

8^{èmes} Journées

Fiabilité des
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX
ECCOREV
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



Hiérarchisation des modèles d'ingénierie de carbonatation, basée sur l'analyse de sensibilité

N. Rakotovao, T. de Larrard, F. Duprat, E. Bastidas,
F. Schoefs

UNIVERSITE
PAUL
SABATIER



TOULOUSE III



UNIVERSITÉ DE NANTES



Institut de Recherche en
Génie Civil et Mécanique

- 1 Introduction

- 2 Analyse de sensibilité
 - Synthèse des modèles de carbonatation
 - Indicateurs
 - Résultats

- 3 Hiérarchisation des modèles
 - Coût et confiance des paramètres
 - Coût et confiance des modèles
 - Résultats

- 4 Conclusion

Introduction

PROJET ANR-EVADEOS

Évaluation non **D**estructive des ouvrages et **O**ptimisation de
leur **S**uivie

Introduction

PROJET ANR-EVADEOS

ÉVALuation non DEstructive des ouvrages et Optimisation de leur Suivre

Objectif

Mettre en place une stratégie de **maintenance préventive** contre la **corrosion** des aciers pour les ouvrages en **béton armé**.

Tâche 4 : Modélisation des dégradations

- Prédiction de la dépassement : carbonatation ou pénétration des chlorures dans le béton
- Évolution de la corrosion

Introduction

PROJET ANR-EVADEOS

ÉVAluation non **DE**structive des ouvrages et **O**ptimisation de leur **S**uivie

Objectif

Mettre en place une stratégie de **maintenance préventive** contre la **corrosion** des aciers pour les ouvrages en **béton armé**.

Tâche 4 : Modélisation des dégradations

- **Prédiction de la dépassivation : carbonatation ou pénétration des chlorures dans le béton**
- **Évolution de la corrosion**

Introduction

PROJET ANR-EVADEOS

ÉVALuation non DEstructive des ouvrages et Optimisation de leur Suivie

Objectif

Mettre en place une stratégie de **maintenance préventive** contre la **corrosion** des aciers pour les ouvrages en **béton armé**.

Tâche 4 : Modélisation des dégradations

- Prédiction de la dépasseivation : **carbonatation** ou pénétration des chlorures dans le béton
- Évolution de la corrosion

Introduction

Tâche 4 - Objectifs

Orienter le **maître d'ouvrage** pour le choix du modèle à utiliser selon ses **moyens**, **contraintes** et **données** disponibles.

Introduction

Tâche 4 - Objectifs

Orienter le **maître d'ouvrage** pour le choix du modèle à utiliser selon ses **moyens**, **contraintes** et **données** disponibles.

Hiérarchisation des modèles

Critères :

- 1 **Coût du modèle** \Rightarrow coût des paramètres

Introduction

Tâche 4 - Objectifs

Orienter le **maître d'ouvrage** pour le choix du modèle à utiliser selon ses **moyens**, **contraintes** et **données** disponibles.

Hiérarchisation des modèles

Critères :

- 1 **Coût du modèle** \Rightarrow coût des paramètres
 - importance relative des paramètres \Rightarrow **ANALYSE DE SENSIBILITE**

Introduction

Tâche 4 - Objectifs

Orienter le **maître d'ouvrage** pour le choix du modèle à utiliser selon ses **moyens**, **contraintes** et **données** disponibles.

Hiérarchisation des modèles

Critères :

- 1 **Coût du modèle** \Rightarrow coût des paramètres
 - importance relative des paramètres \Rightarrow **ANALYSE DE SENSIBILITE**
 - coût des paramètres \Rightarrow moyens d'obtention (**expert**, **inspection**) \Rightarrow niveau de **confiance** en la valeur du paramètre

Introduction

Tâche 4 - Objectifs

Orienter le **maître d'ouvrage** pour le choix du modèle à utiliser selon ses **moyens**, **contraintes** et **données** disponibles.

Hiérarchisation des modèles

Critères :

- 1 **Coût du modèle** \Rightarrow coût des paramètres
 - importance relative des paramètres \Rightarrow **ANALYSE DE SENSIBILITE**
 - coût des paramètres \Rightarrow moyens d'obtention (**expert**, **inspection**) \Rightarrow niveau de **confiance** en la valeur du paramètre
- 2 **Niveau de confiance en la réponse du modèle**

Analyse de sensibilité - Synthèse des modèles

Forme générale

$$x(t) = \sqrt{k_E k_C k_P D_{CO_2}} \sqrt{t}$$

- Entrée : paramètres matériaux et environnementaux.
- Sortie : profondeur de carbonatation en fonction du temps.

Analyse de sensibilité - Synthèse des modèles

Forme générale

$$x(t) = \sqrt{k_E k_C k_P D_{CO_2}} \sqrt{t}$$

- Entrée : paramètres matériaux et environnementaux.
- Sortie : profondeur de carbonatation en fonction du temps.

Catégories de modèles

- Approche par rapport à l'exposition : [Ying-Yu & Qui-Dong, 1987], [Petre-Lazar, 2001].
- Approche par rapport à la résistance à la carbonatation du matériau : [DURACRETE, 2000], [Papadakis et al., 1991], [Miragliotta, 2000].
- Approche mixte : [Hyvert, 2009].

Indicateurs (forme du modèle : $\mathbf{Y} = f(t, \mathbf{Z})$)

Élasticité

$$e_i = \frac{\Delta y(\mathbf{Z}, t)(\%)}{\Delta z_i(\%)}$$

Indicateurs (forme du modèle : $\mathbf{Y} = f(t, \mathbf{Z})$)

Élasticité

$$e_i = \frac{\Delta y(\mathbf{Z}, t)(\%)}{\Delta z_i(\%)}$$

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor}(t) = \frac{\sigma_{z_i y}}{\sigma_{z_i} \sigma_y}$$

Indicateurs (forme du modèle : $\mathbf{Y} = f(t, \mathbf{Z})$)

Élasticité

$$e_i = \frac{\Delta y(\mathbf{Z}, t)(\%)}{\Delta z_i(\%)}$$

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor}(t) = \frac{\sigma_{z_i y}}{\sigma_{z_i} \sigma_y}$$

Impact sur la moyenne de la réponse

$$b_{z_i} = E[y(t, \mathbf{Z})] - E[y(t, Z_{i0})]$$

Indicateurs (forme du modèle : $\mathbf{Y} = f(t, \mathbf{Z})$)

Élasticité

$$e_i = \frac{\Delta y(\mathbf{Z}, t)(\%)}{\Delta z_i(\%)}$$

Coefficient de corrélation linéaire de Pearson

$$\rho_{cor}(t) = \frac{\sigma_{z_i y}}{\sigma_{z_i} \sigma_y}$$

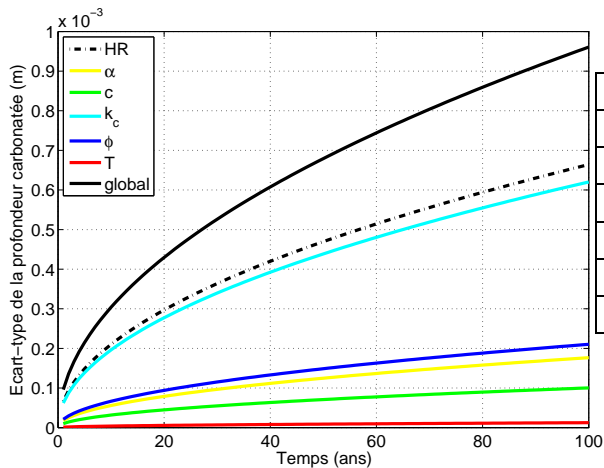
Impact sur la moyenne de la réponse

$$b_{z_i} = E[y(t, \mathbf{Z})] - E[y(t, Z_{i0})]$$

Impact sur l'écart-type de la réponse

$$\sigma_{z_i/y}(t) = \sqrt{E[(y(t, Z_i) - E[y(t, Z_i)])^2]}$$

Résultats - exemple : modèle de Hyvert



	Pearson
HR	-0,69
k_c	0,65
α	-0,21
c	-0,10
ϕ	0,17
T	-0.10

⇒ Paramètres influents : HR, k_c

Résultats - Conclusions

Physique

Les paramètres influents sont ceux dont dépendent l'état de la porosité tel que HR , k_C , ϕ .

Résultats - Conclusions

Physique

Les paramètres influents sont ceux dont dépendent l'état de la porosité tel que HR , k_C , ϕ .

Indicateurs

- Ordre d'importance des paramètres constant dans le temps
- **Coefficient de Pearson** : faible contribution car statistique et dépend de la linéarité.
- **Moyenne et élasticité** : contribution équivalente mais élasticité plus important car déterministe
- **Écart-type** : meilleure visibilité sur l'effet de la variabilité des entrées.

Facteur d'importance des paramètres

Pondération des indicateurs

Indicateur (X)	Pondération (w_X)
Élasticité	0.3
Coefficient de Pearson	0.1
Impact sur la moyenne	0.2
Impact sur l'écart-type	0.4

Facteur d'importance des paramètres

Pondération des indicateurs

Indicateur (X)	Pondération (w_X)
Élasticité	0.3
Coefficient de Pearson	0.1
Impact sur la moyenne	0.2
Impact sur l'écart-type	0.4

Note d'un paramètre

La note d'un paramètre i par rapport à un indicateur X ($X=|\text{Élasticité}|, |\text{Pearson}|, |\text{Moyenne}|, |\text{Écart-type}|$) est :

$$N_{X,i} = \frac{X_i}{\sum X_j}$$

Facteur d'importance des paramètres

Pondération des indicateurs

Indicateur (X)	Pondération (w_X)
Élasticité	0.3
Coefficient de Pearson	0.1
Impact sur la moyenne	0.2
Impact sur l'écart-type	0.4

Note d'un paramètre

La note d'un paramètre i par rapport à un indicateur X ($X=|\text{Élasticité}|, |\text{Pearson}|, |\text{Moyenne}|, |\text{Écart-type}|$) est :

$$N_{X,i} = \frac{X_i}{\sum X_j}$$

Facteur d'importance

$$F_i = \sum_X N_{X,i} w_X$$

Valeurs des coûts et confiances des paramètres

Coût = investissement intellectuel

Valeurs des coûts et confiances des paramètres

Coût = investissement intellectuel

Coût (C_i)	Expert		Inspection	
	Moyen	Conf.	Moyen	Conf.
1	Dossier d'ouvrage ou supposable facilement	4	Donnée déjà disponible par ailleurs(ex : météo)	4
2	Pas dans le dossier d'ouvrage, relations empiriques, niveau d'expertise moyen	3	CD ou CND quasi direct	4
3	Investissement bibliographique, modèles simplifiés, bon niveau d'expertise	2	CD ou CND indirect (fusion de données CND)	3
4	Modèles physiques, niveau élevé d'expertise	1	CD uniquement, essai complexe, essais multiples	2

Coût - Confiance - Gain (modèles)

Coût

$$C_{model} = \sum F_i C_i$$

Confiance

$$Conf_{model} = \sum F_i Conf_i$$

Gain apporté par l'inspection

$$G = \frac{\Delta Conf_{model}}{\Delta C_{model}}$$

Résultats - cas étudiés

Ouvrages existants - étudiés dans EVADEOS

- Ouvrage A : Documents d'ouvrage disponible
- Ouvrage B : Pas de documents d'ouvrage

Obtention des paramètres

	Coût en expert			
Hypothèse	1	2	3	4
H1	Expert	Expert	Expert	Expert
H2	Inspection	Expert	Expert	Expert
H3	Inspection	Inspection	Expert	Expert
H4	Inspection	Inspection	Inspection	Expert
H5	Inspection	Inspection	Inspection	Inspection

Résultats - modèle de Papadakis

Coût et confiance des paramètres

	Ouvrage A				Ouvrage B			
	Expert		Inspection		Expert		Inspection	
	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf
HR_{bet}	2	2	4	3	4	1	4	3
ϕ	2	2	3	3	4	1	3	3
c	1	4	4	4	4	1	4	4
α	2	2	4	4	4	1	4	4

Résultats - modèle de Papadakis

Coût et confiance des paramètres

	Ouvrage A				Ouvrage B			
	Expert		Inspection		Expert		Inspection	
	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf
HR_{bet}	2	2	4	3	4	1	4	3
ϕ	2	2	3	3	4	1	3	3
c	1	4	4	4	4	1	4	4
α	2	2	4	4	4	1	4	4

Résultats - modèle de Papadakis

Coût et confiance des paramètres

	Ouvrage A				Ouvrage B			
	Expert		Inspection		Expert		Inspection	
	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf
HR_{bet}	2	2	4	3	4	1	4	3
ϕ	2	2	3	3	4	1	3	3
c	1	4	4	4	4	1	4	4
α	2	2	4	4	4	1	4	4

Résultats - modèle de Papadakis

Coût et confiance des paramètres

	Ouvrage A				Ouvrage B			
	Expert		Inspection		Expert		Inspection	
	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf
HR_{bet}	2	2	4	3	4	1	4	3
ϕ	2	2	3	3	4	1	3	3
c	1	4	4	4	4	1	4	4
α	2	2	4	4	4	1	4	4

Résultats - modèle de Papadakis

Coût et confiance des paramètres

	Ouvrage A				Ouvrage B			
	Expert		Inspection		Expert		Inspection	
	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf
HR_{bet}	2	2	4	3	4	1	4	3
ϕ	2	2	3	3	4	1	3	3
c	1	4	4	4	4	1	4	4
α	2	2	4	4	4	1	4	4

Résultats - modèle de Papadakis

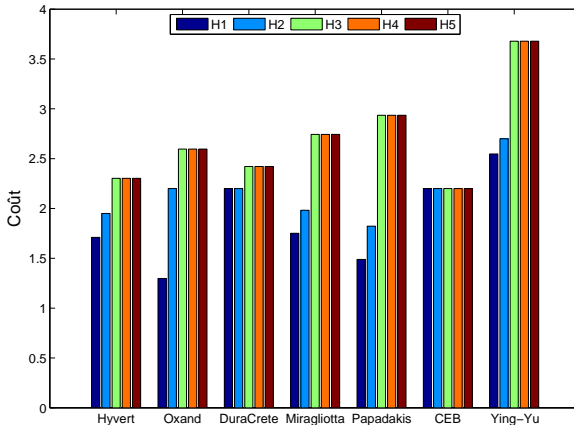
Coût et confiance des paramètres

	Ouvrage A				Ouvrage B			
	Expert		Inspection		Expert		Inspection	
	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf	Coût	Conf
HR_{bet}	2	2	4	3	4	1	4	3
ϕ	2	2	3	3	4	1	3	3
c	1	4	4	4	4	1	4	4
α	2	2	4	4	4	1	4	4

Gain pour le modèle de Papadakis

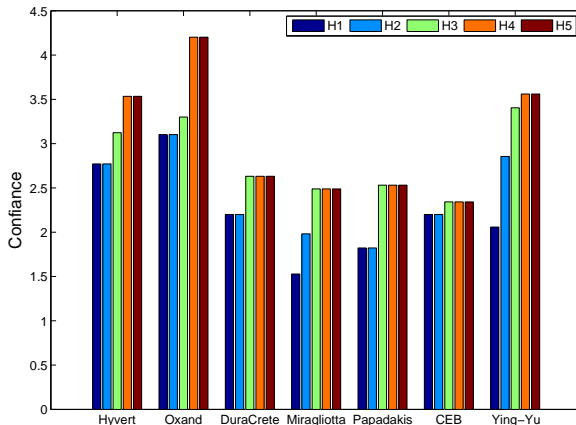
	Ouvrage A	Ouvrage B
Gain H1 à H5	0.57	5,79

Résultats - Coût modèles - Ouvrage A



Coût des modèles selon les hypothèses d'obtention des paramètres

Résultats - Confiance modèles - Ouvrage A



Niveau de confiance des modèles selon les hypothèses d'obtention des paramètres

Résultats - Gain : passage de H1 à H5

$$G = \frac{\Delta \text{Conf}_{\text{model}}}{\Delta C_{\text{model}}}$$

Ouvrage	A		B	
	Gain	Classement	Gain	Classement
Hyvert	0,84	4	7,23	1
Oxand	0,52	6	1,0	5
DuraCrete	1,80	1	0	6
Miragliotta	1,07	3	3,44	4
Papadakis	0,57	5	5,8	2
CEB	0,06	7	0	6
Ying-Yu	1,37	2	3,13	3

Résultats - Gain : passage de H1 à H5

$$G = \frac{\Delta \text{Conf}_{\text{model}}}{\Delta C_{\text{model}}}$$

Ouvrage	A		B	
	Gain	Classement	Gain	Classement
Hyvert	0,84	4	7,23	1
Oxand	0,52	6	1,0	5
DuraCrete	1,80	1	0	6
Miragliotta	1,07	3	3,44	4
Papadakis	0,57	5	5,8	2
CEB	0,06	7	0	6
Ying-Yu	1,37	2	3,13	3

Résultats - Gain : passage de H1 à H5

$$G = \frac{\Delta \text{Conf}_{\text{model}}}{\Delta C_{\text{model}}}$$

Ouvrage	A		B	
	Gain	Classement	Gain	Classement
Hyvert	0,84	4	7,23	1
Oxand	0,52	6	1,0	5
DuraCrete	1,80	1	0	6
Miragliotta	1,07	3	3,44	4
Papadakis	0,57	5	5,8	2
CEB	0,06	7	0	6
Ying-Yu	1,37	2	3,13	3

Conclusion

Analyse de sensibilité

- Hiérarchie des paramètres indépendante du temps
- Prédominance des paramètres liés à l'état de la porosité
- Meilleure information avec l'écart-type de la réponse

Hiérarchisation des modèles

- Hiérarchie différente pour chaque ouvrage
- Hiérarchie sensible à la richesse des données disponibles

Perspectives

- Études d'autres cas d'ouvrages
- Application de la procédure aux modèles IG de pénétration des chlorures

Merci pour votre aimable attention !



DURACRETE (2000).

Duracrete - final technical report - general guidelines for durability design and redesign.

Technical Report BE95-1347/R9, The European Union - Brite Euram III.



Hyvert, N. (2009).

Application de l'approche probabiliste de la durabilite des produits prefabriques en beton.

These de genie civil, Universite de Toulouse III-Paul Sabatier.



Miragliotta, R. (2000).

Modelisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des betons prefabriques - Prise en comptes des effets de paroi.

PhD thesis, Universite de la Rochelle.



Papadakis, V., Vayenas, C., and Fardis, M. (1991).

Fundamental modelling and experimental investigation of concrete carbonation.

ACI Materials Journal, 4(88) :363–373.



Petre-Lazar, I. (2001).

Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton arme soumis a la corrosion des aciers.

These de genie civil, Universite Laval, Quebec.