
Prédiction de la durée de vie du béton soumis à des sollicitations couplées carbonatation-chlorures.

Achour Mohamad^{1,2}, Amiri Ouali², Bignonnet François², Rozière Emmanuel¹

¹ Ecole centrale de Nantes, GeM, Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique, France

1 Rue de la Noë, 44321 Nantes mohamad.achour@eleves.ec-nantes.fr – emmanuel.roziere@ec-nantes.fr

² Université de Nantes, GeM, Institut de recherche en Génie Civil et Mécanique, France

1 Quai de Tourville, 44035 Nantes ouali.amiri@univ-nantes.fr – francois.bignonnet@univ-nantes.fr

RÉSUMÉ. L'attaque des chlorures et la carbonatation sont les mécanismes prédominants régissant la durée de vie des structures en béton armé. Afin d'évaluer la durée de vie de ces structures contre la pénétration du dioxyde de carbone, des ions chlorures et de l'humidité, un modèle physico-chimique est proposé. Le modèle est développé en prenant en compte le transfert multi-espèces d'ions agressifs, y compris la diffusion, la migration, l'activité chimique des ions, l'interaction entre les ions chlorures et la pâte cimentaire et la convection en fonction des conditions d'exposition. L'évolution de la microstructure due aux réactions de précipitation et de dissolution pendant le processus de carbonatation est pris en compte en suivant l'évolution de la porosité. Plusieurs applications du modèle sont développées pour prédire la durée de vie d'un béton poreux soumis à un environnement agressif contenant d'ions chlorures, du dioxyde de carbone et d'humidité. Les effets de la carbonatation et de la convection sur l'estimation du béton d'enrobage sont soulignés et analysés. Ensuite, le modèle numérique est comparé à un ensemble de résultats expérimentaux.

MOTS-CLÉS : Mécanismes de dégradation, Carbonatation, Transfert multi-espèces, Humidité, Duré de vie.

ABSTRACT. Chloride attack and carbonation are the predominant degradation mechanisms governing the service-life of reinforced concrete structures. In order to evaluate the service-life of these structures against the penetration of carbon dioxide, chloride ions and moisture, a physico-chemical model is proposed. The model is developed by taking into account multi-species transfer of aggressive ions, including diffusion, migration, chemical activity of ions, interaction between chloride ions and cement paste of concrete and convection due to the exposure conditions. The microstructure evolution due to the precipitation and the dissolution reactions during the carbonation process is taken into account by following the evolution of the porosity. Several applications of the numerical model are developed by predicting the service-life of a porous concrete specimen exposed to an aggressive environment containing chloride, carbon dioxide and moisture. The effects of carbonation and convection on the estimation of the concrete cover are emphasised and analysed. Next, the numerical model is compared to a set of experimental results.

KEY WORDS: Degradation mechanisms, Carbonation, Multi-species transfer, Moisture, Service-life.

1. Introduction

La durée de vie des ouvrages de génie civil est un facteur très important de point de vue économique et environnemental. Ces ouvrages sont des matériaux poreux qui peuvent être soumis à l'action des agents agressifs responsables de la corrosion des armatures qui est l'une des principales causes de détérioration des ouvrages en béton armé. L'objectif de cette étude est de fournir une modélisation physico-chimique permettant de quantifier l'évolution de la microstructure due aux réactions de précipitation et de dissolution lors du couplage carbonatation-chlorures en tenant compte de l'effet des cycles d'humidification et de séchage.

Beaucoup des travaux considèrent dans leurs modèles le transfert d'ions chlorures seulement [PHU 2016], [NIE 2003] et d'autres considèrent le transfert de dioxyde de carbone seulement [VIL 2006], [BAR 2004]. Cependant peu de travaux étudient le couplage entre ces 2 phénomènes [LIU 2014], [MAI 2013] en simplifiant l'équation de transfert ionique. L'objectif de ce travail est alors de développer un modèle multi-espèces qui étudie les mécanismes de transport d'ions dans les milieux poreux en tenant compte de l'effet des interactions électrostatiques et l'activité chimique entre les ions [HUC 1923], la convection et les interactions entre les ions chlorures et la matrice cimentaire. Ce modèle permet d'étudier l'effet de la carbonatation sur le transfert des chlorures dans le but d'affiner les prédictions de la durée de vie du béton et en fonction du béton d'enrobage.

2. Modélisation numérique

2.1 Transfert ionique

Le transfert des ions dans la solution interstitielle est modélisé par l'équation de Nernst Planck:

$$J_i = -D_i \left[\text{grad} C_i + \frac{z_i F}{RT} C_i \text{grad} \Psi + C_i \text{grad} (\ln Y_i) \right] + C_i V \quad [1]$$

Où D_i , C_i , z_i et Y_i sont respectivement le coefficient de diffusion effectif (m^2/s), la concentration (mol.m^{-3}), la valence et le coefficient d'activité de l'ion i . F est la constante de Faraday ($996485,309 \text{ C.mol}^{-1}$), R est la constante des gaz parfaits ($8,3143 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$), Ψ est le potentiel électrostatique (V).

2.2 Transfert du dioxyde de carbone

Le transfert de dioxyde de carbone se résume par les équilibres physico-chimiques qui existent entre les phases solides et la solution interstitielle du matériau cimentaire [THI 2005]. Lors du couplage carbonatation-chlorures, la porosité évolue. Le tableau ci-dessous résume la loi d'évolution de la porosité $\Delta\epsilon$, les cinétiques chimiques et les équilibres thermodynamiques de la carbonatation du béton.

Tableau 1. Cinétiques chimiques, équilibres thermodynamiques du transfert de dioxyde de carbone dans le béton et loi d'évolution de la porosité.

Cinétiques chimiques	Évolution de la porosité	Équilibres Thermodynamiques
$\delta_{CSH}^0 = \frac{\partial S_{CSH}}{\partial t}$ $\delta_{CSH}^0 = \frac{1}{3} \frac{\partial S_{CaCO_3^{CSH}}}{\partial t}$ $\delta_{CSH}^0 = 3 \frac{\partial S_{SH(gel\ de\ silice)}}{\partial t}$ $\delta_{CaOH_2}^0 = \frac{\partial S_{Ca(OH)_2}}{\partial t} = -X_P^0 \frac{1}{1 + \frac{h}{D} \frac{R_p(\gamma)}{R_c(\gamma)} (R_c(\gamma) - R_p(\gamma))}$ $S_{Ca(OH)_2}$ est la teneur en portlandite (mol/L), $R_p(\gamma)$, $R_c(\gamma)$, X_P^0, h et D sont des paramètres qui dépendent de la portlandite	$\Delta\epsilon = \bar{\gamma}_{NaCl} C_{NaCl} + \bar{\gamma}_{CaCO_3} S_{CaCO_3} - \bar{\gamma}_{CaOH_2} (S_{CaOH_2}^0 - S_{CaOH_2}) + \Delta\bar{\gamma}_{CSH} (S_{CSH}^0 - S_{CSH})$	$[H_2CO_3] = K_H [CO_2]$ $[HCO_3^-] = K_1 [OH^-] [H_2CO_3]$ $[CO_3^{2-}] = K_2 [OH^-] [HCO_3^-]$ $K_p = [Ca^{2+}] [OH^-]^2$ $K_c = [Ca^{2+}] [CO_3^{2-}]$ $K_e = [OH^-] [H^+]$

K_H , K_1 , K_2 , K_E , K_P , et K_C sont les constantes d'équilibres des réactions de carbonatation du béton, $\bar{\gamma}_{NaCl}$, C_{NaCl} , S_{CSH}^0 , S_{CSH} et $\Delta\bar{\gamma}_{CSH}$ sont respectivement le volume molaire et la concentration du NaCl, la teneur initiale et instantanée de CSH et la variation du volume liée à la carbonatation d'une mole de CSH.

2.3 Transfert d'humidité

Le moteur du transfert hydrique est modélisé en termes de diffusion, convection et un terme source qui est en relation avec la formation de l'eau lors de la carbonatation du béton.

$$\frac{\partial S_e}{\partial t} = -\frac{K_e K_{re}}{\varepsilon \mu_e} \frac{\partial P_c}{\partial S_e} \text{grad} S_e + \frac{R_a D_{va}}{\rho_e} \frac{\partial \rho_v}{\partial S_e} \text{grad} S_e - \frac{M_{H_2O}}{\rho_e} \frac{\partial S_{CaOH_2}}{\partial t} \quad [2]$$

$K_e, K_{re}, R_a, D_{va}, P_c, \mu_e, M_{H_2O}$ et ρ_e sont respectivement la perméabilité intrinsèque et relative à l'eau, la résistance à l'air le coefficient de division de la vapeur, la pression capillaire, la viscosité et la masse molaire et la masse volumique de l'eau. Les 5 premiers termes se calculent en fonction de la porosité et du degré de saturation.

3. Résultats et discussion

Le modèle numérique est implémenté dans un code de différence finie pour résoudre les équations. L'application du modèle est faite en premier temps sur un béton de la littérature [KHO 2010] afin de prédire sa durée de vie contre la pénétration du dioxyde de carbone et d'ions chlorures. Ce béton possède les caractéristiques suivantes :

Tableau 2. Les constituants du béton utilisé dans les simulations

Matériaux utilisés (Kg/m ³)	Eco-bétons
Ciment CEM I 52.5N	103
Gravillon 10/14	836
Gravillon 6/10	201
Sable 0/4	816
Laitier de haut-fourneau	310
Rapport E/C	1.65

La porosité initiale ε_0 est prise égale à 15 % (porosité accessible à l'eau) et la perméabilité intrinsèque à l'eau dans l'état initial estimé à $2 \times 10^{-20} \text{ m}^2$. Les isothermes de sorption et de désorption sont modélisées à partir des courbes d'hystérésis sur le même type de béton. Les interactions entre les ions chlorures liés et la matrice cimentaire sont modélisés par un isotherme de type Langmuir à partir des résultats d'essais sur des échantillons concassés soumis à des solutions contenant des ions chlorures selon les recommandations GranDuBé. Le béton est soumis à un environnement contenant des ions chlorures (0.5 M) et du dioxyde de carbone (2%) ainsi qu'à des cycles 6h /6h d'humidification et de séchage durant une année d'exposition. Le coefficient de diffusion des ions en solution et de dioxyde de carbone sont modélisés en fonction du degré de saturation et de la porosité [BUC 2000], [THI 2005] .

Le modèle regroupe tous les hydrates consommés, les produits formés et la variation de la porosité dans le béton.

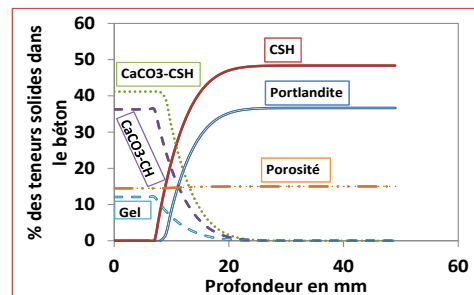


Figure 1. Profils de composés dans le béton calculés 1 année d'exposition sous un cycle de 6h/6h d'hystérésis

Le couplage entre la carbonatation et les chlorures constitue l'originalité et une des spécificités du modèle. La profondeur de pénétration des ions chlorures est plus importante dans le cas d'un béton carbonaté. Les figures

ci-dessous montrent que pour une concentration donnée d'ions chlorures l'épaisseur d'enrobage est sous-estimée lorsqu'on néglige la carbonatation.

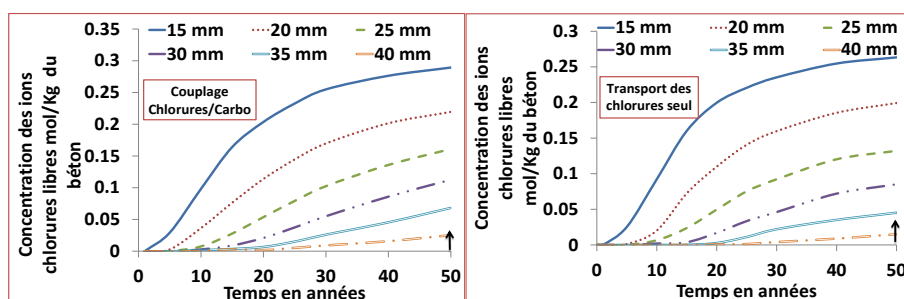


Figure 2. Comparaison de la profondeur de pénétration d'ions chlorures dans les 2 cas étudiés

4. Conclusions

Un modèle numérique multi-ionique a été développé pour simuler le transfert d'ions chlorures et de dioxyde de carbone en tenant compte des cycles d'humidification et de séchage dans le béton. Ce modèle a donné les résultats suivants :

- 1- Le modèle permet de décrire le transfert de tous les ions en solution et de dioxyde de carbone. Les résultats montrent que lors du couplage, les sels de Friedel sont consommés ce qui permet de libérer les ions chlorures libres et d'augmenter la profondeur de pénétration d'ions chlorures.
- 2- Lors du couplage, la porosité diminue due aux réactions de précipitation de la calcite et du gel de silice et de dissolution de la portlandite et des CSH. Le modèle est alors capable de prédire la teneur des composants solides dans le béton.
- 3- Le modèle prédit la durée de vie du béton. Les résultats montrent que lorsque la carbonatation et la convection ne sont pas prises en compte, la durée de vie du béton est surestimée.

5. Bibliographie

- [BAR 2004] BARY B., SELIER A., "Coupled moisture - Carbon dioxide-calcium transfer model for carbonation of concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, no. 10, pp. 1859–1872, 2004.
- [BUC 2000] BUCHWALD A., "Determination of the Ion Diffusion Coefficient in Moisture and Salt Loaded Masonry Materials by Impedance Spectroscopy." in *3rd International Symposium Vienna*, 2000, pp. 475–482.
- [HUC 1923] HUCKEL P., *Zur theorie der Elektrolyte*. Springer Berlin Heidelberg, 1923.
- [KHO 2010] KHOKHAR M., ROZIERE E., TURCRY P., GRONDIN F., LOUKILI A., "Mix design of concrete with high content of mineral additions: Optimisation to improve early age strength," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 5, pp. 377–385, 2010.
- [LIU 2014] LIU R., JIANG L., XU J., XIONG C., SONG Z., "Influence of carbonation on chloride-induced reinforcement corrosion in simulated concrete pore solutions," *Constr. Build. Mater.*, vol. 56, pp. 16–20, 2014.
- [MAI 2013] MAI-NHU J., "Corrosion des armatures du béton: Couplage carbonatation/chlorures en présence des cycles hydriques," Thèse de doctorat à l'université de toulouse, 2013.
- [NIE 2003] NIELSEN E., GEIKER M., "Chloride diffusion in partially saturated cementitious material," *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 1, pp. 133–138, 2003.
- [PHU 2016] NGUYEN P., AMIRI O., "Study of the chloride transport in unsaturated concrete: Highlighting of electrical double layer, temperature and hysteresis effects," *Constr. Build. Mater.*, vol. 122, pp. 284–293, 2016.
- [THI 2005] THIERY M., "Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires : Prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques," Thèse de doctorat à l'école nationale des ponts et chaussées, 2005.
- [VIL 2006] VILLAIN G., THIERY M., "Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete," *NDT E Int.*, vol. 39, no. 4, pp. 328–337, 2006.