

Prédiction de la corrosion induite par des chlorures marins dans des structures en béton armé par utilisation de la méthode FORM

P. Claude^{1,2,3}, F. Duprat¹, T. de Larrard¹, J. Mai-Nhu², P. Rougeau², L. Marracci³, P. Guédon³

¹ Université de Toulouse, LMDC INSA-UPS, duprat@insa-toulouse.fr, delarrar@insa-toulouse.fr

² CERIB Epernon, P.CLAUDE@cerib.com, J.MAI-NHU@cerib.com, P.ROUGEAU@cerib.com

³ Arcadis ESG, Paris, louis.marracci@arcadis.com pascal.guedon@arcadis.com

RESUME La corrosion des armatures en acier dans les structures en béton est une cause majeure de leur détérioration. En particulier, la pénétration des ions chlorure est une problématique majeure pour la durabilité des ouvrages en béton situés en bord de mer car elle peut entraîner un développement de corrosion par piqûre. Le cas d'un quai en béton armé soumis à l'action des chlorures marins est détaillé dans cette étude. Un modèle d'élément fini spécifique (FEM) a été développé dans le but d'estimer le temps de dépassivation des armatures. Ainsi, l'étude vise à estimer la probabilité d'initiation de la corrosion lorsque la quantité de chlorure à la surface de l'armature dépasse une valeur seuil. La détermination du temps correspondant à ce dépassement, avec une probabilité prédéfinie, est une étape importante pour la maintenance d'un ouvrage. Les propriétés du béton, l'environnement externe (pression partielle de CO₂, teneur en chlorures, humidité relative) sont considérés comme des variables aléatoires dans l'étude. Afin de surmonter la charge numérique du modèle dans les calculs probabilistes, un modèle de substitution basé sur un chaos polynomial est utilisé. Une analyse de sensibilité de Sobol est effectuée sur les paramètres pour observer leur influence sur le résultat.

Mots-clefs Chlorures, initiation de la corrosion, béton armé, approche probabiliste, chaos polynomial

I. INTRODUCTION

Le béton armé est le matériau de construction le plus largement utilisé. La durabilité de ce matériau est en lien étroit avec la corrosion des aciers qu'il contient. En effet, le béton enrobe et protège les armatures métalliques contre les agressions extérieures et assure un milieu alcalin autour de la surface en acier, favorisant ainsi sa passivation (Tuutti, 1982). En effet, les phénomènes majeurs impactant la durabilité des bétons armés tels que la corrosion induite par la carbonatation ou la pénétration des ions chlorure sont influencés par les propriétés des matériaux et le dimensionnement des enrobages (L'Hostis et al., 2009). Le béton est un matériau complexe, et la variabilité de ses propriétés complexifie généralement son étude et sa modélisation.

L'impact financier de la corrosion des ouvrages dans le monde est estimé entre 2,5% et 4,5% du PIB mondial, soit 2000 milliards de dollars US par an (Moulinier, 2010). Ce point souligne la nécessité de maîtriser ce processus de dégradation afin de réduire les coûts associés à la maintenance et à la

réparation des ouvrages. De plus, la corrosion des armatures peut conduire à des problèmes de sécurité pour les utilisateurs finaux, car elle fait croître le risque de défaillance de la structure.

Les deux principaux phénomènes induisant la corrosion dans le béton armé sont liés à la diffusion d'espèces agressives, respectivement les ions chlorure et le dioxyde de carbone. Ces travaux se concentrent sur l'étude de la pénétration des ions chlorure qui peuvent détruire le film passif formé autour de l'armature (Schuessl and Lay, 2005). Les chlorures sont présents sous forme ionique dans l'environnement et pénètrent dans le béton soit par diffusion, soit par convection. Dans le béton, les chlorures interagissent avec certains hydrates de la matrice et peuvent y être fixés. Cette propriété de la matrice cimentaire, appelée capacité de liaison, peut ralentir la pénétration des chlorures dans le matériau (Hirao et al., 2005). La littérature fait état d'une fixation « physique » avec les C-S-H, et d'une fixation « chimique » issue d'une réaction avec les monosulfoaluminates de calcium hydratés (Afm) produisant ainsi des sels de Friedel.

Lorsque les ions chlorure se trouvent en quantité suffisante (concentration dite « critique ») au niveau de l'interface acier/béton, la couche passive est attaquée laissant l'acier non protégé contre la corrosion. La concentration critique à l'interface de l'armature requise pour provoquer l'initiation de la corrosion fait l'objet de nombreuses études. Les valeurs trouvées dans la littérature fluctuent entre 0,03 et 8,34 % massique (rapporté à la masse de ciment) (Angst et al., 2009).

La carbonatation est un processus physico-chimique affectant la matrice cimentaire du béton. Ce phénomène se produit en présence d'eau (nécessaire à la dissolution du dioxyde de carbone) (Turcry et al., 2014). Le dioxyde de carbone, une fois dissous, réagit avec les hydrates de la matrice cimentaire entraînant une diminution de l'alcalinité de la solution interstitielle jusqu'à, pour des pH inférieurs à 9, l'initiation de la corrosion (Schmitt, 2019).

Dans ces travaux, l'impact de la carbonatation sur les propriétés de transfert et sur capacité de fixation des ions chlorure est pris en compte. En effet, la formation de calcite liée à la consommation de portlandite, entraîne une chute de la porosité globale du matériau, impactant les autres phénomènes de transfert (Ngala and Page, 1997). De plus, la consommation d'hydrates, dont les C-S-H et les Afm, atténue la capacité de fixation des ions chlorure de la matrice cimentaire (von Greve-Dierfeld et al., 2020).

II. MODELE DE DURABILITE

SDReaM-crete est un modèle de durabilité développé conjointement par le CERIB et le LMDC (Maihnu, 2013; Schmitt, 2019). Il permet la modélisation de la carbonatation, de la pénétration des ions chlorure et de la corrosion induite par ces deux phénomènes de manière indépendante ou couplée. Les espèces considérées sont énumérées ci-dessous :

- Les hydrates de la matrice cimentaire : la portlandite (CH), les silicates de calcium (C-S-H), les monosulfoaluminates de calcium (Afm), l'ettringite (Aft)
- Les ions chlorure : chlorure libre (Cl⁻), chlorure physiquement lié (YC-S-H) et sels de Friedel (FS)
- Le dioxyde de carbone (avec la pression partielle de CO₂)
- L'eau (avec l'humidité relative)

Les équations de transfert des différentes espèces sont basées sur la seconde loi de Fick. Les équations différentielles sont résolues avec une méthode des éléments finis (MEF) effectuée sur le logiciel Comsol. D'un point de vue plus général, SDReaM-crete est un modèle composé de 45 constantes (calibration, thermodynamique, physicochimique...), 48 variables (paramètres microstructuraux, coefficients de durabilité...) et 47 équations (loi d'Arrhenius, Van Genuchten, Millington...). La cure du béton est considérée grâce à un facteur **Cu** compris entre 0.5 (défavorable) et 1 (favorable). Ce facteur impacte les 10 premiers millimètres du béton en réduisant les quantités d'hydrates, augmentant la porosité et la perméabilité liquide lorsque la cure est défavorable. Son calage est basé sur les travaux de (Mai-Nhu, 2013) et de (Lion and Sanahuja, 2018) et considère le séchage des pores.

La complexité du modèle et le temps de calcul nécessaire à son fonctionnement, pouvant aller jusqu'à quelques heures, rendent son utilisation impossible dans le contexte d'une approche probabiliste. L'une des solutions existantes à ce problème est l'utilisation d'un modèle subsidiaire basé sur les résultats obtenus avec le modèle initial. Dans ce travail, la création d'un méta-modèle est réalisée à l'aide d'une méthode de chaos polynomial.

III. ETUDE DE CAS

L'objectif de ces travaux est la prédiction de la durabilité d'éléments en béton armé immergés dans l'eau de mer ou se situant en zone de marnage. Les environnements considérés correspondent respectivement aux classes d'expositions XS2 et XS3 définies dans la norme NF EN 206+A2/CN. Un modèle de substitution est donc défini pour la modélisation de ces deux types d'environnements.

La température T est décrite par une fonction sinusoïdale simple permettant une variation ΔT (prise constante et égale à 10 °C) autour d'une valeur moyenne μ_T . Une variation de température annuelle est considérée.

Des variations de l'humidité relative et de la pression partielle de CO₂ doivent être prises en compte pour considérer des parties d'ouvrages en zone de marnage. Une fonction sinusoïdale est aussi considérée pour l'humidité relative (HR , voir **Equation (1)**), cette fois en considérant une période de variation P_v , exprimée en année, comme variable aléatoire. Le temps t est exprimé en année.

$$HR(t) = \mu_{HR} + \Delta_{HR} \cdot \sin\left(\frac{t}{P_v}\right) \quad (1)$$

De par la nature des équations de transferts (qui intègre l'équation de Millington pour la résistance à la diffusion), la diffusion du CO₂ devient négligeable lorsque l'humidité relative approche les 100 %. Lors de la considération de béton en immersion continue, Δ_{HR} est pris égale à 0 %, et μ_{HR} égale à 100 %, empêchant par la même occasion la pénétration du CO₂ dans le matériau et sa carbonatation.

IV. META-MODEL

A. Sélection des paramètres d'entrée et de sortie

Un total de 7 paramètres environnementaux et de 9 paramètres matériaux sont considérés (voir **Tableau 1**).

TABLEAU 1. Définitions des différents paramètres d'entrée du modèle de substitution.

	Paramètre	Unité	Minimum	Maximum
Matériaux	Porosité (ϕ)	-	0,05	0,22
	$E_{\text{eff}}/L_{\text{tot}}$ (E/L)	-	0,35	0,65
	Coefficient de diffusion (D_{Cl^-})	$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$	10^{-15}	10^{-10}
	Facteur de cure (C_u)	-	0,5	1
	Facteur de vieillissement (α)	-	0	1
	Portlandite (CH)	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$ de béton	100	2000
	C-S-H (CSH)	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$ de béton	200	2500
	Ettringite (Aft)	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$ de béton	25	600
	Monosulfoaluminates (Afm)	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$ de béton	25	600
Environnementaux	Temps d'exposition (T_{ps})	Année	1	100
	Température annuelle (T)	Kelvin	273	303
	Concentration en Cl^- (C_{Cl^-})	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$	300	800
	Concentration critique (C_{crit})	$\text{mol}.\text{m}^{-3}$	40	440
	Humidité relative (HR)	%	60	100
	Variation d' HR (Δ_{HR})	%	0	40
	Période de variation (P_v)	Année	0,0548	1

Afin de permettre l'apprentissage du modèle de substitution, une méthode d'échantillonnage par hypercube latin est utilisée pour créer la base de données destinées aux calculs. L'objectif est de couvrir efficacement l'ensemble des domaines à 15 dimensions définies par les bornes du **tableau 1** pour le modèle de substitution. Des distributions uniformes sont choisies.

Le méta-modèle défini permet l'obtention de deux sorties différentes :

- Un champ de valeurs (unidimensionnel) correspondant à la concentration en ions chlorure libres à différentes profondeurs (chaque mm de 10 à 80 mm) pour un temps donné. Cette sortie va permettre l'établissement du profil de chlorure au temps de l'inspection réalisée sur l'ouvrage, et d'estimer les valeurs de D_{Cl^-} pour chaque béton.
- La valeur de profondeur maximale (mm) ou la concentration en ions chlorure dans le matériau dépasse la valeur de C_{crit} . Cette sortie sera utilisée pour l'approche probabiliste où la valeur de $(C_{\text{crit}} - C_{\text{Cl}^-})$ servira de critère de dépassivation.

La validation du modèle s'effectuera donc sur ces deux sorties, menant à l'obtention de deux coefficients de détermination, minimal et moyen, pour le champ de concentration, et à un troisième coefficient de détermination pour la valeur ponctuelle servant de critère de dépassivation.

B. Chaos polynomial

Le module Python OpenTURNS est utilisé pour la création du modèle de substitution par chaos polynomial. Le fonctionnement global de l'algorithme développé est décrit dans cette section.

Tout d'abord, la base de données des résultats est divisée aléatoirement en deux sous-ensembles : le premier (75%, 1182 sets de données) sert à calculer les coefficients inconnus du méta-modèle. Le second (25%, 394 sets de données) est dédié à la validation du méta-modèle en comparant les résultats obtenus avec le modèle de substitution et le modèle original.

L'objectif du chaos polynomial est de calculer la réponse d'une variable de sortie aléatoire (Y) en fonction de paramètres d'entrée ($X = \{x_1 \dots x_m\}$) par l'expression générale **Equation 2**.

$$Y = \sum_{\alpha \in N^m} a_{\alpha} \psi_{\alpha}(X) \quad (2)$$

ψ_{α} représente le polynôme multivarié constituant l'espace probabiliste associé aux paramètres d'entrée et a_{α} les coefficients appartenant aux nombres réels ([Blatman and Sudret, 2011](#)).

Dans ce travail, les polynômes de Legendre sont utilisés. Cette famille de polynômes spécifique est associée aux distributions uniformes des données d'entrée, ce qui est le cas pour ce travail du fait que l'échantillonnage par hypercube latin a été défini comme tel dans ces travaux ([McClarren, 2018](#)). La détermination de a_{α} est effectuée par méthode des moindres carrés. Enfin, une méthode de chaos creux est employée, consistant à éliminer les polynômes ayant peu d'impact sur le résultat, au fur et à mesure de la phase d'apprentissage du modèle ([Blatman and Sudret, 2011](#)). La valeur retenue pour le degré maximal du modèle de substitution est de 4.

Pour mesurer la performance du modèle obtenu, le deuxième sous-ensemble de données est utilisé. Une méthode de validation croisée appelée "leave-out one" permet de déterminer le coefficient Q2 qualifiant la capacité de généralisation du modèle de substitution. La valeur de Q2 est comprise entre 0 et 1. Plus sa valeur est élevée et meilleure est la performance du modèle. Dans le cas du méta-modèle de cette étude, les valeurs de 0,88 et 0,94 sont obtenues pour l'établissement du champ de concentration et correspondent respectivement à la valeur de Q2 minimale et moyenne. Enfin, un Q2 de 0,96 est obtenu pour l'établissement de la valeur ponctuelle correspondant à la profondeur maximale où $[CI^-]$ dépasse celle de C_{crit} .

Les faibles valeurs de coefficients de détermination obtenues pour le champ de concentration peuvent s'expliquer par le grand nombre de résultats calculés. En effet, il est plus difficile d'estimer la concentration en chlorures à certaines profondeurs pour le modèle. C'est essentiellement le cas pour les faibles profondeurs (inférieures à 20mm) du fait de la grande variation associée au phénomène convectif. Cet aspect explique les valeurs minimale et moyenne de 0,88 et 0,94, mais n'est pas problématique pour l'estimation de la concentration à des profondeurs plus importantes.

C. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité de Sobol permet de mettre en évidence de différente façon l'influence des paramètres sur les sorties du modèle ([Damblin and Ghione, 2021](#)). Le calcul de l'indice de premier ordre permet d'observer l'influence d'un paramètre seul sur le résultat, tandis que l'indice d'ordre total montre l'influence d'un paramètre et de ses interactions avec le reste des entrées. Ces indices sont calculés ici et représentés sur la **Figure 1**. La sortie considérée ici est la valeur d'enrobage

maximale pour laquelle $[Cl^-]$ est supérieure à C_{crit} puisqu'il n'est pas possible de calculer directement les valeurs des indices sur l'ensemble du champ de concentration.

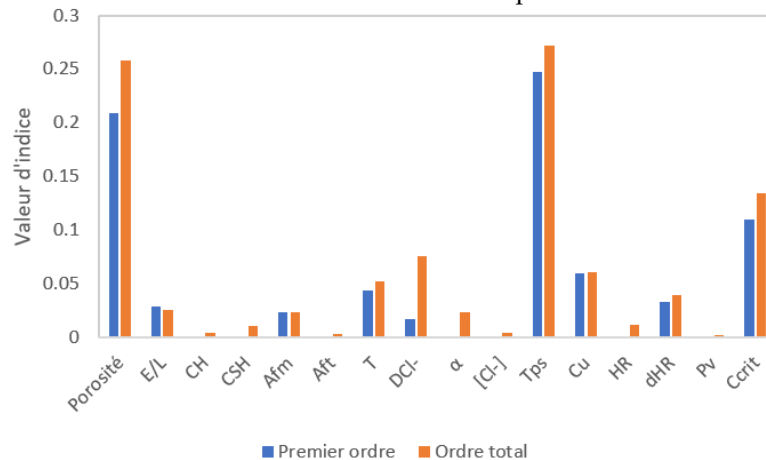


FIGURE 1. Indices de Sobol de premier ordre et totaux obtenus pour le modèle de substitution.

V. DETERMINATION DE LA FIABILITE

La méthode de fiabilité d'ordre 1 (FORM) est utilisée pour calculer la probabilité de défaillance (Benjamin, 1980):

$$P_f = P(g(X, d) \leq 0) = \int_{D_f} f_X(x) dx \quad (3)$$

où X est le vecteur aléatoire d'entrée, $f_X(x)$ la fonction de densité de probabilité conjointe, $g(X, d)$ la fonction d'état limite du modèle et d un vecteur déterministe. Le domaine de défaillance D_f est défini tel que $D_f = \{X \in \mathbb{R}^n / g(X, d) \leq 0\}$.

Dans le cas de ce travail, le critère de défaillance g est exprimé avec l'inéquation $C_{crit} - [Cl^-] \leq 0$.

VI. APPLICATION SUR OUVRAGE

A. Choix des distributions

Les données utilisées pour les simulations proviennent d'inspections réalisées sur un port situé en France, soumis à un accord de confidentialité. Des mesures sont réalisées dans quatre zones : deux zones immergées en permanence et deux zones soumises au marnage. L'hypothèse que des dosages en ciment de 340 kg/m^3 ont été utilisés pour l'ensemble des bétons est faite. Les natures de ciments de chaque partie d'ouvrage ont été déterminées par analyses au MEB et correspondent à un CEM V/A S-V pour P1_XS3, un CEM I pour P1_XS2 et un CEM III/B pour P2_XS2 et P2_XS3. L'incertitude liée à ce type de mesure est considérée au travers des écarts-types des hydrates dans le cadre de l'approche probabiliste. Ces données matériaux permettent l'estimation des données d'entrée du modèle de substitution grâce à l'utilisation de différents modèles de la littérature (voir le Tableau 2). Des dosages en ions chlorure libres à différentes profondeurs, réalisés après 41 ans d'expositions,

permettent l'estimation des coefficients D_{cl} par dichotomie avec l'aide du modèle de substitution (voir la **Figure 2**). Pour cette étape qui consiste à réaliser des calculs déterministes, les paramètres moyens donnés dans les **Tableaux 2** et **3** sont utilisés. Les données d'entrée ont été déterminées par application de modèles ((*Kolani et al., 2012; Powers, 1948*)), dans des documents d'archives, par des profils de chlorures ou par application d'une formule issue du FD P 18-480 pour le facteur de vieillissement α (voir **Equation (4)**).

$$\alpha = 0,3 + \min(0,2S; 0,15) + \min(1,1FA; 0,3) + \min(1,1SF; 0,1) + \min(1,1MK; 0,1) \quad (4)$$

Avec S , FA , SF et MK les pourcentages massiques de laitier, cendres volantes, fumée de silice et métakaolin dans le liant.

TABLEAU 2. Valeurs moyennes des paramètres matériaux estimées pour les différentes zones de l'ouvrage.

	S	FA	CH	CSH	Afm	Aft	$Porosité$	E/L	D_{cl}	α
Unité	%	%	mol/m ³ de béton			-	-	-	10 ⁻¹² m ² /s	-
P1_{XS2}	0	0	1053	1575	390	294	0,170	0,59	8	0,3
P2_{XS2}	60	0	327	1784	218	197	0,139	0,50	5	0,42
P1_{XS3}	22	22	162	1621	116	133	0,112	0,47	0,4	0,59
P2_{XS3}	60	0	336	1797	221	201	0,140	0,51	1	0,42

La **Figure 2** montre qu'une zone de convection se forme dans le modèle, peu importe le type d'environnements (XS2 ou XS3) considéré. D'un point de vue mathématique, ce défaut est sûrement dû à des difficultés d'apprentissages liées à la considération du phénomène convectif lorsque des variations hydriques sont présentes. Cependant, des comportements similaires sont parfois observés avec des mesures expérimentales sur ouvrages. C'est le cas de certaines données récoltées dans le projet national PerfDuB (*Godart and Dierkens, 2022*)

Les paramètres environnementaux sont calibrés sur des mesures d'une station météo située à proximité de l'ouvrage. Enfin, le temps (Tps) et l'enrobage (ENR) sont considérés comme des paramètres déterministes.

TABLEAU 3. Distributions des différents paramètres utilisés pour les simulations.

Paramètres	Distribution	Paramètres	Distribution XS2	Distribution XS3
$Porosité (-)$	$N(\mu_p, \sigma = 0,025)$	$T (K)$	$N(\mu = 290, \sigma = 5)$	
$E/L (-)$	$N(\mu_p, \sigma = 0,025)$	$C_{cl} (mol/m^3)$	$N(\mu = 561, \sigma = 50)$	
$CH (mol/m^3)$	$N(\mu_p, \sigma = 50)$	$HR (%)$	$C = 0.98$	$N(\mu = 0,7, \sigma = 0,1)$
$CSH (mol/m^3)$	$N(\mu_p, \sigma = 100)$	$dHR (%)$	$C = 0$	$N(\mu = 0,2, \sigma = 0,1)$
$Afm/Aft (mol/m^3)$	$N(\mu_p, \sigma = 25)$	$Pv (an)$	$C = 365$	$N(\mu = 40, \sigma = 10)$
$D_{cl} (m^2/s)$	$N(\mu_p, \sigma = 10^{-13})$	$C_{crit} (mol/m^3)$	$N(\mu = 100, \sigma = 50)$	
$\alpha (-)$	$N(\mu_p, \sigma = 0,05)$	$Cu (-)$	$U(\min = 0,9, \max = 1)$	

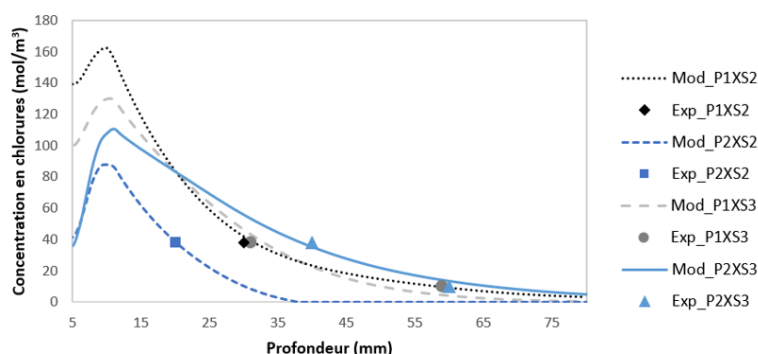


FIGURE 2. Résultats déterministes obtenus avec le modèle de substitution et lors de l'inspection des différentes parties de l'ouvrage après 41 ans d'expositions.

B. Calculs de fiabilité

Les calculs probabilistes réalisés consistent à estimer la probabilité de dépassivation pour un temps d'exposition de 100 ans et différentes valeurs d'enrobages. Les résultats obtenus pour les quatre zones de l'ouvrage sont exposés sur la **Figure 3**.

Il est possible de voir que les pièces exposées à un environnement XS3 mènent à des probabilités de dépassivation plus élevées. Cet aspect est en effet attendu à cause de l'action du phénomène convectif sur le transport des ions chlorure. L'écart entre les valeurs obtenues pour P1XS3 et P2XS3 s'explique essentiellement par l'écart des valeurs de nature du liant, de porosité, E/L et de D_{Cl} . Les différences des mêmes paramètres expliquent les valeurs plus élevées obtenues pour la pièce P1XS2 par rapport à P2XS2. En fixant un indice de fiabilité β de 1,5 (équivalant à une probabilité de dépassivation de 6,67 %) comme valeur seuil, il est possible de définir les valeurs limites d'enrobages ($Elim$) affichées sur la **Figure 3**. Dans le cadre d'une inspection de la structure, si des valeurs d'enrobages inférieurs à ces valeurs limites étaient identifiées, il pourrait être décidé d'effectuer des actions de maintenance préventives pour prévenir la dépassivation des armatures.

TABLEAU 4. Valeurs et sens des variations associées à chaque paramètre pour P2XS3.

Paramètres	Sens	Variation abs (%)	Paramètres	Sens	Variation abs (%)
Porosité (-)	+	92,92	T (K)	+	25,89
D_{Cl} (m^2/s)	+	42,46	Cu (-)	-	29,70
E/L (-)	+/-	4,11/10,67	Tps (an)	+	15,9
A_{fm} (mol/m^3)	-	3,03	dHR (%)	+	11,65
α (-)	-	2,67	HR (%)	+	11,42
A_{ft} (mol/m^3)	+	0,71	C_{crit} (mol/m^3)	-	31,10
CSH (mol/m^3)	+	0,49	$[Cl^-]$ (mol/m^3)	+	1,20
CH (mol/m^3)	+	0,37	Pv (an)	-	0,72

Les variations absolues de la probabilité de dépassivation associées à la variation de différents paramètres sont étudiées pour la pièce P2XS3 (voir **Tableau 4**). Les paramètres sont considérés un à un et les probabilités de dépassivation sont calculées sur l'ensemble des plages de données définies dans le **Tableau 1**. Le sens de variation de la probabilité de dépassivation avec l'augmentation de chaque paramètre est défini, ainsi que la variation absolue obtenue.

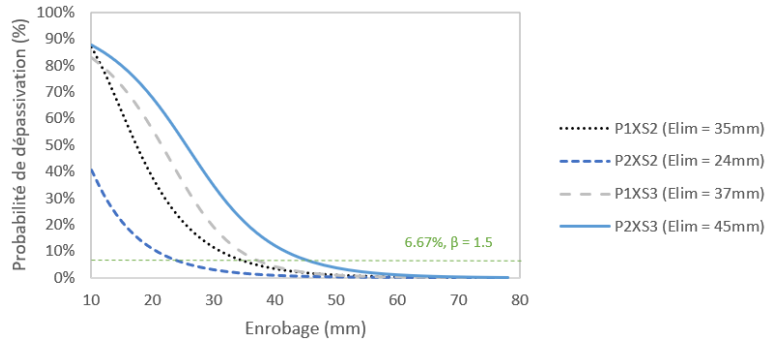


FIGURE 3. Evolution de la probabilité de dépassivation associée à chaque pièce en fonction de l'enrobage considéré (Tps = 100 ans).

Ces derniers calculs montrent les limites de l'analyse de sensibilité réalisée par le calcul des indices de Sobol. En effet, les indices de Sobol permettent une estimation de l'impact des paramètres sur l'ensemble du domaine de construction du modèle de substitution, ce qui ne rend pas obligatoirement compte de leurs impacts dans un cas précis. Pour cette raison, certains paramètres comme le coefficient de diffusion des ions chlorure (D_{Cl^-}), le facteur de cure (Cu) et la température (T) sont associés à des impacts plus grands dans le **Tableau 4** que sur la **Figure 1**.

Il est possible de s'interroger sur la cohérence de certaines valeurs obtenues par rapport à la physique considérée. Le cas du paramètre $[Cl^-]$ qui possède un très faible impact peut notamment soulever quelques questions quant à la capacité du modèle à représenter le phénomène avec grande précision. Si le modèle représente bien la réalité, alors une intention particulière doit être portée par les maîtres d'ouvrages sur la formulation du béton d'enrobage, afin de contrôler les paramètres les plus influents sur la probabilité de dépassivation.

VII. CONCLUSION

Dans cet article, un modèle de substitution est établi à partir d'un modèle de durabilité résolu par éléments finis en utilisant un chaos polynomial creux d'ordre 4. Le méta-modèle créé est capable de calculer la probabilité d'initiation de la corrosion (avec un coefficient de détermination de 0,96) ainsi que le profil de concentration des ions chlorure (avec un coefficient de détermination moyen de 0,94 et minimum de 0,88) pour des pièces en béton armé immergées en permanence ou en zone de marnage. Les indices de Sobol calculés lors de l'analyse de sensibilité montrent que les paramètres d'entrée du modèle qui ont l'impact le plus important sur la probabilité d'initiation sont : le temps d'exposition (Tps), la porosité et la valeur limite de concentration en ions chlorure provoquant la dépassivation (C_{crit}). Une seconde étude de variation effectuée pour le cas spécifique d'une partie d'ouvrage maritime en zone de marnage montre que certains des autres paramètres peuvent aussi avoir un impact non négligeable, à savoir le coefficient de diffusion des ions chlorure (D_{Cl^-}), la cure du béton (représentée par le facteur de cure Cu) et la température (T). Enfin, une démarche probabiliste est mise en œuvre à l'aide de la méthode FORM (First Order Reliability Method) pour quatre zones d'un ouvrage maritime exposées à des environnements XS2 et XS3. L'estimation d'enrobage limite pour un temps de 100 ans est alors réalisée, en considérant un indice de fiabilité d'une valeur de 1,5 (probabilité de dépassivation de 6,67%).

REFERENCES

- Angst, U., Elsener, B., Larsen, C.K., Vennesland, Ø., 2009. Critical chloride content in reinforced concrete — A review. *Cem. Concr. Res.* 39, 1122–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.006>
- Benjamin, J.R., 1980. The basics of structural reliability. *Nucl. Eng. Des.* 60, 3–9.
- Blatman, G., Sudret, B., 2011. Adaptive sparse polynomial chaos expansion based on least angle regression. *J. Comput. Phys.* 230, 2345–2367. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2010.12.021>
- Damblin, G., Ghione, A., 2021. Adaptive use of replicated Latin Hypercube Designs for computing Sobol' sensitivity indices. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 212, 107507. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107507>
- Godart, B., Dierkens, M., 2022. PN PerfDuB - Synthesis Report of GT2a - Analysis of Data obtained on existing structures.
- Hirao, H., Yamada, K., Takahashi, H., Zibara, H., 2005. Chloride Binding of Cement Estimated by Binding Isotherms of Hydrates. *J. Adv. Concr. Technol.* 3, 77–84. <https://doi.org/10.3151/jact.3.77>
- Kolani, B., et Al., 2012. Hydration of slag-blended cements. *Cem. Concr. Compos.* 34, 1009.
- L'Hostis, V., et Al. 2009. Characterization of long-term corrosion of rebars embedded in concretes sampled on French historical buildings aged from 50 to 80 years. *Mater. Corros.* 60, 93–98.
- Lion, M., Sanahuja, J., 2018. Perméabilité à l'eau des bétons : développement d'une méthode alternative par séchage.
- Mai-Nhu, J., 2013. Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation-chlorures en présence de cycles hydriques.
- McClarren, R.G., 2018. Stochastic Projection and Collocation, in: McClarren, R.G. (Ed.), *Uncertainty Quantification and Predictive Computational Science: A Foundation for Physical Scientists and Engineers*. Springer International Publishing, Cham, pp. 189–254. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99525-0_9
- Moulinier, F., 2010. Combien coûte la corrosion ? *Tech. Sci. Méthodes* 26–38.
- Ngala, V.T., Page, C.L., 1997. Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes. *Cem. Concr. Res.* 27, 995–1007. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00102-6](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00102-6)
- Powers, T.C., 1948. A discussion of cement hydration in relation to the curing of concrete. *Highw. Res. Board Proc.* 27.
- Schiessl, P., Lay, S., 2005. 4 - Influence of concrete composition, in: Böhni, H. (Ed.), *Corrosion in Reinforced Concrete Structures*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering.
- Schmitt, L., 2019. Durabilité des ouvrages en béton soumis à la corrosion: optimisation par une approche probabiliste.
- Turcry, Ph., Oksri-Nelfia, L., Younsi, A., Aït-Mokhtar, A., 2014. Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning. *Cem. Concr. Res.* 57, 70–78.
- Tuutti, K., 1982. Corrosion of steel in concrete. *Swed. Cem. Concr. Res. Inst.*
- Von Greve-Dierfeld, et Al., 2020. Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Mater. Struct.* 53, 136.