



6^{ème} Séminaire transnational
Nantes, le 7 juin 2011

Maintenance et outils d'aide à la décision dans un contexte
de développement durable

par

E. BASTIDAS-ARTEAGA et F. SCHOEFS

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



Plan de l'exposé

1. Problématique
2. Gestion durable d'ouvrages vieillissants
3. Prise de la décision sous des multiples contraintes
4. Exemple numérique
5. Conclusions et perspectives

Problématique

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

Problèmes :

- ▶ Il n'y a pas des modèles fiables → **modéliser 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.

Projet FUI-MAREO

Questions des propriétaires / gestionnaires :

1. Comment la pénétration des ions chlorures affectera-t-elle l'intégrité structurelle ?
2. Comment et quand l'inspection et la réparation doivent être entreprises ?
3. Comment déterminer une stratégie de maintenance durable ?



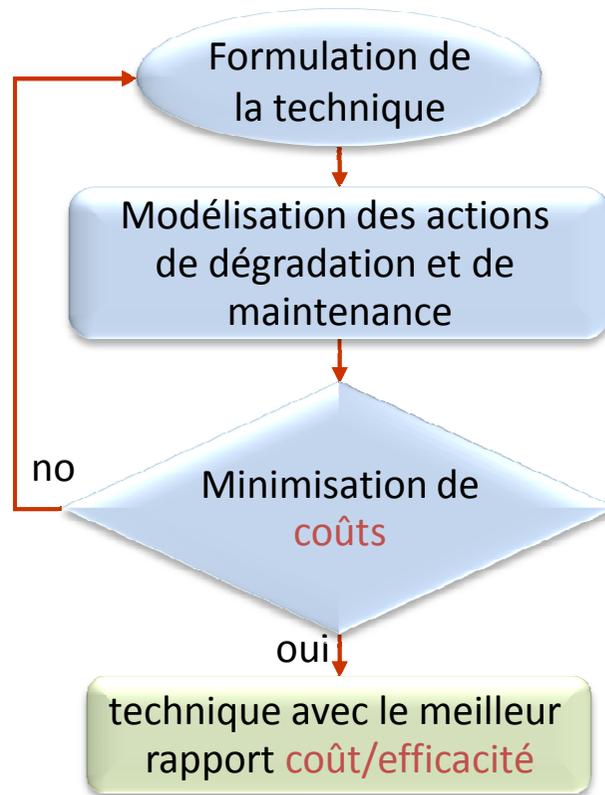
Objectif

- ▶ 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 soumis à la corrosion.

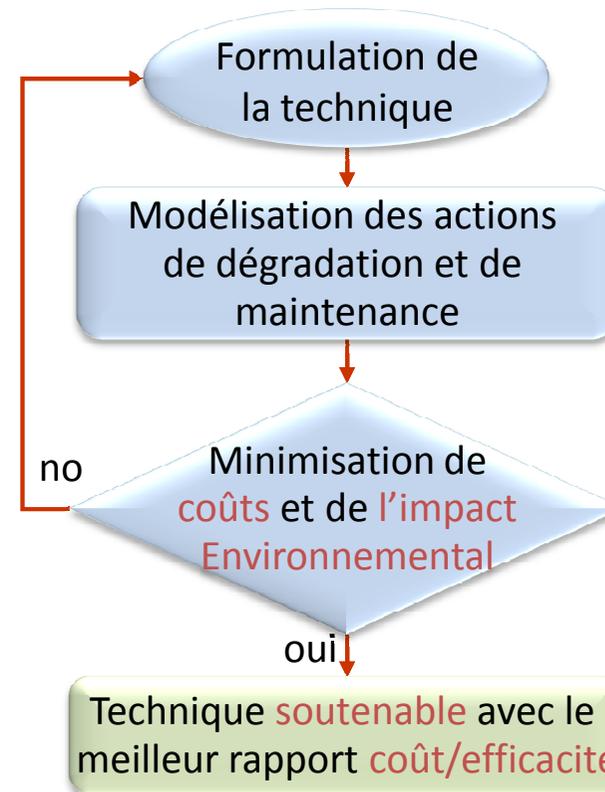
Gestion durable d'ouvrages vieillissants

Étapes dans la formulation **rentable** ou **soutenable** d'une stratégie de maintenance:

1. Formulation de la technique
2. Modélisation des actions de dégradation et de maintenance
3. Amélioration de la formulation



Solution rentable



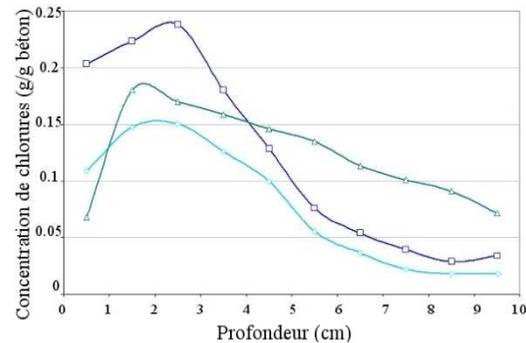
Solution soutenable

Stratégie de maintenance adoptée

- Réparation préventive → éviter l'initiation de la corrosion
- Étapes de la stratégie de maintenance

Projet FUI-MAREO

1. **Inspection** : - la structure est inspectée périodiquement tous les Δt ans
- profils de chlorures → carottes prélevées sur des structures en béton



2. **Réparation** : reconstruction de l'enrobage

- Hydrodémolition
- Plusieurs techniques de reconstruction (béton coffré, projection par voie sèche ou humide, ...)



Stratégie de maintenance adoptée

Corps d'épreuves utilisés dans le projet MAREO(Lorient).



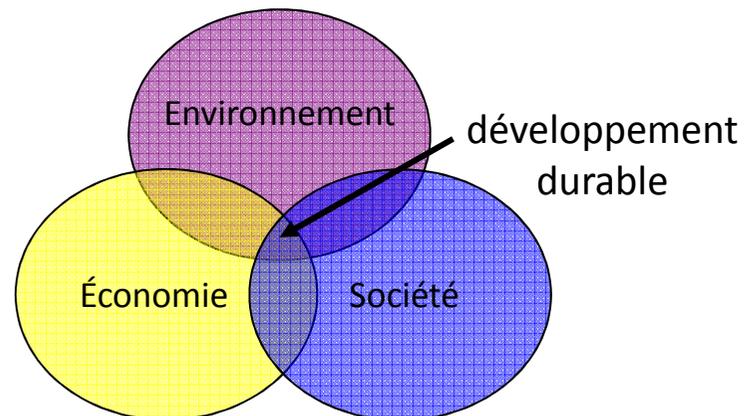
- ▶ Reconstruction :
 1. Projection par voie humide
 2. Projection par voie sèche
 3. Béton coffré

Comparaison des différentes réparations

Critère	Produit 1 / projection-humide	Produit 2 / projection-sèche	Produit 3 / béton coffré
Coût du produit	17€ / 25 kg	7€ / 25 kg	5€ / 35 kg
Personnel	5 personnes	3 personnes	2 personnes
Déchets	non significatifs <5%	important > 30%	non significatifs <5%
Finition	satisfaisante	rugueuse	très satisfaisante

Soutenabilité des stratégies de maintenance

- **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**



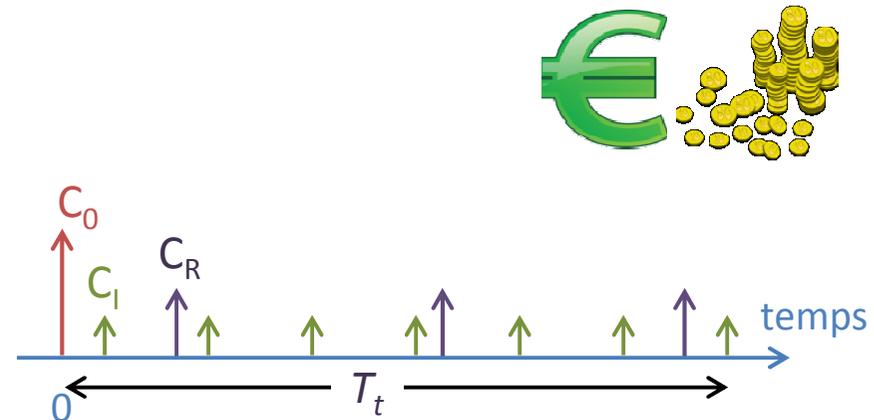
- L'évaluation de la soutenabilité des stratégies de maintenance cherche un équilibre entre trois critères :
 1. coûts,
 2. génération de déchets, et
 3. émissions de CO₂

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

Coûts

Dans l'analyse du cycle de vie, l'espérance des coûts totaux $E[C_T]$ est :

$$E[C_T] = \sum_{t=0}^{T_t} E[C_j(t)]W(t)$$



Cette étude considère deux $W(t)$ estimés par les méthodes d'actualisation classique et intergénérationnelle :

$$W_s(t) = 1/(1+r_s)^t$$

Classique

$$W_I(t) = W_s(t) + \frac{W_s(t-1)}{(1+r_I)^G} \left[\frac{1-\Delta^t}{1-\Delta} \right]$$

Intergénérationnelle

Avec : $\Delta = (1+r_s)/(1+r_I)$

Considérations pour l'estimation des coûts :

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

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

● 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 réelles → chantier de réparation (projet MAREO)



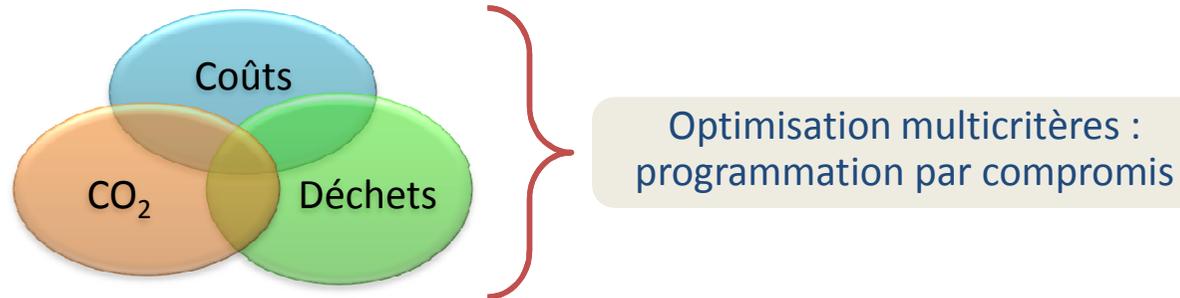
● Émissions de CO₂

- Production du ciment → 7% des émissions totales de CO₂ [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



Prise de la décision sous des multiples contraintes

- Trois critères :



- Solution idéale :

$$\mathbf{f}^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]$$

- Index multi-objectif :

$$\text{MOI}(x) = \left[\sum_{i=1}^m w_i^p \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_{i*} - x_i^*} \right|^p \right]^{1/p}$$

où w_i est un facteur de pondération pour le critère d'optimisation

p indique l'importance donnée aux déviations de la solution idéale

Exemple numérique

Objectif:

Trouver un intervalle d'inspection optimisant les coûts et l'impact sur l'environnement (soutenable)



Description de l'exemple :

- la structure est placée dans un milieu océanique non-saturé
- Température \rightarrow 5 to 25°C
- Humidité relative \rightarrow 0.6 to 0.8
- $\mu C_{env} = 6 \text{ kg/m}^3$ et $COV=0.2 \rightarrow$ zone d'éclaboussures
- 8 variables aléatoires

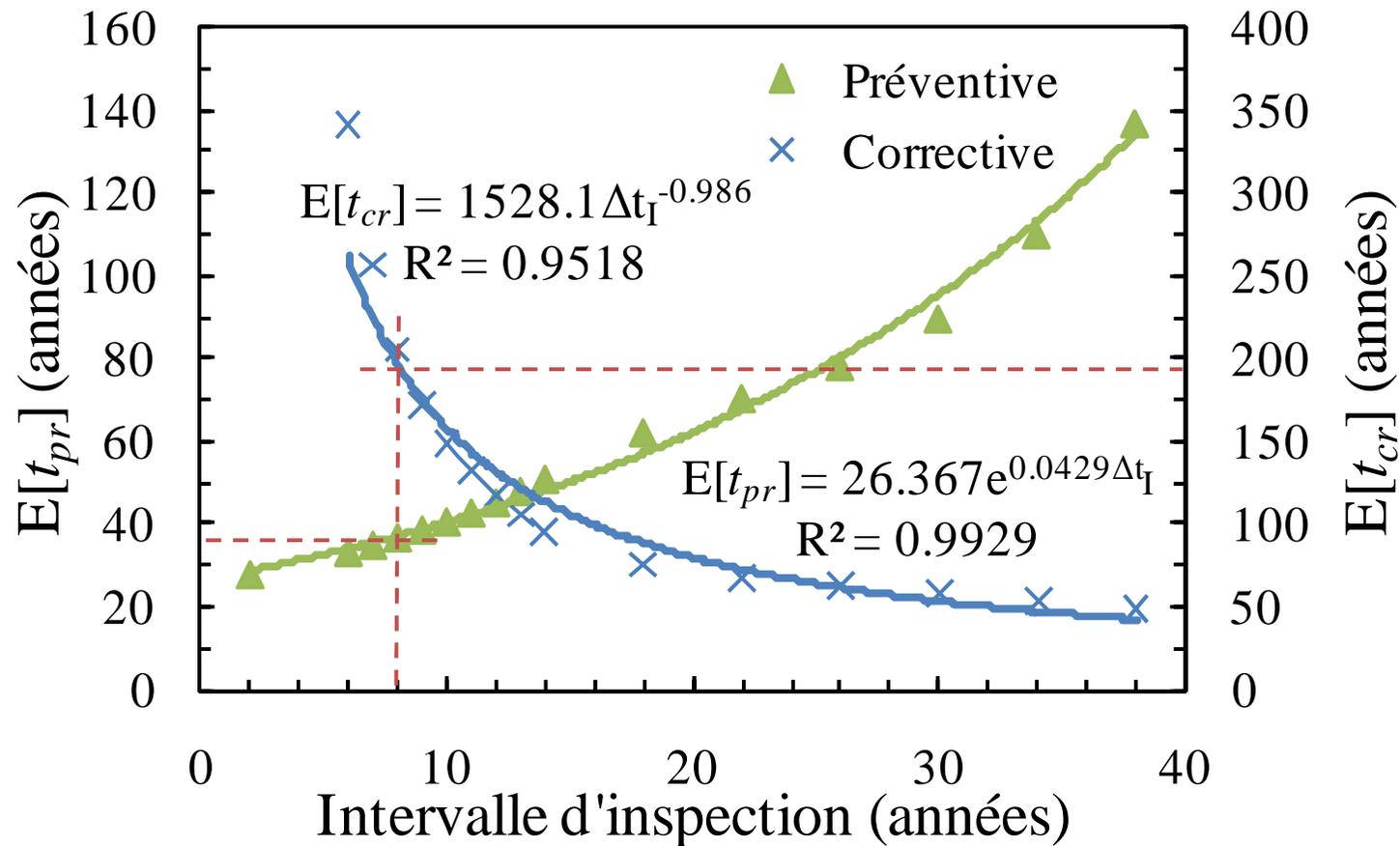
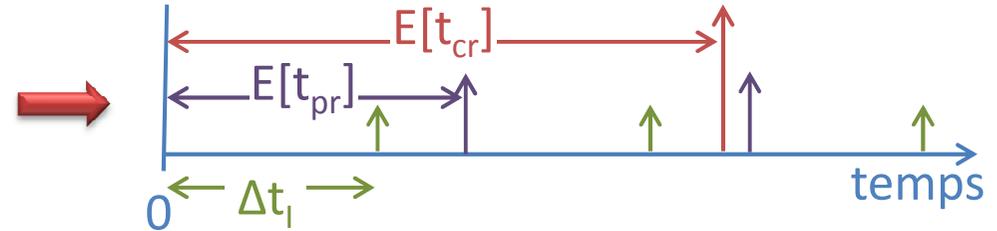
Coûts \rightarrow dépenses moyennes du Port autonome de Nantes St.-Nazaire
 \rightarrow projet MAREO

Paramètre	Valeur
Coût de construction, C_0	1000
Coût d'inspection	5
Coût de réparation préventive	150
Coût de réparation préventive	300

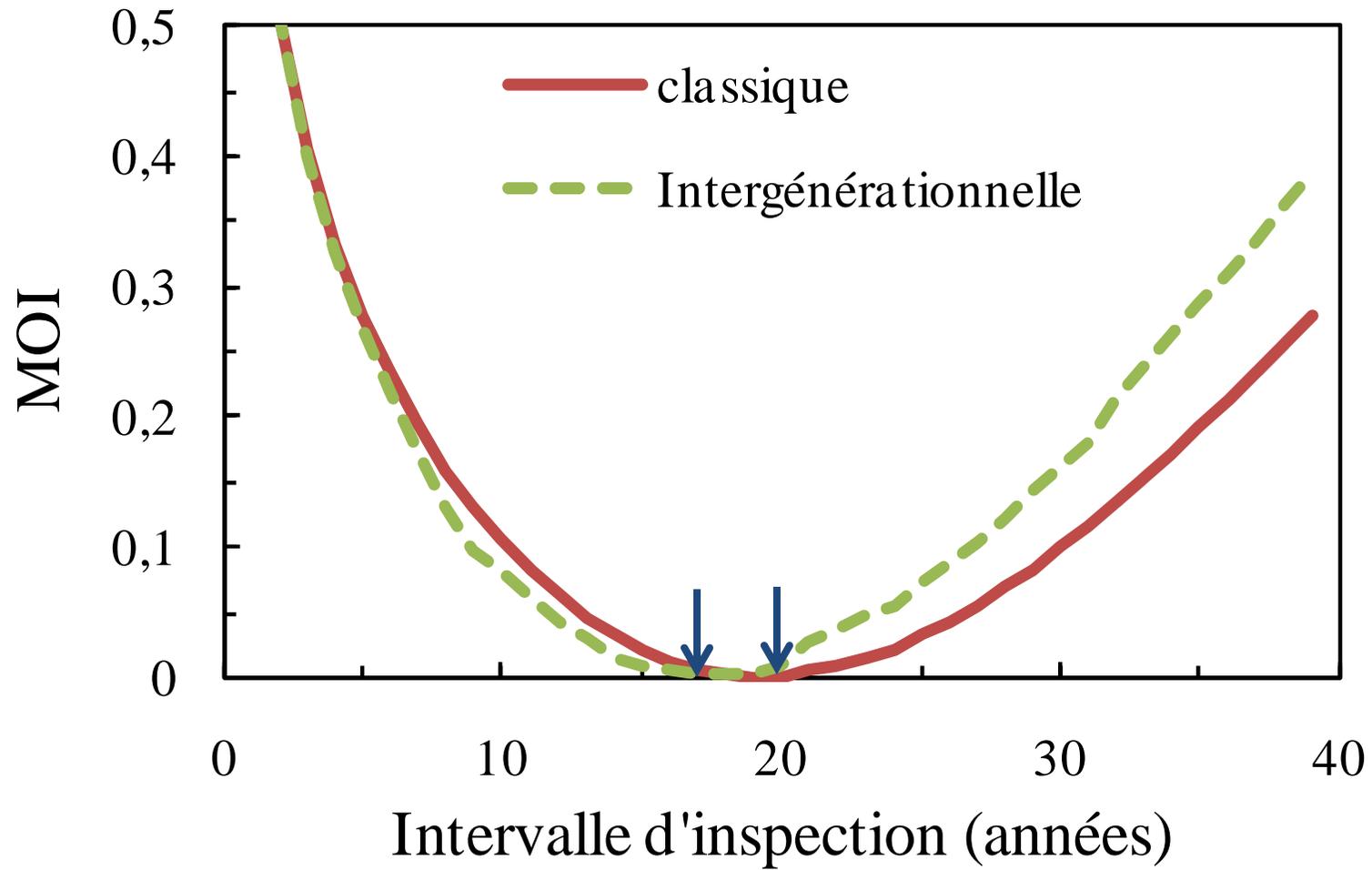
Espérance des intervalles de réparation préventive et corrective

Modélisation :

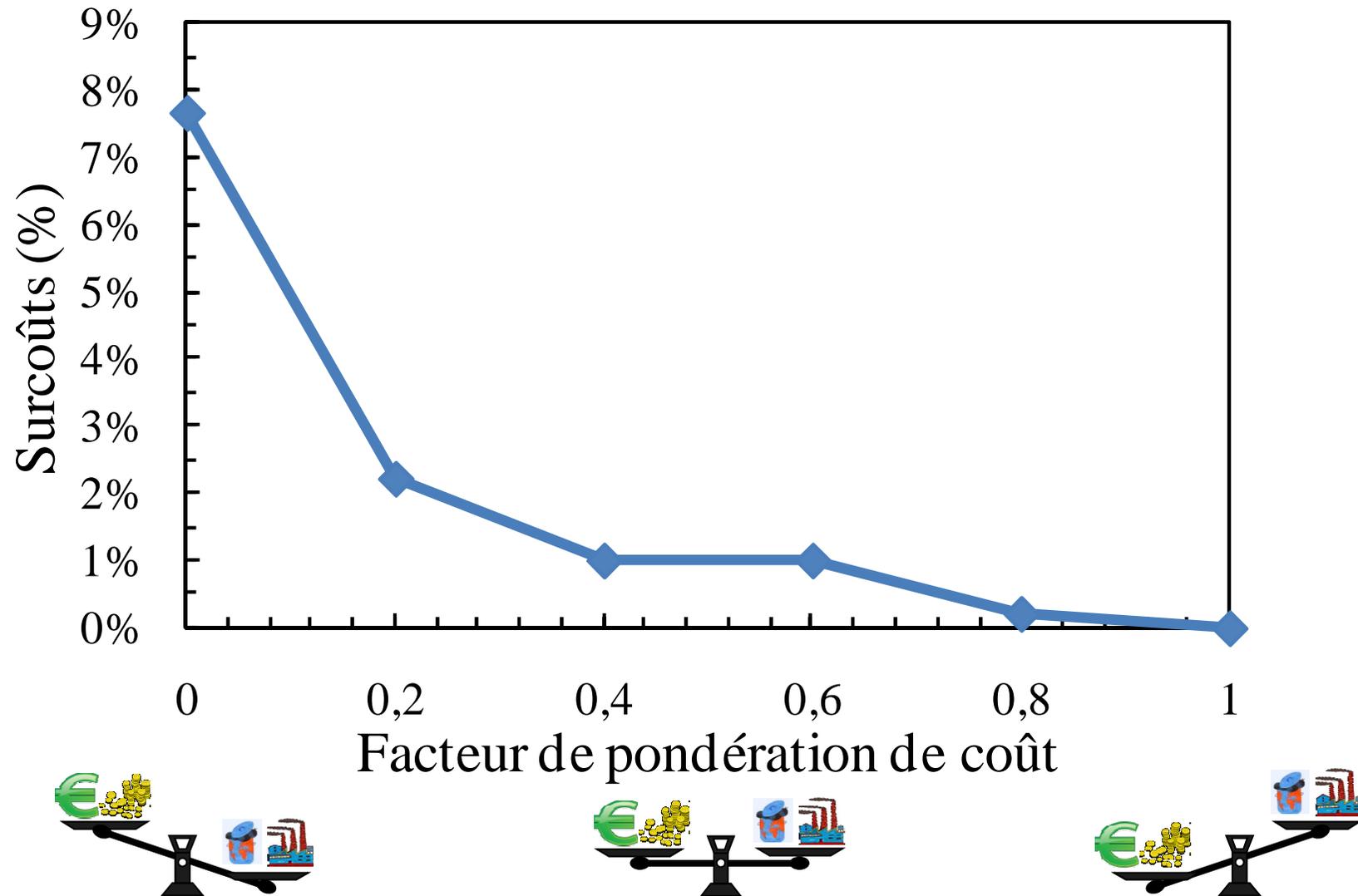
- modèle stochastique de dégradation
- chaînes de Markov

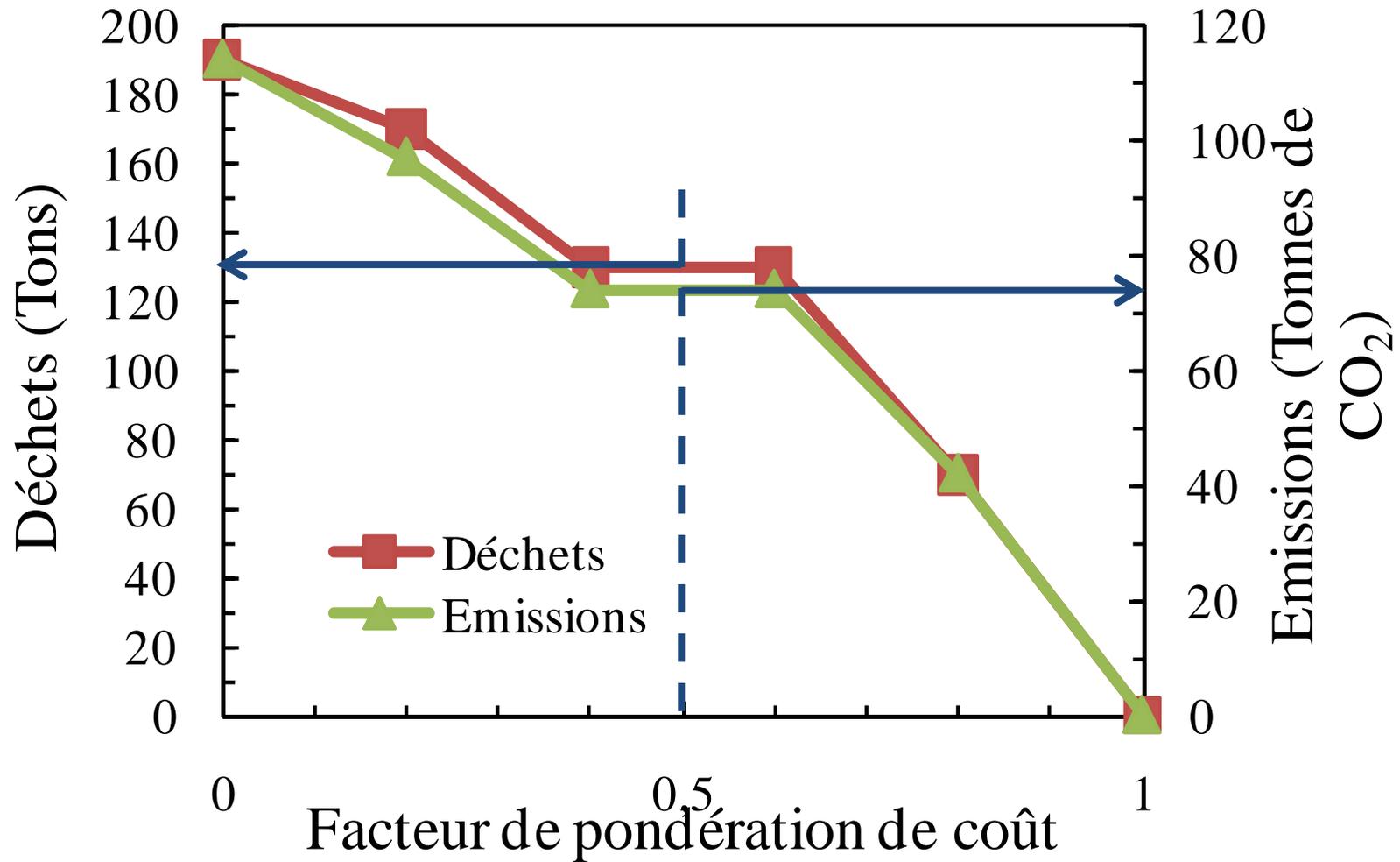


Calcul d'un intervalle d'inspection soutenable



Influence du facteur de pondération de coût sur les surcoûts



Influence du facteur de pond. de coût sur la prod. de déchets et les émissions de CO₂

Conclusions

- ▶ L'approche proposée → **trois critères** : les coûts, la production de déchets et les émissions de CO₂
- ▶ Prise de la décision sur des **multiples contraintes** (optimisation multicritères)
- ▶ Méthodologie proposée → avec un problème **d'optimisation de l'inspection d'une structure en béton armé corrodée**.
- ▶ Résultats → **qu'il existe un intervalle d'inspection soutenable** qui réduit l'impact environnemental à des surcoûts faibles.

Quelques perspectives

- ▶ **Considération des incertitudes** inhérentes à la production de déchets et aux émissions de CO₂ dans l'analyse d'impact environnemental
- ▶ **Extension** de la méthodologie à d'autres techniques et matériaux (éco-bétons)

Merci de votre attention !