

Développement d'un outil pour la prédiction de l'initiation de la corrosion dans les ouvrages en béton armé

Paulo Claude

Affiliations :

CERIB (Centre d'Etude et de Recherche de l'Industrie du Béton), Département Matériaux et Economie Circulaire, 1 Rue des Longs Réages, 28231 Epernon, France

Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135 Avenue de Rangueil, 31077 Toulouse, France

Arcadis ESG, 200-216 Rue Raymond Losserand, 75014 Paris, France

RESUME Cet article présente un outil de prédiction de l'initiation de la corrosion dans le béton armé. Son utilisation est destinée à des gestionnaires et maîtres d'ouvrages, pour l'aide à la décision concernant la réalisation d'opérations de maintenance et de réparation. L'application mise au point est composée d'une interface graphique développée sous Python qui permet à l'utilisateur un accès simplifié à différents modèles (numériques et analytiques) pour l'estimation de la durabilité du béton armé. Les phénomènes de carbonatation et de pénétration des ions chlorure ainsi que la propagation de la corrosion associée sont considérés. Différentes méthodes mathématiques permettent à l'utilisateur l'estimation des paramètres d'entrée des modèles à partir de la seule connaissance de la formulation du béton et de son environnement. Enfin, une approche probabiliste (FORM) peut être mise en œuvre pour l'ensemble des modèles et permet d'estimer différentes valeurs telles que la probabilité de dépassement. Une étude de cas sur un béton à base de CEM III/A est réalisée à titre d'exemple.

Mots-clés Dépassement, Corrosion, Modélisation, Approche probabiliste, Maintenance

I. INTRODUCTION

La maintenance des ouvrages d'art et maritimes en béton armé constitue un enjeu fort pour les maîtres d'ouvrage et les exploitants d'infrastructures existantes. L'une des principales causes menant à la perte de performance (ou de service) d'une structure en béton armé est la corrosion des armatures en acier [1]. Ce phénomène intervient généralement en deux étapes, la phase d'initiation et la phase de propagation [2]. Le béton qui protège l'armature en acier est un matériau basique avec un pH supérieur à 13 dans le cas d'un béton traditionnel [3]. L'acier contenu dans le béton est donc maintenu dans des conditions de passivation qui le protège de la corrosion (diagramme de Pourbaix [4]). La phase d'initiation de la corrosion correspond donc à la pénétration d'espèces agressives dans le béton qui vont altérer la matrice cimentaire. Lorsque ces espèces atteignent la zone proche de l'armature, la dépassement de l'acier se produit et permet l'initiation de la corrosion.

Les deux principaux phénomènes responsables de l'initiation de la corrosion sont la pénétration des ions chlorure et la carbonatation [5]. La pénétration des ions chlorure en quantité suffisante au niveau de l'armature entraîne la dissolution du film de dépassement [6]. La carbonatation correspond à la pénétration du CO₂ dans le matériau et sa réaction avec les hydrates de la pâte cimentaire. Elle entraîne une chute du pH et l'instabilité du film passif d'oxyde protégeant les armatures [7].

Il existe donc un réel besoin pour les ingénieurs en génie civil de prédire ces phénomènes afin d'optimiser la prévision des opérations de maintenance et de réparation des structures en béton armé. Afin de considérer de manière adéquate ces phénomènes et la corrosion subséquente, il est possible de recourir à différents modèles de durabilité [5, 8, 9].

Afin de prendre en compte la complexité des phénomènes liés à la durabilité du béton armé ainsi que la variabilité des paramètres intrinsèques au matériau, il est possible d'avoir recours à une approche probabiliste. Ce type d'approche, plus poussée qu'une approche déterministe, permet à l'utilisateur de prendre en compte l'incertitude des paramètres d'entrée d'un modèle prédictif, de même que celle liée au modèle lui-même, à travers l'utilisation de lois de distribution et d'estimer ainsi la probabilité d'occurrence d'un événement, comme l'atteinte d'un état limite.

L'objectif de ces travaux consiste à élaborer un outil regroupant plusieurs modèles et différents algorithmes. Ils permettent une prédiction aisée du temps avant l'initiation de la corrosion dans une structure. Parmi ces outils, une approche probabiliste opérant grâce à la méthode FORM (First Order Reliability Method) permet à l'utilisateur d'estimer la fiabilité structurale associée aux différents modèles de durabilité. Les parties suivantes détaillent le fonctionnement global de l'outil.

II. DONNEES D'ENTREE

La première étape de l'utilisation de l'outil consiste à entrer les données nécessaires pour faire fonctionner l'ensemble des modèles. Les paramètres accessibles par les utilisateurs de l'outil, principalement des ingénieurs en génie civil, correspondent généralement peu aux paramètres d'entrée des modèles analytiques ou numériques. Il est donc nécessaire d'intégrer dans l'outil des méthodes permettant d'estimer des données d'entrée plus complexes à partir des paramètres de formulation et environnementaux renseignés de façon systématique. Pour l'utilisateur, les paramètres d'entrée seraient ainsi :

- La composition du béton : les quantités (et les types) de ciments, d'additions minérales, de granulats, d'adjuvants et d'eau ;
- La géométrie : l'enrobage, le diamètre d'armature et le type d'acier ;
- Les conditions environnementales : les classes d'expositions [10], l'humidité relative, la température, l'exposition à la pluie et aux sels de déverglaçage.

Il reste cependant possible pour l'utilisateur, s'il en a la connaissance, de renseigner les résultats d'essais ou des données sur la microstructure permettant le fonctionnement des modèles de durabilité. Ce dernier point est détaillé dans la section suivante. La géométrie doit être obligatoirement renseignée car elle est nécessaire et ne peut pas être estimée sans mesures expérimentales.

III. PROPRIETES SPECIFIQUES

Parmi les paramètres nécessaires aux différents modèles de durabilité, il y a :

- La résistance en compression du béton ;
- Des données de composition de la matrice cimentaire, dont les quantités d'hydrates : la portlandite, les C-S-H, les monosulfoaluminates et l'ettringite
- Des propriétés de transfert : l'isotherme de désorption.
- Des indicateurs de durabilité : la porosité accessible à l'eau, la résistivité électrique
- Des grandeurs associées à la durabilité : la vitesse de carbonatation naturelle ou accélérée, le coefficient de diffusion des ions chlorure et le facteur de vieillissement associé.

Pour chacun de ces paramètres, il est donc nécessaire d'avoir une méthode d'estimation à partir des paramètres de formulation (paragraphe II).

Des modèles décrits dans la littérature ont donc été transcrits sous python et intégrés dans l'application. Parmi ceux-ci, il est possible de citer le modèle de porosité proposé par Powers [11] ainsi que le modèle d'hydratation développé par Lacarrière [12] et Kolani [13].

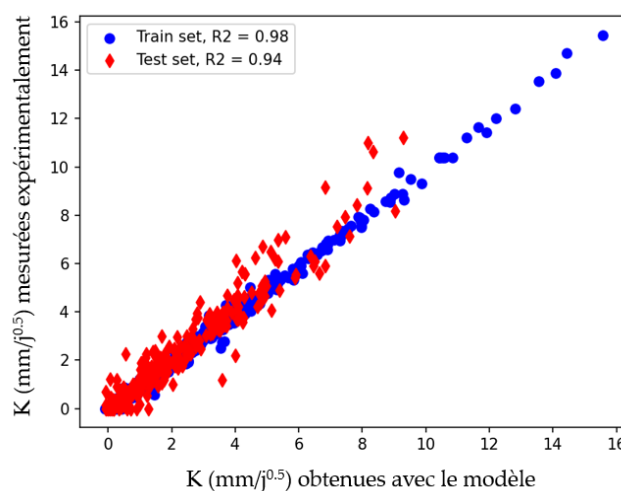


FIGURE 1. Apprentissage (points bleu) et validation (losanges rouge) d'un modèle RNA pour l'estimation de la vitesse de carbonatation.

En complément des modèles, une base de données de résultats extraits de la littérature est associée à l'application. A ce jour, cette base comporte des résultats provenant de 54 sources, soit un total de 1661 formulations de bétons pour l'ensemble des grandeurs intégrées dans l'application. Un Réseau de Neurones Artificiels (RNA) et une régression polynomiale permettent d'exploiter la base et de couvrir l'ensemble de paramètres d'entrée des modèles de durabilité (voir exemple sur la **figure 1** pour l'estimation de la vitesse de carbonatation notée K).

Une fois que l'ensemble des paramètres d'essais est obtenu, l'utilisateur peut choisir les modèles qu'il souhaite exécuter pour la réalisation des prédictions des phénomènes de dépassement et de corrosion.

IV. MODELES DE DURABILITE

Afin de vérifier les estimations du temps de dépassivation d’un ouvrage ou d’autres grandeurs liées à la durabilité, il a été choisi de mettre à la disposition de l’utilisateur un choix conséquent de modèles pour la carbonatation et la pénétration des ions chlorure. Le but est ici d’avoir une étude comparative, permettant de vérifier la cohérence entre les résultats des modèles utilisés. Pour chacun d’eux, une description est fournie à l’utilisateur afin de lui permettre de faire un choix en fonction de la situation qu’il considère. En effet, chaque modèle est développé et validé pour une ou plusieurs situations spécifiques, et son utilisation requiert de connaître son domaine de validité. Un algorithme de tri intégré à l’outil accompagne l’utilisateur lors de sa sélection en éliminant certains modèles en fonction des données de formulation et environnementales renseignées par l’utilisateur.

Dans le tableau 1 sont décrits certains des modèles intégrés à ce jour dans l’outil et définis comme utilisables pour une classe d’exposition XC4 [10] pour un béton formulé à base de CEM III/A possédant un ratio E/L de 0,5.

Les propriétés probabilisées pour chaque modèle sont résumées dans le tableau 1. Seules les valeurs moyennes des paramètres sont utilisées pour les calculs déterministes de profondeurs de carbonatation en fonction du temps présentés sur la figure 2.

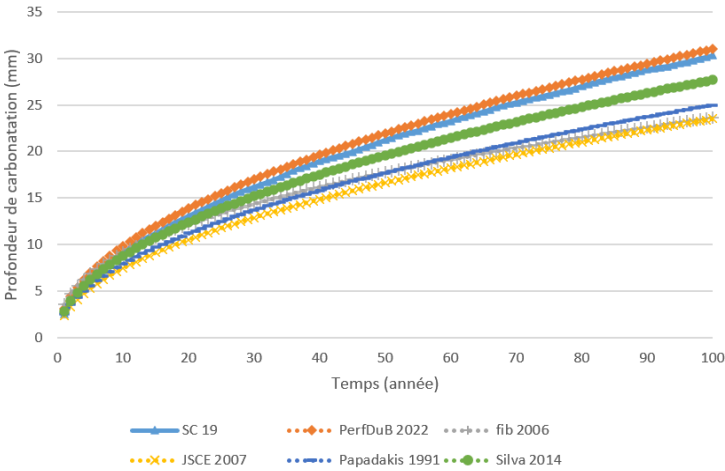


FIGURE 2. Profondeurs de carbonatation en fonction du temps estimées avec les différents modèles.

Les modèles présentés sont tous analytiques à l’exception de SDReaM-crete (SC) qui est un modèle numérique (résolution par éléments finis). Son développement fait partie des travaux de la présente thèse et fait suite à deux précédents doctorats [14, 5]. Afin de réduire le temps de calcul, un modèle de substitution est construit sur la base d’un chaos polynomial ($R^2 = 0.986$). Il est capable de considérer le couplage de la carbonatation et de la pénétration des ions chlorure, ainsi que la corrosion induite.

TABLEAU 1. Moyennes et écart-types des différents paramètres des modèles de carbonatation - μ (σ).

Paramètres	Valeurs μ (σ)	SC 2019 [5, 14]	PerfDub 2022 [8]	fib 2006 [15]	JSCE 2007 [16]	Papadakis 1991 [17]	Silva 2014 [18]
Ratio pluie (-)	0,05 (0,01)		X	X			
P _{CO2} (%)	0,04 (0,005)			X		X	X
Taux pluie forte	0,3 (0,1)			X			
HR (%)	65 (15)	X	X	X		X	
Eau (kg/m ³)	190 (10)				X		
Ciment (kg/m ³)	152 (10)				X		X
Laitier (kg/m ³)	228 (10)				X		
C ₃ S (mol/m ³)	400 (40)					X	
C ₂ S (mol/m ³)	200 (40)					X	
CH (mol/m ³)	250 (50)	X				X	
CSH (mol/m ³)	1980 (200)	X				X	
Afm (mol/m ³)	235 (25)	X					
Aft (mol/m ³)	122 (25)	X					
Porosité (-)	0,14 (0,02)	X				X	
K _{nat} (mm/an ^{0.5})	3,1 (0,5)		X	X			
f _c (MPa)	35 (2,5)						X

V. APPROCHE PROBABILISTE

La méthode FORM permet d'estimer la probabilité de défaillance (correspondant ici à la dépassement des aciers) [19]. Afin de simplifier l'étude de cas, des lois normales sont considérées pour l'ensemble des paramètres. D'autres distributions peuvent cependant être considérées dans l'application au besoin (Lognormale, Beta...).

Les résultats de cette méthode sont montrés sur la figure 3 pour le cas d'étude présenté dans la section 3. Un enrobage de 25 mm considéré avec une loi normale et un écart-type de 3 mm est choisi et correspond aux recommandations de [20] pour 50 ans. De manière générale, des valeurs critiques de fiabilité sont considérés comme seuils à ne pas dépasser [20]. Dans l'étude de cas présentée comme exemple, l'indice de fiabilité $\beta = 1,5$, qui correspond à une probabilité P_f de 6,68%, est choisi et permet de remonter à un temps de dépassement. L'indice de fiabilité est défini tel que la probabilité P_f corresponde à la densité de probabilité de β selon une loi normale centrée réduite. La figure 3 montrent une dispersion importante des résultats. Ces écarts sont certainement liés aux différences de paramètres considérés dans les modèles et de l'impact des écarts-types choisis menant à différentes dimensions stochastiques. Il est important pour l'utilisateur d'avoir la possibilité d'éliminer certains modèles non-pertinents pour les conditions choisies. Pour cette raison, la création de documentations sur l'utilisation de l'outil, donnant les domaines d'application des différents modèles de durabilité est indispensable. Une autre possibilité consiste à vérifier les résultats déterministes à un temps donné, avec par exemple des essais in-situ de mesure de front de carbonatation, pour éliminer les modèles donnant des résultats éloignés avant la réalisation de l'approche probabiliste pour l'estimation du temps avant dépassement. Les valeurs prises pour les écarts-types peuvent aussi entraîner des écarts importants et doivent donc être choisies avec précaution. L'évolution différente de la probabilité de dépassement du modèle SC 2019 est

certainement liée à un apprentissage non complet du chaos polynomial utilisé pour la création du méta-modèle sur la plage de données considérée ici. Ce point expliquerait les variations des valeurs obtenues pour des temps allant de 30 à 40 ans.

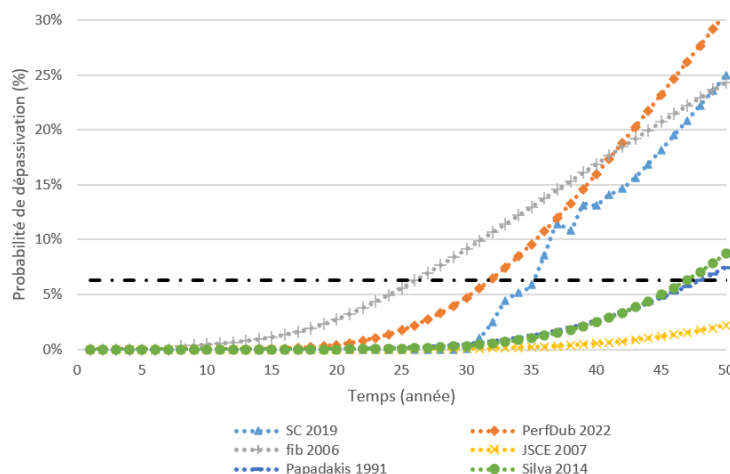


FIGURE 3. Probabilité de dépassement en fonction du temps estimée avec les différents modèles en considérant un enrobage moyen de 25 mm (FORM).

Un deuxième exemple d'application envisagée concerne l'aide à la conception d'ouvrage. En effet, il est, par exemple, possible d'estimer l'enrobage nécessaire pour garantir une fiabilité (β) de la structure pour une formulation (voir le tableau 1 pour l'exemple du béton à base de CEM III/A) et un temps donné (ici 50 ans). Des valeurs sont estimées pour le cas d'étude en considérant différentes valeurs pour β (voir le tableau 2).

Cette dernière méthode présente un intérêt, notamment dans le cadre de l'approche performantielle et pourrait permettre d'optimiser une formulation de béton en amont de la réalisation du protocole décrit par le récent fascicule FD P18-480 [21].

TABEAU 2. Valeurs d'enrobages (mm) estimées pour 50 ans et pour des indices de fiabilité β de 1,3, 1,5 et 2.

Indice de fiabilité	SC 2019	PerfDub 2022	fib 2006	JSCE 2007	Papadakis 1991	Silva 2014
$\beta = 1.3$	27	28	31	21	23	24
$\beta = 1.5$	28	30	35	22	25	25
$\beta = 2$	30	33	70	24	27	27

Enfin, cet outil propose aussi la génération automatique d'un rapport au format .word qui récapitule l'ensemble des données entrées par l'utilisateur et des résultats.

VI. CONCLUSION

Les travaux présentés ci-dessus ont plusieurs finalités. La première est opérationnelle : Ces travaux doivent permettre à des ingénieurs génie civil et des maitres d'ouvrages des gains de temps et des gains économiques. En effet, des prédictions d'indicateurs associés à la durabilité d'un ouvrage, tel

que le temps avant la dépassivation des aciers, permettent de définir les moments opportuns pour la réalisation de réparations et de maintenances [22]. La deuxième finalité de ce travail concerne l'optimisation de l'utilisation de modèles dans un contexte opérationnel. En effet, la possibilité d'employer différents modèles de façon simultanée permet de comparer une quantité importante de travaux de la littérature, à la manière d'un état de l'art. De plus, la base de résultats développée lors de ces travaux, intégrant des bétons à base de liants décarbonés ou encore de granulats de béton recyclés, dresse un premier panorama sur l'état de la littérature concernant la durabilité de ces bétons.

Aujourd'hui, la littérature ne fait pas état du développement d'outils aussi complets pour la prédiction de l'initiation de la corrosion de structures en béton armé. Le développement de cet outil présente donc un avantage technique évident de par sa nature, mais nécessite de prendre en compte de multiples modèles de durabilité intégrés ou des méthodes mathématiques pour l'obtention des données d'entrée et de sortie.

REFERENCES

- [1]. L'Hostis V, et Al., (2009) Characterization of longterm corrosion of rebars embedded in concretes sampled on French historical buildings aged from 50 to 80 year. *Materials and Corrosion*, vol.60, n°2, pp 93-98.
- [2] Tuuti K, (1982) Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- [3]. Bullard, J., Jennings, et Al. (2011), Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41(12), pp.1208-1223.
- [4] M. Pourbaix (1966), « Atlas of Electrochemical Equilibrium in Aqueous Solutions », Pergamon Press.
- [5] J. Mai-Nhu (2013), Corrosion des armatures du béton : couplage carbonation/chlorures en présence de cycles hydriques, *Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse III*.
- [6] M.D.A. Thomas, P.B. Bamforth (1999), Modelling chloride diffusion in concrete Effect of fly ash and slag, *Cement and Concrete Research* 29 pp487-495.
- [7]. Turcry P, Oksri-Nelfia L, Younsi A, Ait Moktar A, (2014), Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning. *Cement and Concrete Research*, 57, pp 70-78.
- [8] M. Carcassès, F. Cussigh, F. Toutlemonde (2021), PerfDuB, Définition de seuils de performance en fonction des classes d'exposition, Rapport de synthèse/livraison GT2B.
- [9] E. Bastidas-Arteaga (2010), Contribution for sustainable management of reinforced concrete structures subjected to chloride penetration, PhD thesis, Nantes university.
- [10] AFNOR (2022), Béton – spécification, performance, production et conformité – complément national à la norme NF EN 206, NF EN 206/CN.

- [11] T. Powers, L. Copeland, J. Hayes, H. Mann (1954), Permeability of Portland cement past, *Journal of American Concrete Institute*, 51, pp285-298.
- [12] L., Buffo-Lacarière (2007), « Prévion et évaluation de la fissuration précoce des ouvrages en béton », *thèse de doctorat de l'université de Toulouse*, INSA, LMDC.
- [13] B., Kolani (2012), Comportement au jeune âge des structures en béton armé à base de liants composés aux laitiers, *thèse de doctorat*, Université de Toulouse.
- [14] Schmitt L, (2019), Durabilité des ouvrages en béton soumis à la corrosion : optimisation par une approche probabiliste. PhD, LMDC Toulouse, France.
- [15] Fib model code (2006), Model code for service life design, fib bulletin N°34.
- [16] JSCE. (2007). Standard Specification for Concrete Structures – 2007 (Maintenance). Japan Society of Civil Engineers.
- [17] V. Papadakis, C. Vayenas, M. Fardis (1991), Durability of building materials and components, chapter Fundamental concrete carbonation model and application to durability of reinforced concrete, pp. 27-38.
- [18] A., Silva, R., Neves, J., De Brito (2014). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 50, pp73-81. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.12.001
- [19] M. Broniatowski, K.G. Hermann (2014), Méthodes Form et Sorm. <hal-00966695v2>.
- [20] Eurocodes 2 – norme NF EN 1992-2 (2015). Calcul des structures en béton Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments, 2005 et Annexe Nationale à la NF EN 1992-1-1:2005.
- [21] AFNOR (2022), Béton – Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, FD P18-480, ISSN 0335-3931.
- [22] *fib Bulletin 44* (2008): Concrete structure management : Guide to ownership and good practice guide to good practice, ISBN 978-2-88394-084-0.