
Modélisation de la durabilité des ouvrages béton : couplage carbonatation/chlorure

Schmitt Lucie^{1,2}

¹Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135 Avenue de Rangueil, F-31 077, FRANCE

²Cerib (Centre d'Etude et de Recherches de l'Industrie du Béton) 1 rue des longs réages 28233 Epernon Cedex, l.schmitt@cerib.com

RÉSUMÉ. La maîtrise et l'optimisation de la durabilité des structures en béton ainsi que la maintenance des ouvrages en béton existants constituent un enjeu important pour l'ensemble des acteurs de la profession. Un plan expérimental a été mis en place afin de caractériser les propriétés hydriques de quatre bétons ainsi que leur comportement vis-à-vis de la corrosion des armatures. Les propriétés discutées dans cet article sont la carbonatation et la désorption. Ces résultats vont conduire à l'optimisation et l'amélioration du modèle de durabilité SDReaM-crete développé par le Cerib et le LMDC. Ce modèle permet de simuler la carbonatation, la migration des ions chlorure mais aussi le couplage des deux phénomènes. Il est capable de modéliser le phénomène de dépassivation et la corrosion des armatures en tenant compte des cycles hydriques. Ce travail a pour but d'optimiser les épaisseurs d'enrobage lors de la conception d'ouvrage et de faciliter la maintenance des ouvrages existants. Cet article décrit le modèle SDReaM-crete ainsi que ses récentes améliorations. Les résultats expérimentaux obtenus sur les bétons étudiés sont présentés ainsi que des simulations réalisées avec SDReaM-crete.

ABSTRACT. Mastering and optimizing the durability of concrete structures and also the rehabilitation of concrete structures is a major challenge for all actors of the concrete construction field. An experimental program is conducted to get a characterization of the sorption properties of four concretes and their performances towards the main aggressive environments for the reinforcement corrosion. The evaluated durability properties are water absorption and carbonation. The project achievements are used to optimize and improve the durability model SDReaM-crete developed by Cerib and LMDC. This model can simulate the migration of chlorides, the combination of this migration with the mechanism of carbonation and the corrosion of reinforcing bars according to wetting-drying cycles. Finally, the present work aims to optimize the sizing of the cover thickness for new structures and to facilitate the lifespan prediction for existing structures. This paper describes the model SDReaM-crete and its recent improvements. Some experimental results and some interpretations as well as simulations made with SDReaM-crete are also presented.

MOTS-CLÉS : Béton, corrosion, modélisation, durabilité, enrobage.

KEY WORDS : Concrete, corrosion, modelling, durability, concrete cover.

1. Introduction

La maîtrise et l'optimisation de la durabilité des structures en béton et des produits préfabriqués constituent un enjeu particulièrement important pour l'ensemble des acteurs de la profession. La corrosion des armatures du béton, due principalement à la carbonatation et/ou à la pénétration des ions chlorure est la première cause de perte de durabilité. De nombreuses recherches ont déjà été menées et sont encore en cours pour étudier et modéliser la carbonatation et la pénétration des ions chlorure dans le béton ainsi que la propagation de la corrosion [DUR 00][BAR04][AND 93]. Plusieurs auteurs ont montré que les produits de corrosion se développent en deux couches dont les propriétés ont pour chacune une influence particulière sur la vitesse de corrosion [LHO 09][CHI 05]. Dans sa thèse, Mai-Nhu [MAI 13] a développé un modèle de durabilité (SDReaM-crete) qui prend en compte le couplage entre la carbonatation et la pénétration des ions chlorure, les phénomènes de transferts hydriques ainsi que le transfert d'oxygène. Ce modèle est capable également de calculer la probabilité de dépassivation de l'armature due à la baisse du pH ou à la quantité d'ions chlorure ainsi que l'initiation de la corrosion.

Ce travail a pour but de développer SDReaM-crete en introduisant la modélisation de la double couche de produits de corrosion et d'étendre le domaine d'application du modèle aux bétons incorporant des liants composés. Pour répondre à ces objectifs, une campagne expérimentale a été mise en place pour caractériser les

propriétés de durabilité de quatre bétons. Cet article présente quelques résultats obtenus sur les bétons de l'étude, les récentes améliorations du modèle ainsi que des résultats de simulation réalisées avec SDRaM-crete.

2. Présentation du modèle

2.1. La pénétration des ions chlorure

Les armatures d'un béton sain sont naturellement protégées dans la matrice cimentaire par une couche passive d'oxydes. Lorsque les ions chlorure atteignent l'armature en quantité suffisante, les aciers sont dépassivés et la corrosion peut s'initier dans certaines conditions (oxygène disponible à la cathode et humidité suffisamment élevée). La concentration critique (appelée C_{crit}) en ions chlorure nécessaire pour dépassiver les armatures varie selon la littérature [ANG 09] de 0,1 % (masse liant) à 8,34 % (masse liant). En présence de cycles hydriques (marnage) les ions chlorure pénètrent dans la matrice cimentaire à la fois par convection et par diffusion. La combinaison de ces deux phénomènes conduit à une pénétration plus rapide des chlorures dans la matrice cimentaire. Tout comme pour la carbonatation, les mouvements d'eau ainsi que le taux de saturation du béton jouent un rôle majeur dans le mécanisme de pénétration des ions chlorure.

La diffusion des ions chlorure dans la phase aqueuse est décrite par l'équation de conservation :

$$\phi Sr (\partial[Cl^-]/\partial t) = -\text{div}(\Phi_{Cl^-}) - \beta_{C-S-H} - \beta_{FS} + \beta_{FSCarbo} \quad [1]$$

Où β_{C-S-H} et β_{SF} sont respectivement les facteurs qui prennent en compte la fixation physique des ions chlorure aux C-S-H et la fixation chimique aux Afm pour former des sels de Friedel. $\beta_{FSCarbo}$ est un terme source qui prend en compte la carbonatation des sels de Friedel à l'origine du relargage possible d'ions chlorure dans la solution interstitielle. La carbonatation des C-S-H et des Afm est aussi prise en compte dans le modèle : la capacité de fixation de ces hydrates étant fortement réduite lorsqu'ils sont carbonatés [WAN 12].

Le flux d'ions chlorure peut être décrit comme l'addition d'une partie diffusive et d'une partie convective (avec le mouvement de l'eau) :

$$\Phi_{Cl^-} = -D_{Cl^-} \text{grad}[Cl^-] + \Phi_{\text{water}} [Cl^-] \quad [2]$$

Où D_{Cl^-} varie avec le taux de saturation en eau du béton de la même manière que le coefficient de diffusion des ions carbonate [5].

2.2. Carbonatation

Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère sous forme gazeuse pénètre dans le réseau poreux du béton soit par l'intermédiaire de la phase liquide soit par l'intermédiaire de la phase gazeuse. Une fois dissout dans solution interstitielle du béton il réagit avec les hydrates pour former de la calcite. En consommant la réserve de basicité constituée par la portlandite, le processus de carbonatation a notamment pour effet d'abaisser le pH aux environs de 8,5 et de favoriser la dépassivation et la corrosion des armatures. La vitesse de carbonatation dépend de paramètres matériaux comme la porosité ou encore la quantité d'hydrates de la matrice cimentaire, ainsi que de paramètres environnementaux. En effet, le taux de saturation en eau des pores du béton joue un rôle très important sur la vitesse de carbonatation qui est maximale lorsque l'humidité relative de l'air est comprise entre 55 et 80 %.

On considère le transport du CO_2 gazeux et la convection des ions carbonate dans l'eau liquide. Le CO_2 est soluble dans l'eau sous forme d'acide carbonique puis d'ions carbonate dont la concentration s'écrit :

$$[CO_3^{2-}] = Q_1 (P_{CO_2}/RT) \quad [3]$$

Où Q_1 est une fonction qui dépend du pH, des constantes d'équilibre de formation des carbonates et des bicarbonates et de la constante d'équilibre de dissolution du CO_2 dans l'eau. P_{CO_2} est la pression partielle de CO_2 dans l'atmosphère (Pa), T représente la température (K) et R la constante des gaz parfait (J/mol/K).

Le transport des ions carbonate en phase liquide est modélisé en considérant l'équation de conservation :

$$\phi Sr (\partial[CO_3^{2-}]/\partial t) = -\text{div}(\Phi_{CO_3^{2-}}) - \beta_{CaCO_3} + \beta_{CO_3^{2-}} \quad [4]$$

Où les facteurs β_x prennent en compte la réaction entre les calciums des hydrates et les ions carbonate, ϕ représente la porosité et Sr le taux de saturation.

Le flux des ions carbonate peut être décrit de la même manière que celui des ions chlorure :

$$\Phi_{CO_3^{2-}} = -D_{CO_3^{2-}} (Sr=1) R_{dl} \text{grad}[CO_3^{2-}] + \Phi_{\text{water}} [CO_3^{2-}] \quad [5]$$

Où $D_{CO_3^{2-}(Sr=1)}$ représente le coefficient de diffusion des carbonates dans la phase liquide, R_{dl} est le coefficient de résistance à la diffusion des ions dans les milieux poreux (il dépend du taux de saturation) et Φ_{water} représente la vitesse de l'eau.

Dans ses travaux Hyvert [HYV 09] a montré que la vitesse de carbonatation des C-S-H est moins rapide que celles des autres hydrates. Cette particularité est intégrée dans l'expression de la cinétique de formation de la calcite en fonction de la concentration en ions carbonate et en hydrates, par l'exposant n inférieur à l'unité :

$$\beta_{CaCO_3} = (1/\tau_2) [CO_3^{2-}] ([Ca_{CH}] + [Ca_{Afm}] + [Ca_{Aft}] + [Ca_{FS}]) + (1/\tau_2) [CO_3^{2-}]^n [Ca_{C-S-H}] \quad [6]$$

L'équation [6] prend en compte le calcium présent dans les sels de Friedel. La carbonatation des sels de Friedel est le premier élément du couplage entre la carbonatation et la pénétration des ions chlorure. Ce modèle prend aussi en compte la variation de la porosité due au phénomène de carbonatation des hydrates et peut estimer le pH de la solution interstitielle.

2.3. Transferts hydriques

Le taux de saturation en eau du béton et les mouvements d'eau ayant une importance conséquente sur la carbonatation de la matrice cimentaire et sur la pénétration des ions chlorure il est indispensable de les prendre en compte pour évaluer la durabilité des bétons. Les transferts hydriques sont modélisés avec une équation de conservation de masse proposée par Ranavomanana [RAN 10] :

$$[\rho_l \varphi (\partial Sr / \partial h) + p_{vsat} (M_{H_2O} / RT) \varphi (1 - Sr - h (\partial Sr / \partial h))] (\partial h / \partial t) = \text{div} (\rho_l^2 (k_l / \eta^l) k_{rl} p_{vsat} (RT / M_{H_2O}) (1/h) \text{grad} h) + (M_{H_2O} / RT) R_d D \text{grad} h + \beta_{H_2O} \quad [7]$$

Où β_{H_2O} est un terme source qui prend en compte la libération d'eau due à la carbonatation de la portlandite.

2.4. Dépassivation

Dans le modèle SDReaM-crete, la dépassivation est probabilisée à partir du pH et de la quantité d'ions chlorure libres présents au niveau de l'armature (figure 1).

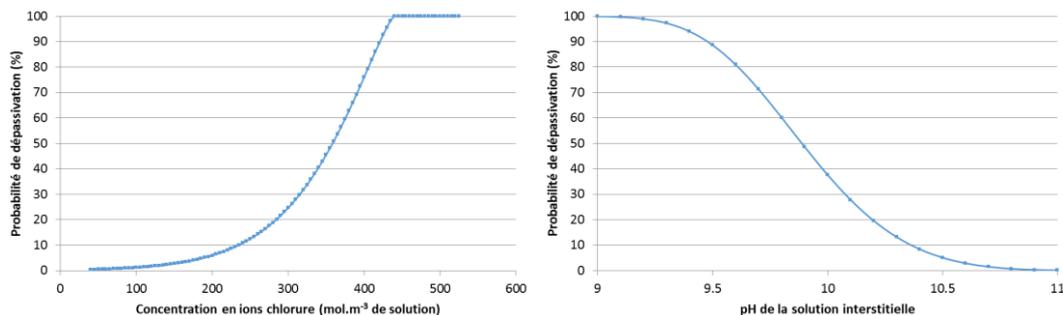


Figure 1. Evolution de la probabilité de dépassivation en fonction du pH de la solution interstitielle (à droite) et de la concentration en ions chlorure (à gauche) au voisinage des armatures.

On obtient alors des probabilités de dépassivation notées H^{Cl^-} et H^{pH} dans lesquelles la concentration en ions chlorure et le pH sont des variables aléatoires.

La fonction H [8] sera prise en compte dans le développement des produits de corrosion (paragraphe 3) :

$$H = \max (H^{pH}, H^{Cl^-}) \quad [8]$$

Cette expression de l'évolution de l'état de dépassivation tranche avec l'idée qu'il existe une concentration critique unique en ions chlorure à partir de laquelle on considère que les armatures sont dépassivées. Elle permet de prendre en compte le retour d'expérience, les observations réalisées sur des ouvrages réels et des expérimentations en laboratoire qui mettent en évidence les causes multifactorielles de la dépassivation des armatures (diminution du pH, qualité de l'interface béton/acier, défaut de surface sur l'armature, qualité du béton d'enrobage...), la concentration élevée en ions chlorure jouant un rôle « catalyseur » dans le processus de dépassivation des armatures.

3. Modélisation de la double couche de produits de corrosion

Dans leurs travaux, Chitty et L'Hostis [CHI 05] [LHO 09] ont montré que les produits de corrosion sont divisés en deux couches qui possèdent chacune des propriétés différentes. La première couche, en contact direct

avec l'armature, est appelée couche de produits denses, à la fois stable et de faible porosité. La seconde est la couche de rouilles vertes, instable et très poreuse. Elle est située entre la couche de produits denses et la matrice cimentaire (figure 2).

Lorsque la corrosion s'initie, la couche instable se forme puis réagit pour former la couche de produits denses d'une part et migre dans la matrice cimentaire d'autre part. Nguyen et al. [NGU 15] proposent un modèle qui considère ces deux couches de produits de corrosion et l'interaction entre elles en fonction de leurs propriétés.

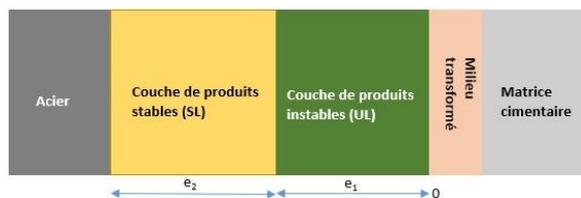


Figure 2. Représentation schématique des deux couches de produits de corrosion.

La couche instable (dénommée UL) est réactive vis-à-vis de l'oxygène. La consommation d'oxygène dans cette couche dépend donc de sa porosité (ϕ_{UL}), de la surface spécifique de ses pores (s_{UL}) et d'une constante cinétique (k_{UL}) :

$$(d[O_2]/dt) = D_{UL} \text{div}(\text{grad}[O_2]_i) - k_{UL} s_{UL} \phi_{UL} [O_2]_i = 0 \quad [9]$$

La couche stable (dénommée SL) n'est pas réactive vis-à-vis de l'oxygène, le transport est uniquement diffusif dans cette couche :

$$(d[O_2]/dt) = D_{SL} \text{div}(\text{grad}[O_2]_i) = 0 \quad [10]$$

Où D_{UL} et D_{SL} sont respectivement les coefficients de diffusion de l'oxygène dans les couches non stable et stable. On considère que l'on est en régime permanent car l'épaisseur du béton est très grande devant l'épaisseur des produits de corrosion formés.

Pour la résolution des équations [9] et [10], deux hypothèses sont avancées :

- L'oxygène ne peut pas pénétrer dans l'acier donc le flux d'oxygène à $x = e_2$ est nul.
- Il y a continuité entre les deux couches.

Les concentrations en oxygène dans les couches instables ($x = [0, e_1]$) et stables ($x = [e_1, e_2]$) sont données par les équations [11] et [12] :

$$[O_2]_{UL} = [O_2]_{out} \cosh(x/\lambda_{UL}) + \gamma \lambda_{UL} [O_2]_{out} \sinh(x/\lambda_{UL}) \quad [11]$$

$$[O_2]_{SL} = [O_2]_{out} [(e_2/\lambda_{UL}) \sinh(e_1/\lambda_{UL}) + e_2 \gamma \cosh(e_1/\lambda_{UL}) + \cosh(e_1/\lambda_{UL}) + \gamma \lambda_{UL} \sinh(e_1/\lambda_{UL})] \quad [12]$$

Où λ_{UL} est une constante qui dépend de D_{UL} , k_{UL} et s_{UL} et γ une fonction qui dépend de λ_{UL} , e_1 , e_2 et D_{SL} .

À l'interface entre les produits de corrosion et l'acier ($x = e_2$), le flux d'oxygène dépend de la concentration en oxygène de manière linéaire :

$$W_{O_2,SL} = k_{SL} S_r \phi_{SL} (RT/K_H) [O_2]_{SL} \quad [13]$$

Où est k_{SL} une constante cinétique et K_H la constante de Henry.

L'oxygène est consommé dans la couche de produits instables donc la quantité d'oxygène réduite dans cette couche peut être calculée en intégrant le terme puit de l'équation 11 :

$$W_{O_2,UL} = k_{UL} S_r \phi_{UL} (RT/K_H) \int_0^{e_1} [O_2]_{UL}(x) dx \quad [14]$$

Enfin, la croissance des produits de corrosion peut être calculée en se basant sur les travaux de Huet et Chitty [HUE 07] [CHI 08]. La formation de la couche de produits denses dépend de la transformation des rouilles vertes en produits stables et de la quantité d'oxygène disponible :

$$\Delta e_{SL} = H (4/3) (M_{Fe}/\rho_{Fe}) W_{O_2,SL} \Delta t \quad [15]$$

La croissance de la couche de produits non stables dépend de la quantité d'oxygène qui provient de l'extérieur et de la transformation des produits non stables en produits stables. De plus, une partie des produits non stables migrent vers la matrice cimentaire (définie par le facteur α_{MT}).

$$\Delta e_{UL} = H (4/3) (M_{Fe}/\rho_{Fe}) [W_{O2,UL} (1 - \alpha_{MT}) - W_{O2,SL}] \Delta t \quad [16]$$

Dans [15] et [16], H représente la probabilité de dépassivation de l'armature [8]. L'épaisseur de produits de corrosion est ensuite la somme de l'épaisseur de la couche stable et de la couche non stable [15] et [16].

4. Résultats expérimentaux et application du modèle SDReaM-crete

4.1. Formulation des bétons

Les formulations des bétons de l'étude sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1. Composition des bétons étudiés.

Constituants	Unités	F1	F2	F4	F5
CEM I 52.5 N	kg/m ³	324	242	404	309
Filler calcaire		39	10	64	10
Laitier de haut fourneau		0	124	0	129
Sable 0/4		942	931	937	923
Gravillons 4/8		770	762	767	755
Eau efficace	l/m ³	198	200	162	168
Liant total	kg/m ³	363	376	468	448
E_{eff}/L_{tot}	-	0,55	0,53	0,35	0,38

Les éprouvettes sont démoulées après 24 heures, puis soumises à une cure endogène (48 heures dans de l'aluminium et un sac plastique). Elles sont ensuite stockées dans un laboratoire à 20 °C et 50 % HR jusqu'à l'échéance de l'essai (90 jours).

4.2. Essais et résultats

4.2.1. Sorption/désorption

L'essai de sorption/désorption a été réalisé selon le mode opératoire décrit dans la norme [ISO 13]. Le résultat est la moyenne sur trois échantillons. Dans cet article, seule la désorption est discutée car c'est l'isotherme qui est utilisée dans SDReaM-crete. L'obtention des résultats de l'essai de sorption/désorption peut prendre plusieurs semaines voire plusieurs mois. Comme cette propriété est indispensable à la bonne modélisation des phénomènes de transfert (hydriques, de CO₂, de chlorures) dans les bétons, une méthode est développée pour faciliter la modélisation de l'isotherme de désorption.

Une isotherme de référence est choisie parmi les résultats obtenus (F2 en l'occurrence) et une homothétie $g(h, \mathcal{E})$ est appliquée à cette isotherme :

$$Sr(h) = Sr_{(ref)}(h) g(h, \mathcal{E}) \quad [17]$$

$$g(h, \mathcal{E}) = h + (1 - h) [(Sr_{(ref)}(0,5) + \Delta Sr \mathcal{E}) / Sr_{(ref)}(0,5)] \quad [18]$$

Où ΔSr représente la variation de l'isotherme autour de l'isotherme de référence (égal à 0,17), $Sr_{(ref)}(0,5)$ le taux de saturation en eau du béton lorsque l'humidité relative HR vaut 50 %. \mathcal{E} représente la direction de la variation de l'isotherme et est compris entre -1 et 1.

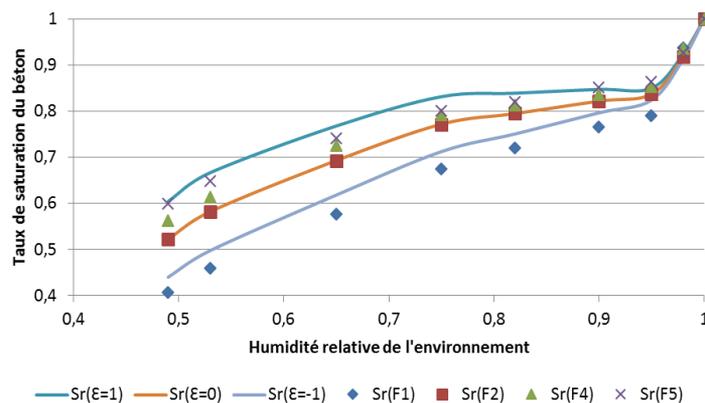


Figure 3. Résultats de l'essai de désorption et simulation d'isothermes à l'aide de l'homothétie.

4.2.2. Essai de carbonatation accélérée

L'essai de carbonatation accéléré a été réalisé selon le mode opératoire décrit dans [CAR 12]. Le résultat est la moyenne de trois échantillons. Les conditions environnementales de l'essai sont présentées dans la figure 4.

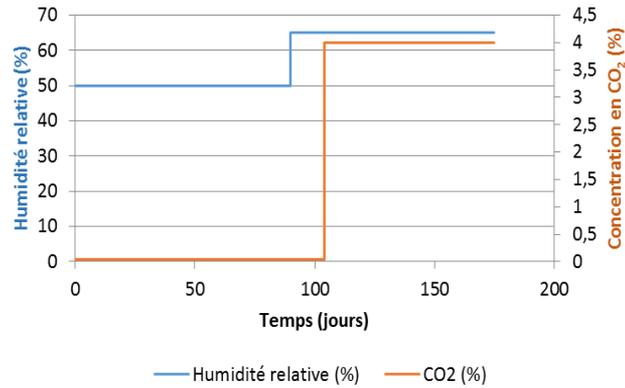


Figure 4. Conditions environnementales de la vie des bétons entre le démoulage et la fin de l'essai de carbonatation accélérée.

Les résultats obtenus lors de cet essai sont utilisés pour évaluer la validité du modèle SDReaM-crete sur tous types de bétons (compacts ou non, ciment portland ou composé). Pour la modélisation, les conditions environnementales retenues sont celles présentées sur la figure 4 et les données d'entrée matériaux sont celles données dans le tableau 1. Les résultats des simulations sont présentés sur la figure 6.

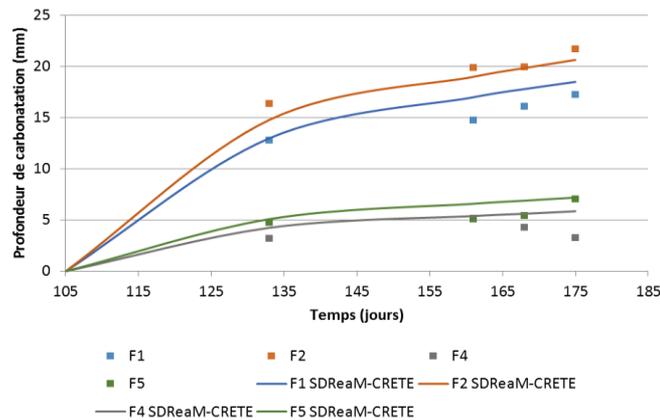


Figure 5. Résultats de la simulation des essais accélérés de carbonatation.

Les profondeurs de carbonatation obtenues avec SDReaM-crete correspondent à un pH du béton égal à 9. La figure 5 montre que le modèle reproduit de manière fidèle le comportement des bétons vis-à-vis du phénomène de carbonatation quel que soit le type de béton modélisé. Les résultats de la modélisation sont proches des résultats obtenus lors de l'essai accéléré.

4.2.3. Exemple de cas concret

Un des objectifs de SDReaM-crete est d'appuyer non seulement les acteurs de l'industrie du béton mais également les gestionnaires d'ouvrages dans le dimensionnement des enrobages et dans la prédiction de la durée de vie résiduelle des ouvrages existants. Pour cela, le modèle prend en compte les conditions environnementales réelles dans lesquelles peuvent se trouver les ouvrages en béton. Ce paragraphe présente deux exemples de simulations réalisées avec SDReaM-crete. Le béton simulé est le béton F1 (tableau 1), la durée de vie est de 50 ans et le taux de CO₂ retenu est celui de l'air soit 0,04 %. L'humidité relative est considérée comme variable (75 ± 10) % sur un an et ce cycle est répété 50 fois. L'enrobage $C_{\min, \text{dur}}$ est égal à 30 mm conformément à la classe S4 de l'Eurocode 2 [EUR] pour une classe de d'exposition XC4 et pour 50 ans. La figure 7 montre la profondeur de carbonatation donnée par SDReaM-crete pour cette simulation.

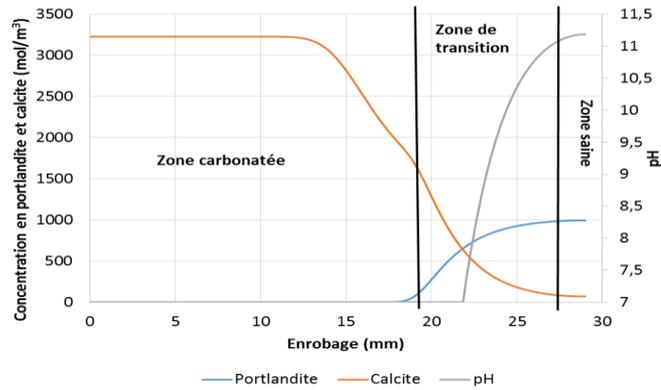


Figure 6. Profondeur de carbonatation obtenue avec SDRaM-crete après 50 ans d'exposition.

On peut voir sur la figure 6 que la portlandite, la calcite et le pH traduisent la même information c'est-à-dire la profondeur de carbonatation du béton d'enrobage. Dans sa thèse Drouet [DRO 10] a montré que la carbonatation n'est pas un phénomène instantané mais progressif. SDRaM-crete reproduit ce phénomène que l'on voit sur la figure 6 : trois zones distinctes.

Les résultats obtenus lors de la première simulation montrent qu'en respectant l'enrobage préconisé par les Eurocodes [EUR] la carbonatation n'atteint pas le premier lit d'armature durant les 50 premières années.

Imaginons un deuxième cas concret dans lequel on considère un enrobage minimal $C_{min,dur}$ de 22 mm (qui ne respecte pas les Eurocodes [EUR]).

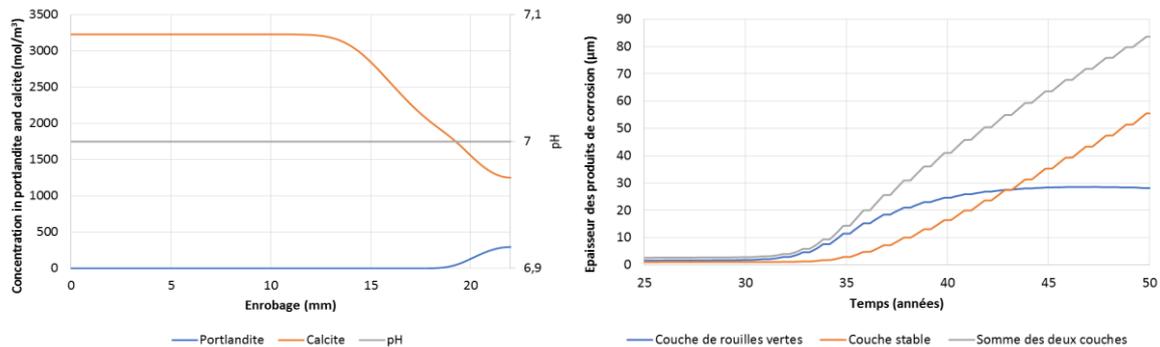


Figure 7. Résultats de la simulation dans le cas d'un enrobage minimal $C_{min,dur}$ de 22 mm, à gauche la profondeur de carbonatation à 50 ans, à droite la croissance des produits de corrosion.

La figure 7 (gauche) montre que la carbonatation a atteint les armatures avant la durée de vie visée de 50 ans ce qui conduit à la dépassement des armatures. La figure 7 (droite) montre que les conditions sont réunies pour que la corrosion puisse s'initier et se propager. En effet, l'humidité relative variable permet à la fois à l'eau et à l'oxygène d'avoir accès à l'armature de manière alternée. Cette alternance est mise en évidence par la forme en escalier de la figure 7 (droite) qui montre que la corrosion progresse uniquement lorsque toutes les conditions sont réunies. De plus dans cette figure on remarque que les rouilles vertes se développent d'abord avant de réagir pour former la couche de produits stables. Ensuite, la croissance de la couche de produits instables ralentit du fait de la progression de la couche stable qui empêche l'accès de l'oxygène à l'armature de par sa faible porosité.

5. Conclusion

Mai-Nhu [MAI 13] a développé un modèle capable de simuler la durabilité des bétons en couplant les phénomènes de carbonatation, de pénétration des ions chlorure et de mouvements d'eau ainsi que la dépassement des armatures. Le travail présenté dans cet article a permis d'optimiser le modèle SDRaM-crete notamment en introduisant la modélisation de la propagation de la corrosion et de la double couche de produits de corrosion, en permettant la prise en compte de l'isotherme de désorption la plupart des bétons de manière

simple. La validité de SDReaM-crete lorsque les bétons contiennent des ciments composés a également été vérifiée.

Les résultats obtenus avec ce modèle ainsi que ses récentes améliorations montrent que SDReaM-crete peut être utilisé pour prédire des durées de vie résiduelles d'ouvrage mais aussi pour dimensionner des nouvelles structures en définissant des couples « bétons/enrobages » optimum. Une perspective immédiate de ce travail sera de comparer les résultats de simulations obtenus avec SDReaM-crete à des résultats expérimentaux de pénétration des ions chlorure dans le béton. Une analyse de sensibilité est également en cours pour évaluer l'impact des paramètres d'entrée sur les résultats du modèle et pour ensuite aboutir à un modèle simplifié.

6. Bibliographie

- [AND 93] ANDRADE C., « Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements », *Cement and Concrete Research*, vol. 23, 1993, p. 724-742.
- [BAR 04] BARY B., SELLIER A., « Coupled moisture-carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 2004, p. 1859-1872.
- [CAR 12] prCEN/TS 12390-12, *Testing hardened concrete – determination of the relative carbonation resistance of concrete*, 2012.
- [CHI 05] CHITTY W.J., DILLMAN P., L'HOSTIS V., LOMBARD C., « Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete - a study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts », *Corrosion Science*, vol. 47, 2005, p. 1555-1581.
- [CHI 08] CHITTY W.J., DILLMAN P., L'HOSTIS V., MILLARD A., « Use of ferrous archaeological artefacts as analogous systems and feedback tools for rebar embedded in concrete - an analytical corrosion modelling », *Corrosion Science*, vol. 50, 2008, p. 3047-3055.
- [DRO 10] Drouet E., « Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires – prise en compte des transferts hydriques », Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2010.
- [DUR 00] DuraCrete, *General guidelines for durability design and redesign*, Research project No. BE95-1347: Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures, Document R 15: 109, 2000.
- [EUR] Eurocodes, *NF EN 1990 à NF EN 1999*, AFNOR.
- [HUE 07] HUET B., L'HOSTIS V., SANTARINI G., FERON D., IDRISSE H., « Steel corrosion in concrete: determinist modeling of cathodic reaction as a function of water saturation degree », *Corrosion Science*, vol. 49, 2007, p. 1918-1932.
- [HYV 09] HYVERT N., *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [ISO 13] NF EN ISO 12571, *Performance hygrométrique des matériaux et produits pour le bâtiment – détermination des propriétés de sorption hygroscopique*, AFNOR, 2013.
- [LHO 09] L'HOSTIS V., NEFF D., BELLOT-GURLET L., DILLMAN P., « Characterization of long-term corrosion of rebars embedded in concretes sampled on French historical buildings aged from 50 to 80 years », *Materials and Corrosion*, vol. 60 (2) 2009.
- [MAI 13] MAI-NHU J., *Corrosion des armatures du béton : couplage carbonatation chlorures en présence de cycles hydriques*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2013.
- [NGU 15] NGUYEN, T.T.H., BARY, B., DE LARRARD, T., « Coupled carbonation-rust formation-damage modeling and simulation of steel corrosion in 3D mesoscale reinforced concrete », *Cement and concrete research*, vol. 74, 2015, P. 95-107.
- [RAN 10] RANAIVOMANANA, H., *Transferts dans les milieux poreux réactifs non saturés : application à la cicatrisation de fissure dans les matériaux cimentaires par carbonatation*, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2010.
- [WAN 12] WANG X., *Modélisation du transport multi-espèces dans les matériaux cimentaires saturés ou non saturés et éventuellement carbonatés*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2012.