



**HAL**  
open science

## Sensibilité des modèles simplifiés de chloration du béton vis-à-vis leur capacité à propager des incertitudes

Ndrianary Rakotovao Ravahatra, Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs, Thomas de Larrard, Frédéric Duprat

### ► To cite this version:

Ndrianary Rakotovao Ravahatra, Emilio Bastidas-Arteaga, Franck Schoefs, Thomas de Larrard, Frédéric Duprat. Sensibilité des modèles simplifiés de chloration du béton vis-à-vis leur capacité à propager des incertitudes. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03440405

**HAL Id: hal-03440405**

**<https://hal.science/hal-03440405>**

Submitted on 22 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Sensibilité des modèles simplifiés de chloration du béton vis-à-vis de leur capacité à propager des incertitudes

N. Rakotovao Ravahatra<sup>a,b</sup>, E. Bastidas-Arteaga<sup>a</sup>, F. Schoefs<sup>a</sup>, T. De Larrard<sup>b</sup>, F. Duprat<sup>b</sup>

a. LUNAM Université, Université de Nantes-Ecole Centrale Nantes, GeM, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique/Institut Universitaire Mer et Littoral, CNRS UMR 6183/FR 3473, Nantes, France

b. Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC, Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions/ Toulouse, France

## Résumé :

*Le projet ANR-EVADEOS propose de mettre en place une stratégie optimisée de suivi et de maintenance préventive des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des armatures. Ce projet s'appuie sur la modélisation probabiliste et l'actualisation à partir de mesures CND. Cette étude se concentre sur la corrosion générée par la pénétration des chlorures. Les modèles simplifiés dits d'ingénierie ont été retenus afin de gagner en temps de calcul pour une approche probabiliste. Ce travail étudie la sensibilité de ces modèles vis-à-vis leur capacité à propager des incertitudes. Les indicateurs de sensibilité utilisés sont l'élasticité, le coefficient de corrélation de Pearson et l'influence de la variabilité en entrée sur l'écart-type de la réponse. La majorité des modèles recensés montrent plus de sensibilités par rapport aux paramètres matériau.*

## Abstract :

*The ANR-EVADEOS project aims to develop an optimized strategy for computational monitoring and preventive maintenance of reinforced concrete structures subject to reinforcement corrosion. This project is based on probabilistic modeling and updating measures from NDT. This study focuses on corrosion produced by chloride ingress. Simplified models were selected in order to gain time for probabilistic modeling. This work studies the sensitivity of these models with respect to their ability to propagate uncertainties. The sensitivity indicators used are elasticity, the correlation coefficient of Pearson, and the influence of input variations on the standard deviation of the response. Most part of models show more sensitivity with respect to material parameters.*

**Mots clefs :** Sensibilité ; béton armé ; chlorures

## 1 Introduction

Le projet ANR-EvaDeOS (Évaluation non Destructive des ouvrages et Optimisation de leur Suivi) a comme objectif de proposer une politique de suivi et de maintenance préventive des ouvrages en béton armé vis-à-vis de la corrosion des armatures. Cette étude est centrée sur la corrosion due à la chloration. On distingue pour ce phénomène les modèles simplifiés dits d'ingénierie qui sont exprimés avec des équations explicites et les modèles complexes qui nécessitent des outils numériques pour la résolution. Les modèles simplifiés ont été retenus, parce qu'ils sont facilement exploitables par l'ensemble des acteurs du génie civil. Pour une meilleure performance des stratégies de maintenance ou de dimensionnement, il faut une bonne estimation des incertitudes. Cette étude s'inscrit dans ce contexte et a pour but principal d'étudier la sensibilité des modèles vis à vis de leur capacité à propager des incertitudes. Ainsi, dans cette étude, après une synthèse des modèles d'ingénierie de chloration, une étude de sensibilité des paramètres est développée pour chaque modèle recensé. Les indicateurs de

sensibilité utilisés sont l'élasticité des paramètres, le coefficient de corrélation de Pearson et l'influence de la variabilité en entrée sur l'écart-type de la réponse. Le comportement en fonction de l'espace est étudié à deux profondeurs, tandis que la variabilité temporelle est visualisée intégralement.

## 2 Modèles simplifiés de chloration et paramètres d'entrée

Le mécanisme de pénétration est la diffusion sous gradient de concentration. Par ailleurs, les influences de l'interaction entre les chlorures et les autres espèces dans la solution interstitielle sont négligées ou prises en compte de façon empirique. Les modèles simplifiés de pénétration des chlorures résultent de la solution analytique de la seconde loi de Fick et sont exprimés avec la fonction d'erreur complémentaire :

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc}(k(D_a, t, x, X)) + C_{ini} \quad (1)$$

où  $C(x, t)$  est la concentration en chlorure à la distance  $x$ (m) de la surface et à l'âge  $t$  du béton (% Masse de béton),  $C_s$  est la concentration en chlorure à la surface du béton (% Masse de béton),  $k(D_a, t, x, X)$  est un paramètre qui varie d'un modèle à l'autre et dépend du coefficient de diffusion des chlorures  $D_a$  ( $m^2/s$ ), du temps, de  $x$  et du vecteur  $X$  des autres paramètres d'entrée du modèle.  $C_{ini}$  est la concentration initiale en chlorure dans le béton. Le tableau 2 présente une synthèse des paramètres de ces modèles. Deux familles de modèles peuvent y être distinguées : (1) les modèles avec tous les paramètres non fonction du temps et (2) les modèles avec des paramètres dépendants du temps. L'étude sera étendue dans un cadre probabiliste, ainsi l'équation 1 prend la forme :

$$\mathbf{Y} = f(x, t, \mathbf{Z}) \quad (2)$$

où  $\mathbf{Y}$  est le vecteur des  $y_j$  variables aléatoires de réponse.  $\mathbf{Y}$  est fonction du vecteur aléatoire  $\mathbf{Z} = \{z_1 \dots z_n\}$  dans lequel chaque composante  $z_i$  est une variable aléatoire représentant les paramètres d'entrée du modèle.  $\mathbf{Y}$  est une fonction explicite de  $x$  et de  $t$ . D'après (1), le modèle devient une fonction aléatoire indexée par le temps et la distance. Les études ont été effectuées pour un béton C45 avec  $80 \text{ kg/m}^3$  de cendres volantes. Le tableau 1 présente les variabilités retenues pour la génération des variables aléatoires. L'ouvrage est supposé se situer en zone d'immersion.

## 3 Estimateurs de sensibilité

### 3.1 Élasticité

L'élasticité est une évaluation de la variation d'une réponse ici  $\mathbf{Y}$  suite à la perturbation d'un paramètre d'entrée  $z_i$  avec les autres paramètres fixés à leur valeur moyenne([1]). Il se calcule par la relation :

$$e_i = \frac{\Delta f(x_k, \mathbf{Z}, t)(\%)}{\Delta z_i(\%)} \quad (3)$$

où  $\Delta z_i$  est la variation du paramètre d'entrée  $z_i$  autour de sa valeur moyenne  $\Delta z_i = z_{sup} - z_{i0} z_{i0}$  et  $\Delta f(x_k, \mathbf{Z}, t)$  la variation de la réponse.  $\Delta f(x_k, \mathbf{Z}, t) = y_k = y_k(z_{sup} - y_k(z_{i0}))/y_k(z_{i0})$  où  $z_{i0}$  désigne l'espérance mathématique de  $z_i$ . Une valeur infinie signifie que le modèle est très sensible par rapport à la variation du paramètre étudié, tandis qu'une valeur proche de 0 dénote une faible sensibilité. Et une valeur négative signifie qu'une augmentation du paramètre d'entrée entraîne une diminution de la réponse.

Une valeur égale à 1 signifie qu'une variation de  $z_i$  provoque la même variation sur  $y_j$  ce qui est le cas d'un modèle linéaire. La figure 1 montre un exemple de résultats avec le modèle JSCE. Les influences

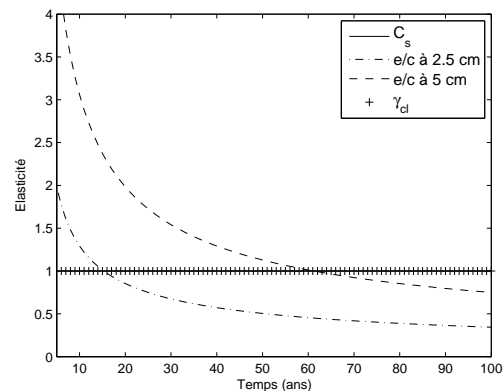


FIGURE 1 – Évolution de l'élasticité en fonction du temps pour le modèle JSCE

Paramètres	Unité	Moyenne	Min	Max	Référence
Coefficient de migration des chlorures $D_{rcm}$	$10^{-12}m^2/s$	4,14	3,57	4,70	Statistique sur 30 échantillons
Coefficient de diffusion des chlorures	$10^{-12}m^2/s$	3,79	3,26	4,32	Calculé à partir de $D_{rcm}$
Rapport $e/c$		0,51	0,49623	0,52377	30[7]
Concentration de chlorure à la surface du béton $C_s$ (Immersion)	(% masse de ciment)	6,242	5,294	7,191	Chlorebase[9]
Facteur environnement $k_e$		1,325	1,09975	1,55025	Chlorebase[9]
Facteur cure $k_c$		0,656	0,48544	0,82656	Chlorebase[9]
Facteur test $k_t$		0,832	0,807872	0,856128	Chlorebase[9]
Exposant âge $n$		0,69	0,641	0,738	Chlorebase[9]
Température $T$	K	284,04	282,55	285,53	Chronique de température
Coefficient de sécurité $\gamma_{cl}$		1,1	1,001	1,199	JSCE [5]
Teneur en gel $W_{gel}$	$kg/m^3$	297,48	267,732	327,228	Exploitation des données de [4]
Teneur en eau volumique $w$	$kg/m^3$	118	112,1	123,9	Statistique sur 30 échantillons
Prise en compte hydratation $\delta$		0,15	0,147	0,153	[3]
Prise en compte échange avec milieu extérieur $\lambda$		0,64	0,6272	0,6528	[3]

Tableau 1 – Variabilités affectées aux paramètres d'entrée

de  $C_s$  et  $\gamma_{cl}$  sont confondues puisque le modèle est linéaire par rapport à ces deux paramètres. Le paramètre matériau  $e/c$  est relativement plus influent à courte échéance car la diffusion commence à s'installer. A 5 cm de profondeur l'influence de  $e/c$  reste importante pendant une durée plus longue qu'à 2.5 cm car la diffusion prend plus de temps à arriver en profondeur.

## 3.2 Simulations de Monte Carlo

Les distributions choisies pour les simulations sont du type uniforme. Il est en effet délicat de choisir d'autres lois de distribution en n'ayant pas d'informations sur les paramètres statistiques à y affecter. Ceci conduit à une surestimation de la variabilité de chaque paramètre et à une erreur d'estimation de la réponse. Toutefois, les covariances étant réalistes par rapport à la littérature, les grandes tendances et les influences relatives sont conservées si suffisamment nettes.

### 3.2.1 Sensibilité sur l'écart-type de sortie

On considère le paramètre étudié comme variable aléatoire, tandis que les autres paramètres sont fixés à leur valeurs moyennes. Le vecteur des variables aléatoires se réduit donc à  $Z_i$ . On obtient alors la réponse  $y_k(t, x_k, z_i)$ . L'influence du paramètre d'entrée  $z_i$  sur la sortie  $y_j$  sera donc évaluée par :

$$\sigma_{z_i/y_j}(t, x_k) = \sqrt{E[(y_j(t, x_k, Z_i) - E[y_j(t, x_k, Z_i)])^2]} \quad (4)$$

L'exemple par rapport au modèle JSCE présenté dans la figure 2 montre que les paramètres les plus influents sont les ceux relatifs aux conditions d'exposition. Le fait que la concentration en chlorures dans le béton soit plus ou moins important dépend de la concentration à la surface. Les résultats avant 5 ans ne sont représenté. En effet, à cet âge, la pénétration des chlorures est encore faible, ce sont les comportements à long terme qui donnent des informations plus pertinentes.

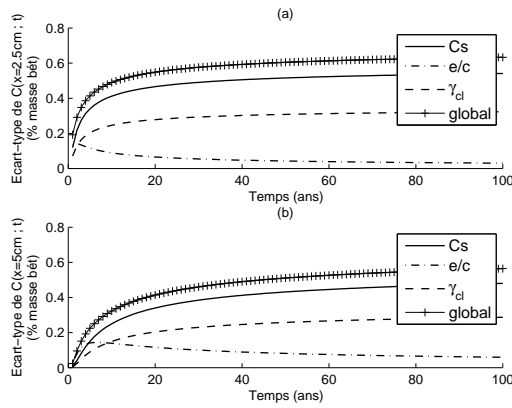


FIGURE 2 – Evolution de la sensibilité par rapport à l'écart-type de la réponse de sortie du modèle JSCE (a) à 2.5 cm et (b) à 5 cm de profondeur

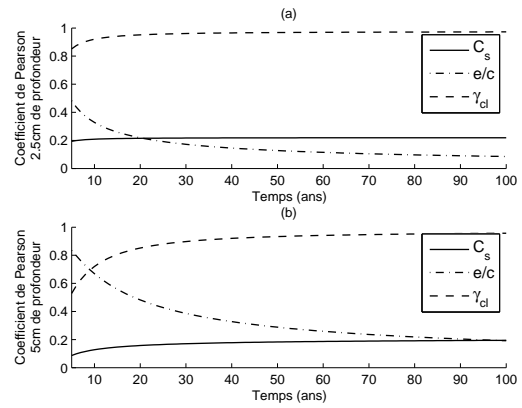


FIGURE 3 – Évolution du coefficient de Pearson en fonction du temps pour les paramètres du modèle JSCE (a) à 2.5 cm et (b) à 5 cm

### 3.2.2 Coefficient de Pearson

Le coefficient de Pearson  $\rho_{cor}$  permet d'évaluer la corrélation linéaire entre deux variables aléatoires. Il est égal au rapport de la covariance des deux variables par le produit de leurs écart type (cf équation 5). Sa valeur est comprise entre -1 et 1. Un résultat proche de 1 en valeur absolue indique une forte corrélation entre les deux paramètres tandis qu'un résultat avoisinant la valeur nulle indique une faible corrélation. Un signe négatif signifie que les deux variables évoluent suivant des sens opposés. Dans le cadre d'une étude de sensibilité des paramètres d'un modèle, c'est le coefficient de Pearson entre le paramètre d'entrée étudié et le ou les paramètres de sortie retenus qui sera calculé :

$$\rho_{cor,x_k}(t) = \frac{\sum(z_i - \bar{z}_i)(y_j - \bar{y}_k)}{\sqrt{\sum(z_i - \bar{z}_i)^2(y_i - \bar{y}_k)^2}} \quad (5)$$

L'exemple avec le modèle JSCE présenté dans la figure 3 rejoint les résultats sur l'écart-type sortie, à savoir l'influence prépondérante de  $C_s$ . A 5 cm, l'influence est plus marquée à long terme, car le phénomène met plus de temps à arriver en profondeur. Les résultats avant 5 ans ne sont représenté car la pénétration des chlorures est encore faible.

## 4 Résultats pour l'ensemble des modèles

Les modèles étudiés ont le même comportement dans le temps, c'est à dire une stabilisation des tendances à partir de 25 ans que cela soit à 2.5 ou 5 cm. Les tableaux 3 et 4 présentent une synthèse des résultats à 50 ans et à 5 cm de profondeur pour les deux familles de modèles. Sur le plan environnemental, la pénétration des chlorures dépend premièrement de la présence et de l'importance de chlorures dans le milieu environnant la structure ( $C_s$ ) d'où l'importance de ce paramètre pour l'ensemble des modèles. Ensuite, les conditions d'expositions : immersion, marnage, ou atmosphérique qui est aussi pris en compte par le paramètre  $C_s$  et  $\lambda$ . Enfin, la température agit sur l'énergie d'activation de la diffusion. Pour la partie matériau, on constate que le coefficient de diffusion est le plus influent. Il s'agit en effet du paramètre caractéristique du transfert. Les paramètres  $D_{rcm}$ ,  $k_c$  et  $k_t$  servent à déterminer ce coefficient pour le modèle DuraCrete, de même que  $e/c$  pour JSCE. Viennent ensuite les paramètres qui tiennent compte de l'évolution de la micro-structure  $n$  et  $\delta$ . Les autres paramètres  $W_{gel}$ ,  $w$ , prennent en compte de manière empirique les interactions entre les chlorures et la matrice cimentaire. L'influence de ce type de paramètre varie d'un modèle à l'autre. Il est cependant à noter que le coefficient de corrélation de Pearson n'est pas adapté pour les paramètres par rapport auxquels les modèles sont non linéaires. C'est pour cela que les résultats de Pearson pour le modèle de LEO qui est très non-linéaire ne sont pas à prendre en compte. C'est notamment le cas pour les paramètres en exposants ( $n$ ,  $\delta$ ,  $\lambda$ ), et  $C_s$  pour le modèle de LEO.

Paramètres		Modèles						
Dénomination		Symbole	Colleparidi[2]	JSCE[5]	Selmer[3]	DuraCrete[9]	LEO[8]	False-erfc[6]
Environnement	Concentration en chlorure à la surface du béton	$C_S$	×	$\gamma_{cl} C_s$	×	×	×	×
	Coefficient de sécurité pour $C_S$	$\gamma_{cl}$		×				
	Température	$T$					×	
	Facteur environnement	$k_e$				×		
	Facteur de vieillissement	$n$			$\delta + \lambda^b$	×		×
Matériau	Teneur en eau	$\omega$					×	
	Age de mise en exposition	$t_{ex}$	×	×	×			×
	Temps de référence	$t_r$			×			×
	Condition de cure	$k_c$			×			
	Facteur du type de test	$k_t$			×			
	Coefficient de diffusion par essai de migration	$D_{rcm}$				×		
	Coefficient de diffusion naturelle apparent des chlorures	$D_a$	×	$\log_{10} D_a = 4.5(e/c)^2 + 0.145(e/c) - 8.47^c$	×	×	×	×
Paramètre de calcul	$k(D_a, t)$	$\frac{x}{2\sqrt{D_a(t-t_{ex})}}$	$\frac{x}{2\sqrt{D_a(t-t_{ex})}}$	$\frac{x}{2\sqrt{D_a(\frac{t}{T})^{\delta+\lambda}(t-t_{ex})}}$	$\frac{x}{2\sqrt{k_e k_c k_t D_{rcm} (\frac{t}{T})^{n t}}}$	$\frac{x}{2\sqrt{(1+\frac{1}{4C_s}) (\frac{1}{T} - \frac{1}{293})} \sqrt{D_a(T) \frac{1 + 0.5 \frac{g e L}{w}}{1 + 0.5 \frac{g e L}{w}}}}$	$\frac{x}{\sqrt{\frac{D_a}{2} \frac{n-1}{2} \left(\frac{t}{T}\right)^n (t-t_{ex})}}$	

- a.  $C_s(t) = A \ln(t - t_{ex}) + B$  où A et B sont obtenus par calage sur des données expérimentales
- b.  $\delta$  effet de l'hydratation et  $\lambda$  effet des échanges avec le milieu extérieur
- c. Relation empirique pour calculer  $D_a$  pour le ciment CEM1
- d.  $D_a \exp \frac{E}{R} (\frac{1}{T} - \frac{1}{293})$  où E est l'énergie d'activation et R la constante des gaz parfaits

Tableau 2 – Paramètres des modèles d'ingénierie de chloration .

Modèle	Colleparidi		JSCE			Leo				
Type	Env	Mat	Env		Mat	Env		Mat		
Symbole	$C_s$	$D_a$	$C_s$	$\gamma_{cl}$	$e/c$	$C_s$	$T$	$D_a$	$W_{gel}$	$w$
Élasticité	1	0,277	1	1	1,128	0,971	4,968	0,706	-0,403	0,386
Pearson	0,018	0,132	0,715	0,501	0,156	0,744	0,105	0,526	-0,196	0,105
Ecart-type	0,331	0,091	0,430	0,255	0,081	0,173	0,077	0,122	0,048	0,024

Tableau 3 – Synthèse des sensibilités par rapport aux paramètres d’entrée à 50 ans et à 5 cm pour les modèles avec tous les paramètres non fonction du temps (Famille 1)

Modèles	DuraCrete						Selmer				False-erfc		
Type	Environnement		Matériau				Environnement		Matériau		Env	Matériau	
Symbole	$C_s$	$k_e$	$n$	$D_{rcm}$	$k_c$	$k_t$	$C_s$	$\lambda$	$D_a$	$\delta$	$C_s$	$n$	$D_a$
Élasticité	1	19,941	-9,988	19,941	19,941	19,941	1	-9,999	68,287	-9,003	1	-5,750	4,409
Pearson	0,031	0,232	0,039	0,198	0,318	0,039	0,062	-0,411	0,544	-0,109	0,172	-0,716	0,640
Ecart-type	8,18 $\times 10^{-07}$	1,46 $\times 10^{-05}$	9,30 $\times 10^{-05}$	1,06 $\times 10^{-05}$	2,99 $\times 10^{-05}$	1,89 $\times 10^{-06}$	1,65 $\times 10^{-11}$	2,82 $\times 10^{-10}$	7,22 $\times 10^{-10}$	4,64 $\times 10^{-11}$	0,004	0,017	0,014

Tableau 4 – Synthèse des sensibilités par rapport aux paramètres d’entrée à 50 ans et à 5 cm pour les modèles avec des paramètres dépendant du temps (Famille 2)

## 5 Conclusions

La synthèse des modèles a permis de mettre en évidence qu’ils peuvent être transcrits sous une forme générale commune. L’extension de l’étude dans un cadre stochastique a fait ressortir une autre expression générale de ces modèles. L’élasticité permet d’avoir une première information de la façon dont les perturbations en entrée vont influencer sur la réponse. Pour une étude plus complète, il convient de propager de la variabilité au sein du modèle et d’analyser l’influence sur la réponse. D’où nous avons considéré les simulations de Monte Carlo pour l’analyse de sensibilité sur le coefficient de Pearson et l’écart-type de la réponse. Le coefficient de corrélation de Pearson est entaché d’erreurs en présence de modèles très non linéaires. En s’appuyant sur l’écart-type de la réponse, nous avons trouvé que les paramètres les plus influents diffèrent d’un modèle à l’autre.

## Références

- [1] *Structural Reliability*, chapter Products of reliability analysis. ISTE Ltd and John Wiley Sons, Inc., 2009.
- [2] M. Colleparidi, A. Marcialis, and R. Turriziani. The kinetics of chloride ions penetration in concrete. *Il Cemento*, 67 :157–164, 1970.
- [3] *EuroLightCon document BE96-3942/R3*, 1999.
- [4] R. Taylor I., Richardson and R.M.D. Brydson. Composition and microstructure of 20-year-old ordinary portland cement–ground granulated blast-furnace slag blends containing 0 to 100slag. *Cement and concrete research*, 2010.
- [5] JSCE. Proposed specification of durability design for concrete dtructures. Technical report, Japan Society of Civil Engineers, 2002.
- [6] L. Nilsson. Prediction models for chloride ingress and corrosion initiation in concrete structures. In *Nordic Mini Seminar - Fib TD 5.5 Meeting, Goteborg*, 2001.
- [7] H.S. Wong N.R., Buenfeld. Determining the water–cement ratio, cement content, water content and degree of hydration of hardened cement paste : Method development and validation on paste samples. *Cement and Concrete Research*, 2009.
- [8] I. Petre-Lazar. *Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers*. Thèse de génie civil, Université Laval, Québec, 2001.
- [9] Project BE95-1347, Final report. *DuraCrete Brite Euram III*, eu edition, 2000.