il n'y a pas des risques de corrosion (Mauvaise décision)
3. Inspection → réparation | il y a des risques de corrosion (Bonne décision)
4. Inspection → pas de réparation | il y a des risques de corrosion (Mauvaise décision)

Théorie de la décision :

- ► PGA → probabilité d'une bonne évaluation
- ► PWA → probabilité d'une évaluation erronée



Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

Approche multi-physique [Saetta et al., 1993]:

- Pénétration des chlorures

$$\frac{\partial C_{fc}}{\partial t} = \underbrace{\mathrm{div}\left(D_c^* \overrightarrow{\nabla}\left(C_{fc}\right)\right)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\mathrm{div}\left(D_h^* C_{fc} \overrightarrow{\nabla}\left(h\right)\right)}_{\text{convection}}$$

avec

$$D_c^* = \frac{D_{c,ref} f_1(T) f_2(t) f_3(h)}{1 + (1/w_e)\left(\partial C_{bc}/\partial C_{fc}\right)}$$

- Diffusion de l'humidité

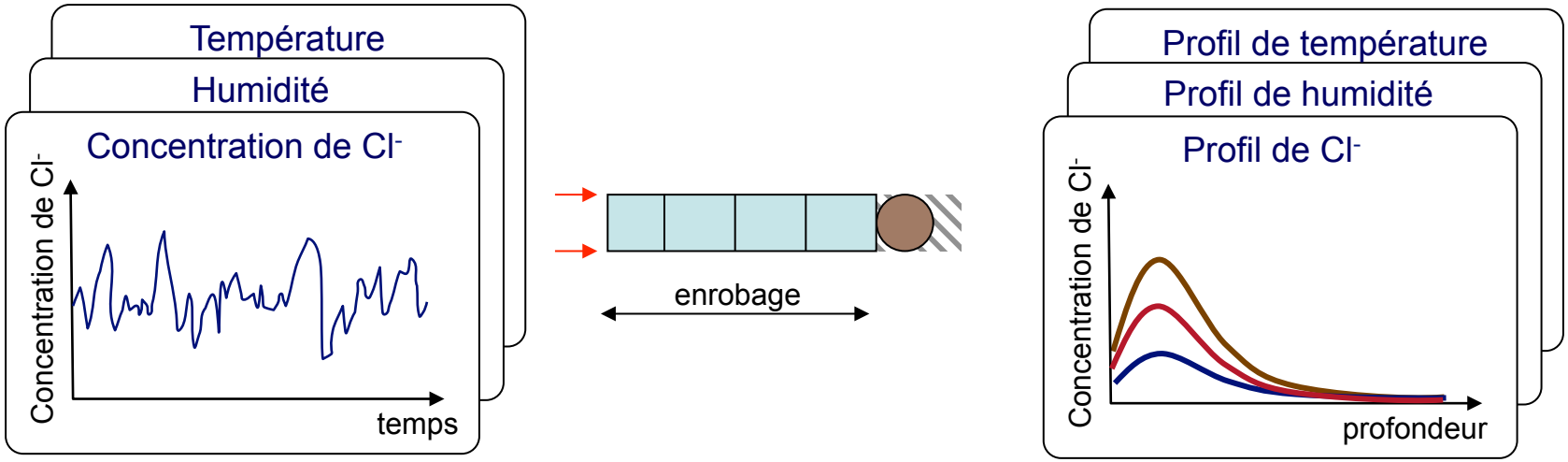
$$\frac{\partial w_e}{\partial t} = \frac{\partial w_e}{\partial h}\frac{\partial h}{\partial t} = \mathrm{div}\left(D_h \overrightarrow{\nabla}\left(h\right)\right)$$

- Transfert thermique

$$\rho_c c_q \frac{\partial T}{\partial t} = \mathrm{div}\left(\lambda \overrightarrow{\nabla}\left(T\right)\right)$$

Modélisation probabiliste de la pénétration des ions chlorure

- Approche numérique (différences et éléments finis)



Avantages

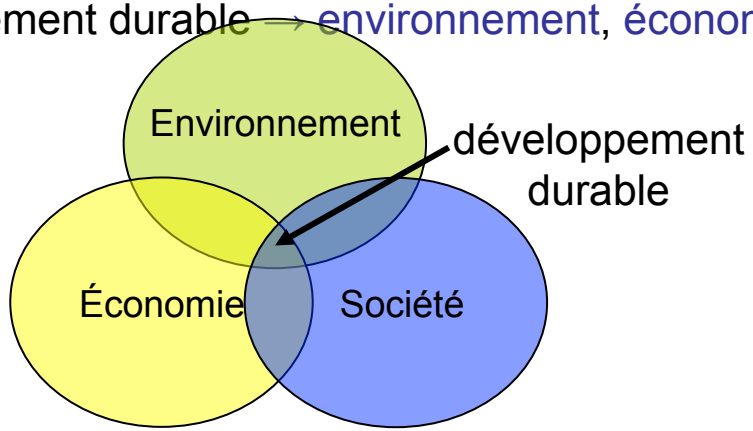
- C_s → variable
- dépendance de la température, l'humidité et le vieillissement
- fixation des chlorures
- variables d'entrée → dépendantes du temps, stochastiques
- béton → conditions de non-saturation
- flux des chlorures en deux dimensions
- conditions de borne → Robin

3. Maintenance dans le cadre du développement durable

- Développement durable [Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1987] :

« *… un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins…* »

- Composants du développement durable → environnement, économie, et société



- L'évaluation de la durabilité des stratégies de maintenance cherche un équilibre entre trois critères:
  1. coûts,
  2. génération de déchets, et
  3. émissions de CO_2

Critères pour l'évaluation de la durabilité des stratégies de maintenance

- Coûts
  - Estimation → modèle d'inspection/maintenance
  - Coûts directes → inspection, réparation et défaillance
  - Données réelles → port autonome de Nantes Saint-Nazaire

- Génération de déchets
  - béton → 67% des déchets de construction et démolition [American Institute of Architects, 1999]
  - 5% recyclés
  - Estimation → déchets produits pendant la démolition et la réparation
  - Données → chantier de réparation (projet MAREO)

- Émissions de CO_2
  - Production du ciment → 7% des émissions totales de CO_2 [Kumar Mehta, 1997]
  - Sources :
    - production et transport des produits de réparation
    - transport des équipements
    - transport des déchets
  - Données → chantier de réparation (projet MAREO) et littérature

4. Exemple numérique

Description du problème :

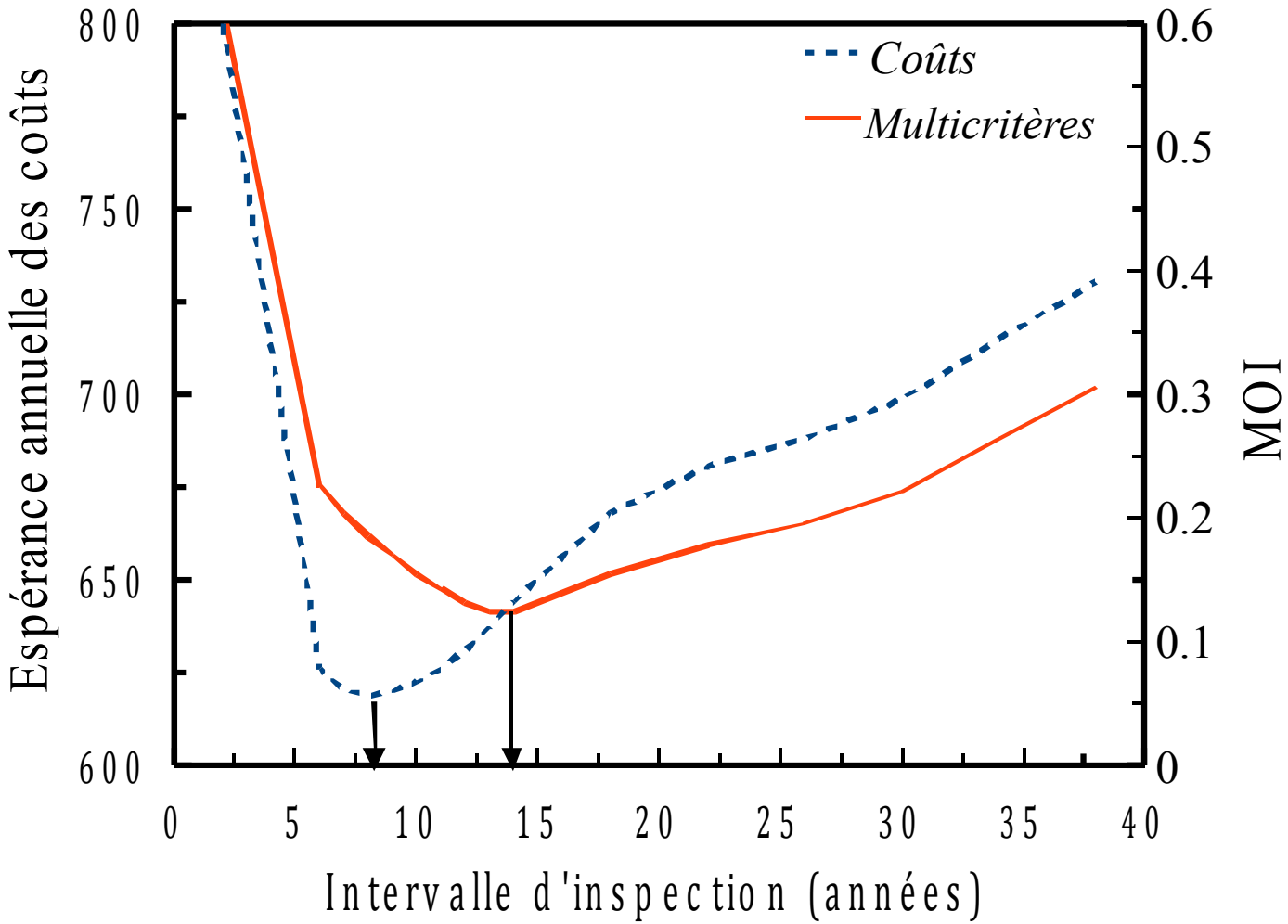
• Gestion de un ouvrage en béton armé soumis à la pénétration des chlorures

• Le propriétaire / gestionnaire a décidé d'adopter la stratégie proposée

Objectif :

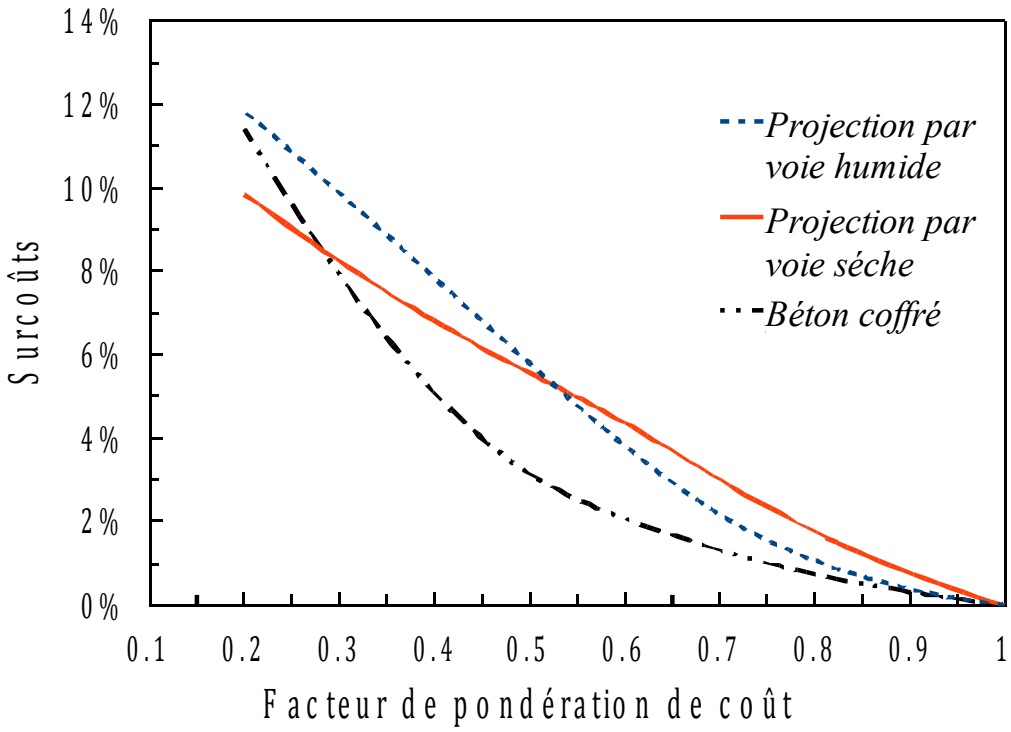
– Trouver une stratégie de maintenance durable

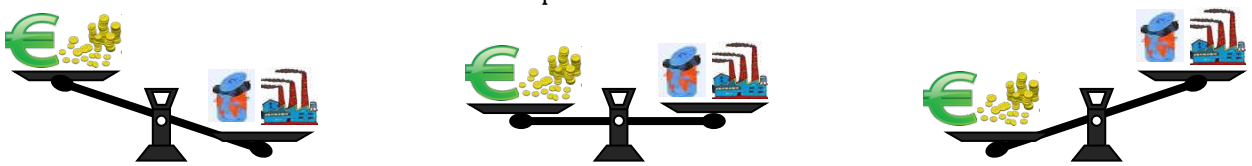
Optimisation de la durabilité d'une stratégie de maintenance



4. Exemple numérique

Optimisation de la durabilité d'une stratégie de maintenance





Pour une durée de vie de 50 ans et 1000 m^2, une stratégie durable réduira la production de déchets en 84 m^3 et les émissions en 28 ton. de CO_2.

Conclusions et perspectives

Conclusions :

- Aide à la formulation de la stratégie de maintenance
- Modélisation de la dégradation et des actions de maintenance
  - modèle étendu de dégradation
  - chaînes de Markov (inspection/maintenance/défaillance)
  - théorie de la décision (erreur de mesure)
- Détermination des critères pour l'évaluation de l'impact environnemental
- Prise de la décision sur des multiples contraintes (optimisation multicritères)

Quelques perspectives :

- mise à jour des probabilités de transition à partir des données d'inspection ;
- modélisation de l'inspection basée sur des techniques de contrôle non-destructives ;
- combinaison des stratégies de réparation préventives et correctives ;
- considération des incertitudes inhérentes à la production de déchets et aux émissions de CO_2 dans l'analyse d'impact environnemental.

Lundi 7 juin 2010 – Cité internationale des congrès – Nantes – Métropole

Les Journées Scientifiques de l'Université de Nantes

ECND-PdL : un exemple de projet collaboratif en Pays de Loire

Prise en compte de l'erreur de mesure dans l'optimisation de l'auscultation de structures vieillissantes

E. BASTIDAS-ARTEAGA*, F. SCHOEFS*, S. BONNET*, M. SALTA**

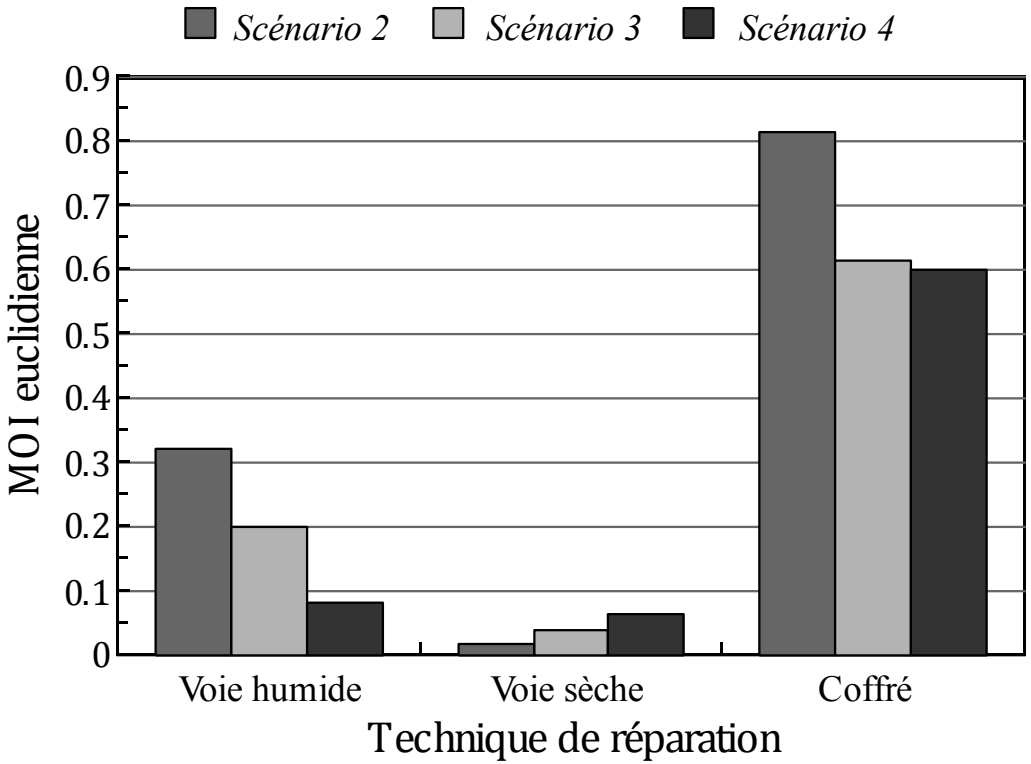
* Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, UMR CNRS 6183 Université de Nantes, Centrale Nantes

** LNEC, Portugal

Réf. :MR-GenCi 06-05

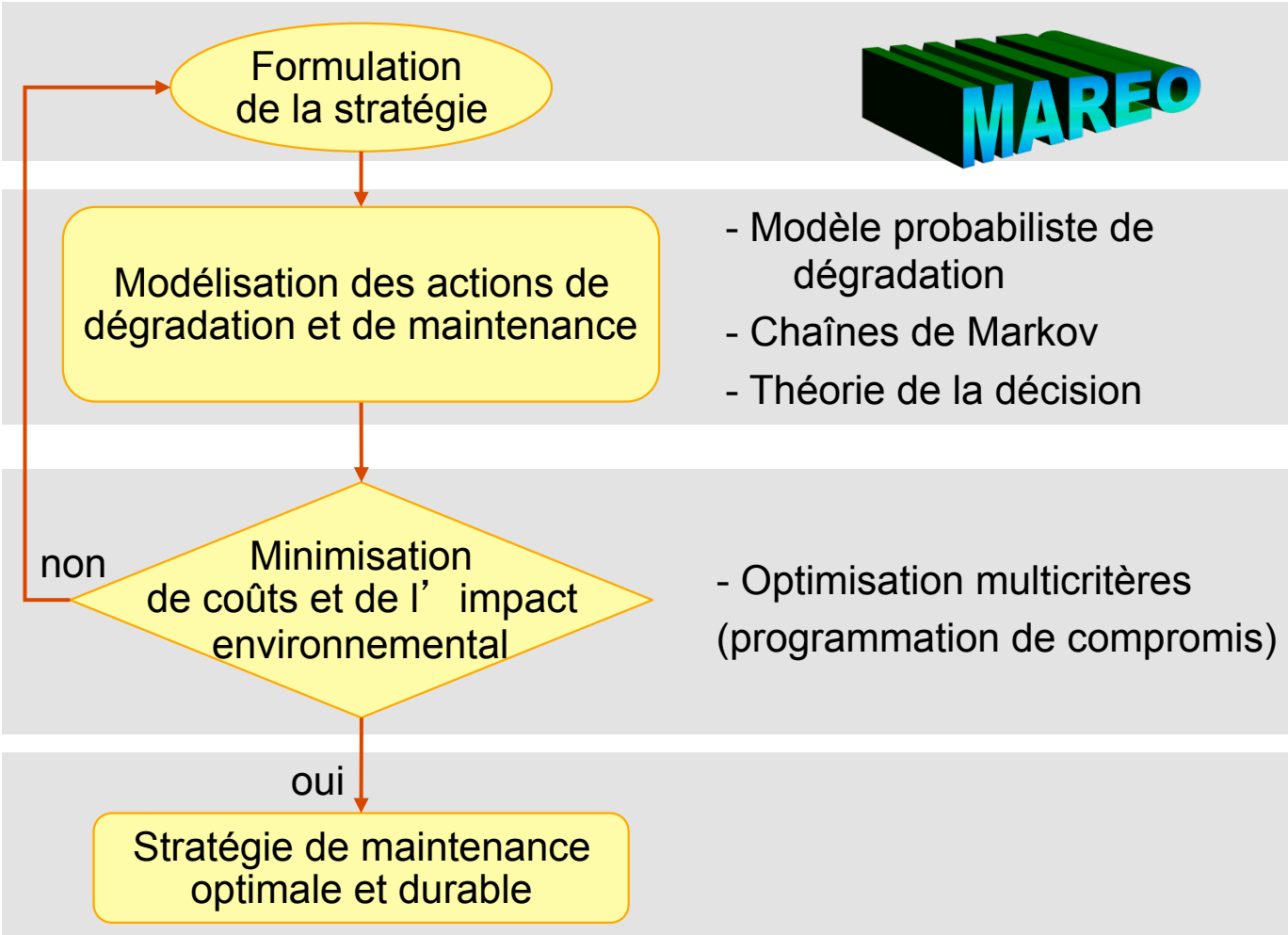
Hiérarchisation multicritères des techniques de réparation

	Coûts, w_C	Déchets, w_W	Émissions, w_E
Scénario 1	1.00	0.00	0.00
Scénario 2	0.80	0.10	0.10
Scénario 3	0.50	0.25	0.25
Scénario 4	0.20	0.40	0.40

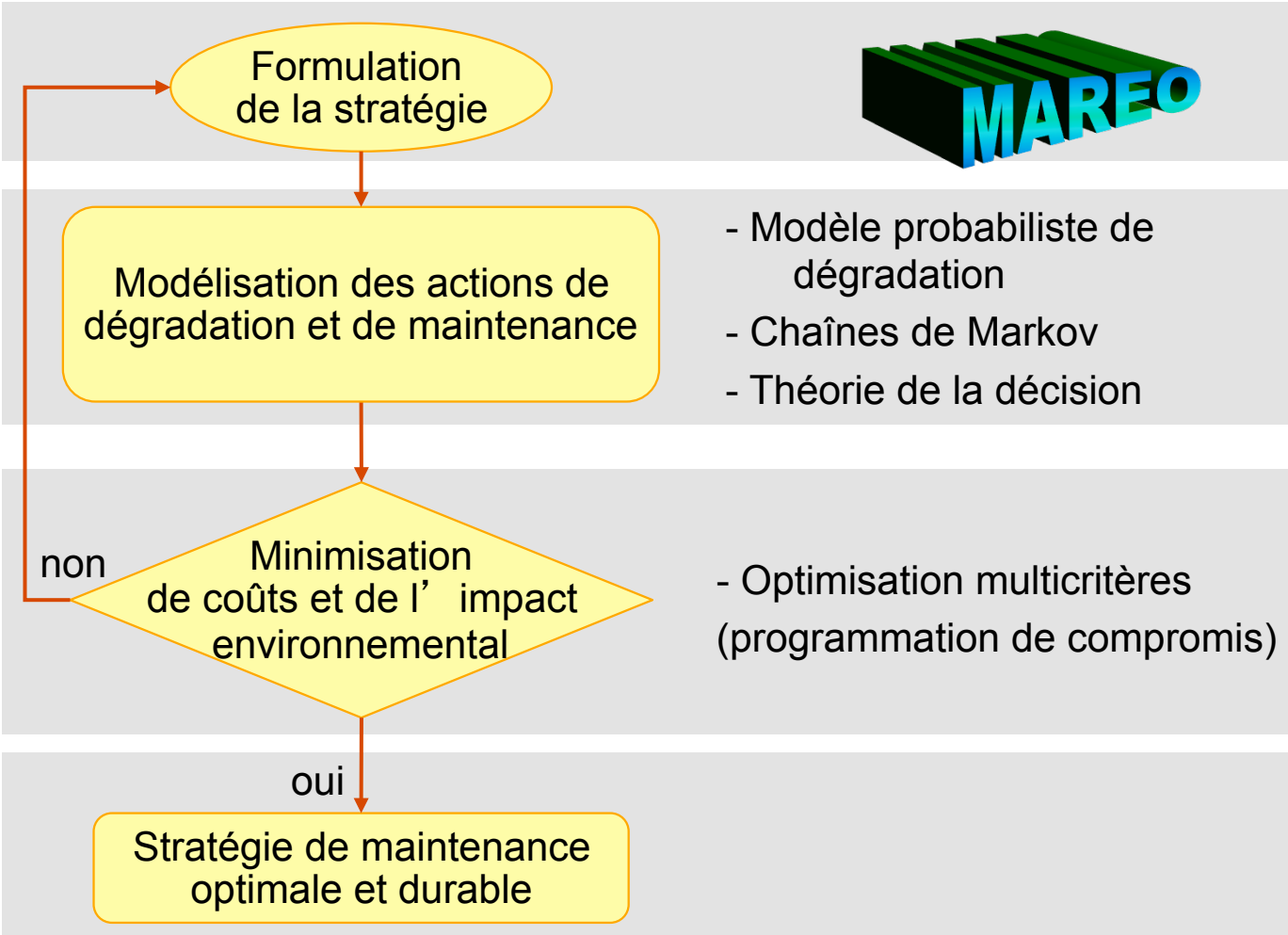


2. Modèle de dégradation, d'inspection et de maintenance

Formulation d'une stratégie de maintenance durable



Formulation d'une stratégie de maintenance durable



Modélisation de la dégradation → processus de Markov

- $\mathbf{P}^{gr}$ → simulations de Monte Carlo du modèle étendu de pénétration des chlorures
- Méthode → optimisation multi-objectif

$$\begin{cases} \min\limits_{\mathbf{a}} \max\limits_{\mathbf{F}} \mathbf{F}(\mathbf{a}) = \left(f_1(\mathbf{a}), f_2(\mathbf{a}), \ldots, f_M(\mathbf{a})\right)^T \\ \text{s.c.} \quad a_{ij} \geq 0 \quad \text{et} \quad \sum_{j=0}^{\infty} a_{ij} = 1 \end{cases}$$

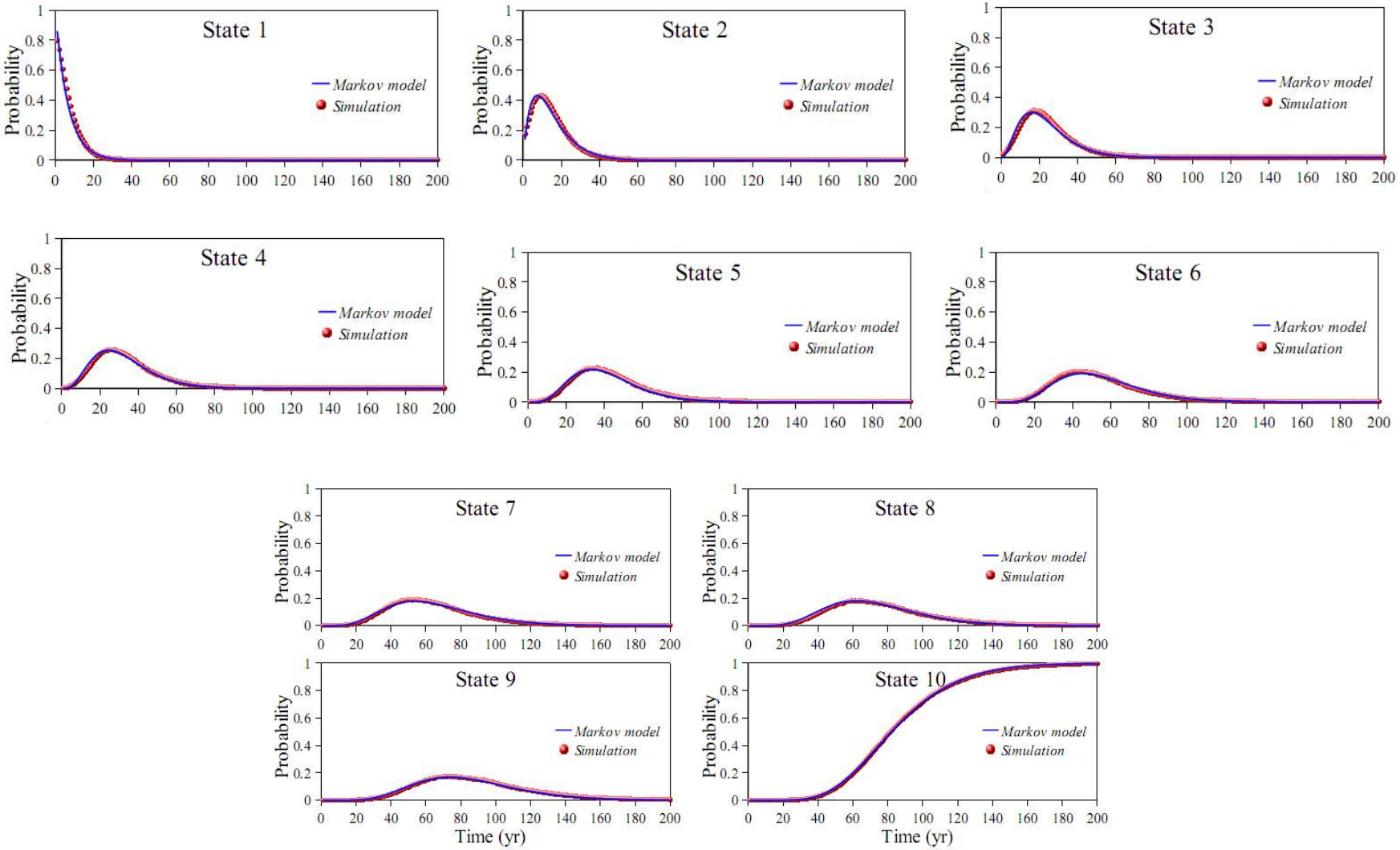
avec

$$f_j(\mathbf{a}) = \sum_{t=0}^{t_{ana}} \left| \hat{q}_j(t) - q_j(t, \mathbf{a}) \right|$$

Monte-Carlo

Markov

Probabilités estimées avec Markov et Monte Carlo



4. Exemple numérique

► 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
– 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

Management of corroding RC structures

Problems :

- There are no reliable models → to determine the behavior of corroding RC structures and to establish comprehensive management strategies.
- Current management practices → corrective repair (concrete cracking):
  - expenditures cannot be predicted and
  - structural safety can be reduced.

Questions of owners/operators:

1. How much chloride ingress will affect structural integrity?
2. How and when inspection and repair should be undertaken?
3. How to determine a sustainable management strategy?

Objective

To develop a decision-making tool to minimize costs and environmental impact, ensuring an optimal level of safety, for the management of corroding RC structures.

Thèmes de recherche

Durabilité du béton armé sous pénétration des chlorures

↳ Modélisation numérique, approches probabilistes

	Thèse Universidad de los Andes, LaMI	Thèse GeMy Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, CNRS, Université de Nantes, Centrale Nantes
Pénétration des chlorures		
Corrosion des armatures		
Fatigue des armatures		
Interactions avec l'environnement		
Maintenance		
Développement durable		
Incertitudes		