
Nécessité et simplifications possibles pour les modèles de transfert ionique : application à un béton soumis à des cycles de marnage

Anthony SOIVE¹, Van-Quan TRAN¹, Véronique BAROGHEL-BOUNY²

¹ Cerema, Direction Territoriale Ouest, 9 rue Viviani, Nantes – anthony.soive@cerema.fr

² IFSTTAR, Département Matériaux et Structures, Laboratoire FM²D, Champs-sur-Marne, Paris

RÉSUMÉ. Cette étude s'est intéressée à la modélisation du transport d'eau de mer dans un béton soumis à des cycles d'humidification/séchage. Un modèle couplé chimie-transport a été mis en place. Les résultats obtenus ont été comparés à des profils expérimentaux en chlorures libres et totaux. Une étude paramétrique a, en outre, été effectuée afin de déterminer l'influence de la perméabilité "intrinsèque" et de la vitesse de séchage en surface du matériau.

Les résultats montrent d'une part que seuls les sels de Kuzel précipitent, les sels de Friedel n'apparaissant pas. D'autre part, les modélisations effectuées sur la base des seuls équilibres thermodynamiques ne suffisent pas à rendre compte des mesures expérimentales. L'ajout de cinétiques de précipitation et dissolution est indispensable. En outre, l'étude paramétrique a montré les influences peu marquées de la valeur de la perméabilité intrinsèque et de l'épaisseur de la couche limite en peau de matériau dans le cas du béton étudié et de ses conditions d'exposition. L'utilisation d'un modèle en condition saturé semble être une approximation trop importante.

ABSTRACT. In this paper, a physically and chemically based model, which describes coupled ion-moisture transport, is used to simulate chloride ingress in concrete elements subjected to wetting-drying cycles in marine environment. Numerical simulations are compared to experimental chloride concentration profiles. In addition, a parametrical study have been performed in order to evaluate the influence of some parameters such as the "intrinsic" permeability and the evaporation kinetics at the material surface.

The results show that Kuzel's salts precipitate counter to Friedel's salts. Furthermore, simulations carried out without precipitation and dissolution kinetics do not lead to results close to experimental data for free and total chloride concentration profiles. Moreover, the boundary layer thickness that reflects the evaporation kinetics and the "intrinsic" permeability value are not important parameters for the studied concretes. Finally, simulations carried out in saturated conditions seem to be an excessive approximation.

MOTS-CLÉS : Modèle, marnage, eau de mer, thermochimie.

KEYWORDS: Model, wetting/drying, sea water, thermochemistry.

1. Introduction

La principale cause de détérioration des structures en béton armé exposé à l'eau de mer est la corrosion. Cette dernière est en partie due au contact des aciers avec les ions chlorures contenus dans l'eau de mer. Connaissant les coûts considérables que peuvent engendrer ces dégradations, il convient notamment de développer des modèles fiables afin de prédire la propagation des ions agressifs en particulier dans la zone de marnage, laquelle est la plus problématique.

De nombreuses études numériques ont traité le transport des ions chlorures dans des milieux poreux non saturés en prenant en compte les phénomènes de diffusion et de convection. Quelques uns s'appuient sur le transport de l'eau dans le matériau à partir d'une approche fickienne (ou purement diffusive) [SAE 93, ABA 03, SAM 05, MEI 05, IQB 09]. Ils utilisent des lois semi-empiriques dont les paramètres sont calés à partir de données expérimentales. D'autres sont des modèles de transport multi-ionique en non saturé prenant en compte les phénomènes d'advection et de diffusion des liquides et gaz [BAR 11]. Néanmoins, ces modèles ont un certain nombre de limitations. Premièrement, ils ne peuvent pas s'appliquer à tous les types de bétons étant donné qu'ils utilisent des relations empiriques pour décrire la fixation des ions chlorures sur la matrice cimentaire. Peu d'entre eux modélisent les précipitations des sels de Friedel et l'adsorption « physique » des ions sur les C-S-H afin de s'affranchir de ces paramètres de fixation [SAM 07, NGU 07] mais d'autres paramètres voient le jour. En outre, ces modèles ne sont pas utilisés avec de l'eau de mer. Deuxièmement, le calcul du pH est souvent manquant. Or, un des principaux objectifs de la modélisation des ions chlorures est une meilleure compréhension des mécanismes conduisant à la corrosion des armatures. Et certains seuils au-delà desquels la corrosion peut commencer sont exprimés en fonction de la concentration en ions hydroxydes [HAU 67, GOU 70]. La modélisation de l'évolution du pH dans le matériau semble donc nécessaire.

En outre, le transport en condition non saturée fait intervenir des mécanismes complexes. Le nombre de paramètres permettant de les décrire peut être important. La modélisation requiert de prendre en compte le transport de l'eau et de l'air sous forme liquide ou gazeuse et le transport des ions contenus dans l'eau de mer. En ce qui concerne le transport de l'eau, un certain nombre d'études s'est focalisé sur le processus de séchage des milieux poreux et la façon dont il est possible de le modéliser [SCH 88, LEH 08, SHA 12, HAG 13]. Ces études montrent que, en plus des isothermes de sorption-désorption et des paramètres de transport classiques (perméabilité « intrinsèque », coefficients de diffusion), il est nécessaire d'estimer une épaisseur de couche limite à la surface du matériau rendant compte de la diffusion de l'eau due au séchage en surface et dont la valeur varie en fonction des conditions environnementales [ROH 61].

Un modèle couplé chimie-transport prenant en compte le transport de l'eau, de l'air sous forme liquide ou gazeuse et des ions dans la solution est mis en place. Il s'appuie sur un outil de simulation de transport multiphasique réactif non isotherme en volumes finis [XU 12]. L'intérêt essentiel d'utiliser ce type de modèle est de réduire le nombre de paramètres empiriques associés notamment à la fixation des ions chlorures sur la matrice cimentaire lors du transport des ions. Il permet, en outre, de simuler l'évolution des espèces solides dans la matrice cimentaire ainsi que celle du pH. Les résultats obtenus sont comparés à des profils expérimentaux en chlorures libres et totaux. Une étude paramétrique est, en outre, effectuée afin de déterminer l'influence de la perméabilité "intrinsèque" et de la vitesse de séchage en surface du matériau. La partie 2 décrit le modèle. La partie 3 compare les résultats numériques aux données expérimentales. La partie 4 quantifie l'influence d'un certain nombre de paramètres. La dernière partie conclue cette étude.

2. Description du modèle

2.1. Transport de l'eau

L'équation de conservation de la masse peut s'écrire sous la forme générale suivante :

$$\frac{d}{dt}m^i = -div(\vec{J}^i) + q^i \quad [1]$$

où m représente la masse par volume, J le flux massique, q le terme source et i représentant l'eau ou l'air. Les masses et flux s'expriment respectivement de la façon suivante :

$$m^i = \phi \sum_{\beta} S_{\beta} \rho_{\beta} X_{\beta}^i \quad [2]$$

$$\vec{J}^i = \sum_{\beta} X_{\beta}^i \left[-k \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \left(\vec{\nabla} P_{\beta} - \rho_{\beta} \vec{g} \right) \right] - \sum_{\beta} \rho_{\beta} D_{\beta}^i \vec{\nabla} X_{\beta}^i \quad [3]$$

où ϕ , S_{β} , ρ_{β} , k , $k_{r\beta}$, μ_{β} , P_{β} sont les porosité accessible à l'eau, degré de saturation, masse volumique, perméabilité "intrinsèque", perméabilité relative, viscosité dynamique et pression, respectivement. β représente la phase (liquide ou gaz). X_{β}^i est la fraction massique du composant i dans la phase β et D_{β}^i est le tenseur de diffusivité.

Les perméabilités relatives pour les liquide et gaz sont supposées être fonction de la saturation, comme le propose Van Genuchten (cf. équation [4]) [Van 80] et Corey (cf. équation [5]) [COR 54], respectivement.

$$k_{rl} = \sqrt{S^{\circ}} \left[1 - \left(1 - S^{\circ \frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right]^2 \quad [4]$$

avec $S^{\circ} = (S_l - S_{lr}) / (S_{ls} - S_{lr})$

$$k_{rg} = (1 - S^{*})^2 \left(1 - S^{*2} \right) \quad [5]$$

avec $S^{*} = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{lg})$, où S_{lr} et S_{lg} sont les saturations résiduelles de liquide et de gaz, respectivement.

La pression de liquide est une fonction de la pression capillaire, P_c , et de la pression de gaz (cf. équation [6]). La pression capillaire est supposée s'exprimer en fonction de la saturation en liquide d'après Van Genuchten [Van 80] (cf. équation [7]).

$$P_l = P_g - P_c \quad [6]$$

$$P_c = -P_0 \left(S_l^{-\frac{1}{\lambda}} - 1 \right)^{(1-\lambda)} \quad [7]$$

Dans ce système d'équations, la phase gazeuse est supposée être le résultat d'un mélange de deux gaz parfait (air et vapeur d'eau). Le mélange est lui-même considéré comme parfait. L'adsorption et la désorption de l'eau sont décrites avec le même jeu de paramètres qui résultent de l'équation [4] et de l'équation de Kelvin qui exprime la pression capillaire en fonction de l'humidité relative. La matrice cimentaire est supposé incompressible.

2.2. Transport ionique

Dans les matériaux poreux insaturés, le transport d'espèces en solution est piloté par la diffusion et la convection. La première loi de Fick rend compte de la diffusion si les espèces ioniques ont le même coefficient de diffusion, D_e (cf. équation [8]). Dans cette étude, cette loi sera préférée à une approche de type Nernst-Planck pour des raisons de simplicité et de temps de calcul. En outre, l'approche de Nernst-Planck se focalise sur les espèces primaires (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} ...). Néanmoins, ces espèces réagissent entre elles dans la solution pour former des complexes ioniques. Ces réactions conduisent à des changements de charge électronique qui peuvent être très différentes des espèces primaires.

$$D_e = \phi \tau S_l D_0 \quad [8]$$

où D_e s'exprime en $m^2.s^{-1}$, τ est la tortuosité et D_0 est le coefficient de diffusion dans l'eau.

En ce qui concerne l'advection, elle dépend de la vitesse du fluide, laquelle est calculée à partir du transport de l'eau (voir paragraphe précédent). Le flux total est ainsi donné par la somme des deux flux (cf. équation [9]) :

$$\vec{J} = -D_e \vec{\nabla} C + \vec{u}_l C \quad [9]$$

où J est le flux total ($kg.m^{-2}.s^{-1}$), $\vec{\nabla}$ est l'opérateur gradient, D_e un tenseur d'ordre 2 qui représente la diffusion effective des ions dans le milieu poreux ($m^2.s^{-1}$), C la concentration des ions dans la solution ($kg.m^{-3}$ de solution) et \vec{u}_l le vecteur vitesse de liquide.

Enfin, les ions chlorures peuvent réagir avec la matrice cimentaire. Afin de s'affranchir des isothermes empiriques de fixation des ions, un modèle couplé chimie-transport est utilisé. Un tel modèle permet de simuler la précipitation d'espèces minérales, comme les sels de Friedel : c'est la fixation "chimique". La fixation "physique" sur les C-S-H peut être décrit par un modèle de Stern [DZO 90]. Néanmoins, pour des raisons de simplicité, une adsorption linéaire est considérée en fonction de la quantité initiale de C-S-H.

2.3. Dissolution / précipitation des espèces minérales

Lorsque la solution n'est pas en équilibre avec la matrice cimentaire, des dissolutions et précipitations se produisent. Afin d'en rendre compte, il est possible de calculer un indice de saturation, IS , pour chaque espèces minérales présentes ou susceptibles de précipiter (cf. équation [10]). Cet indice de saturation est défini comme le rapport du produit des activités ioniques, Q , et le produit de solubilité K de l'espèce minérale considérée.

$$IS = \log_{10} \left(\frac{Q}{K} \right) \quad [10]$$

Lorsque $IS = 0$, l'équilibre est atteint. Si $IS < 0$, la solution est sous-saturée et l'espèce minérale peut se dissoudre. Si $IS > 0$, la solution est sur-saturée et l'espèce minérale peut précipiter.

2.4. Conditions limites

Durant le séchage, des forces capillaires importantes sont présentes résultant du fort gradient entre la pression partielle de vapeur dans le matériau et dans l'air. Des travaux ont montré que le flux d'évaporation à la surface du milieu poreux était contraint par le degré de saturation du matériau et ses propriétés de transport ainsi que la vitesse de transport de la vapeur d'eau au niveau de la surface du matériau [SCH 88, LEH 08, SHA 12, HAG 13]. Il est donc nécessaire d'estimer une épaisseur de couche limite rendant compte de l'évaporation de l'eau. Ghezzehei et al. suggèrent des valeurs entre 5 et 20mm par analyse inverse [GHE 04].

D'un point de vue numérique, l'approche la plus "physique" de la simulation de l'évaporation consiste à définir une fraction massique d'eau dans l'atmosphère correspondant à l'humidité relative et à simuler la diffusion de la vapeur à partir de la surface du matériau à travers la couche limite [GHE 04, FIN 95]. Néanmoins, pour des raisons de simplicité et en reconnaissant que l'humidité relative et la pression capillaire rendent compte d'un "potentiel d'eau", l'évaporation est traduite par une pression capillaire (ou succion) sur la condition limite. Cette succion correspond à l'humidité relative dans l'atmosphère grâce à la loi de Kelvin.

Lors du contact de l'éprouvette avec l'eau de mer, une saturation égale à 1 est imposée en peau de béton. Les concentrations en espèces ioniques imposée sont celles observées dans l'océan atlantique sous nos latitudes. Ces concentrations sont données dans le tableau 1. La concentration en CO_2 dissout n'est pas prise en compte dans le cadre de cette étude.

Tableau 1. Composition ionique de l'eau de mer de l'océan atlantique sous nos latitudes [$mol.l^{-1}$].

Cl^-	Ca^{++}	SO_4^{--}	K^+	Mg^{++}	Na^+
$5.46 \cdot 10^{-1}$	$9.97 \cdot 10^{-3}$	$2.76 \cdot 10^{-2}$	$9.71 \cdot 10^{-3}$	$5.22 \cdot 10^{-2}$	$4.59 \cdot 10^{-1}$

2.5. Propriétés et composition minéralogique du béton hydraté

L'utilisation d'un modèle couplé chimie-transport afin de simuler la propagation des ions contenus dans l'eau de mer est très intéressante étant donné qu'elle permet de s'affranchir de paramètres empiriques comme ceux intervenant dans les isothermes de fixation des ions chlorures. Néanmoins, cette utilisation nécessite de connaître la quantité initiale en produits hydratés dans le béton. Un modèle d'hydratation est donc utilisé afin d'obtenir la composition minéralogique finale (cf. tableau 2) à partir de la composition du ciment et de la formulation du béton BO [BAR 13]. Ce modèle est tiré des travaux de Thiery et al. [THI 05].

Une base de données minéralogiques a été construite à partir de la base de données du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) [BLA 07]. Le tableau 3 montre une partie de cette base de données.

Tableau 2. Composition minéralogique du béton hydraté.

Espèce minérale	Fraction volumique de solide
C_3AH_6	$5,88 \cdot 10^{-3}$
C-S-H (Jennite)	$1,31 \cdot 10^{-1}$
Ettringite	0
Monosulfoaluminate	$1,63 \cdot 10^{-2}$
Portlandite	$4,34 \cdot 10^{-2}$

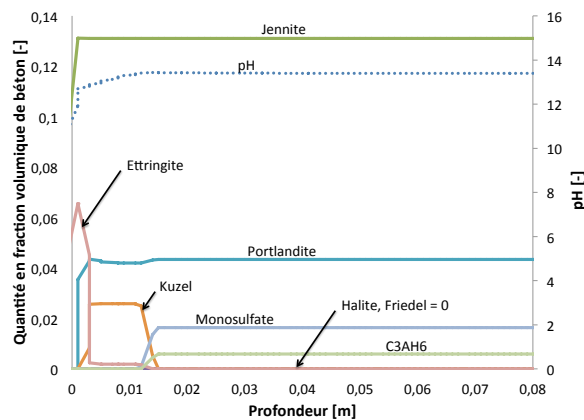
Tableau 3. Propriétés thermodynamiques à 25°C des produits hydratés et des espèces minérales susceptibles de précipiter.

Espèce minérale	$\log(K)$
$C_3AH_6 + 12H^+ \rightarrow 3Ca^{2+} + 2Al^{3+} + 12H_2O$	80,88
$Jennite + 18H^+ \rightarrow 9Ca^{2+} + H_4SiO_4(aq) + 8H_2O$	147,34
$Ettringite + 12H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 6Ca^{2+} + 3SO_4^{2-} + 38H_2O$	56,67
$Monosulfoaluminate + 12H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 4Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 18H_2O$	72,44
$Portlandite + 2H^+ \rightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$	22,76
$Halite \rightarrow Na^+ + Cl^-$	1,60
$Friedel + 12,05H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 4Ca^{2+} + 1,95Cl^- + 16,05H_2O$	76,14
$Kuzel + 2H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 4Ca^{2+} + Cl^- + 0,5SO_4^{2-} + 18H_2O$	73,24

3. Résultats numériques et comparaison avec les résultats expérimentaux

3.1. Sels de Friedel vs sels de Kuzel

Des simulations ont été effectuées sur le béton BO exposé à un marnage à l'eau de mer pendant 89 jours. La figure 1 montre les dissolutions des différentes espèces minérales présentes initialement dans le béton ainsi que les espèces minérales susceptibles de précipiter dans ces conditions. Les résultats montrent que ni halite, ni sels de Friedel ne précipitent. Seuls les sels de Kuzel sont présents en consommant les monosulfoaluminate ainsi que les C_3AH_6 . Cela s'explique notamment par la présence d'ions sulfate dans l'eau de mer.

**Figure 1.** Evolution des espèces minérales et du pH dans le béton après 89 jours d'exposition

Le modèle permet aussi de prédire la précipitation de l'ettringite dans les premiers millimètres, laquelle entraîne une dissolution des sels de Kuzel. Excepté dans cette zone, le pH reste, quant à lui, basique (entre 12 et 14) grâce à la réserve d'ions hydroxyde de la portlandite.

3.2. Nécessité de prendre en compte les cinétiques de précipitation et dissolution

La figure 2 montre la comparaison entre les profils en chlorures totaux obtenus numériquement avec les mesures expérimentales [BAR 13]. Deux simulations ont été effectuées. La première, prenant en compte les seuls équilibres thermochimiques (trait bleu), montre des comportements très abruptes de la quantité en chlorures totaux en fonction de la profondeur. Cela vient du fait que les équilibres thermochimiques font apparaître des effets de seuil. Ici, ce comportement reflète la précipitation des sels de Kuzel. Ce résultat montre l'importance, dans ce type de modélisation, de prendre en compte les cinétiques de précipitation et dissolution des différentes espèces minérales. Cela montre aussi que l'hypothèse selon laquelle les dissolutions et précipitations peuvent être considérées comme instantanées semble difficile à défendre.

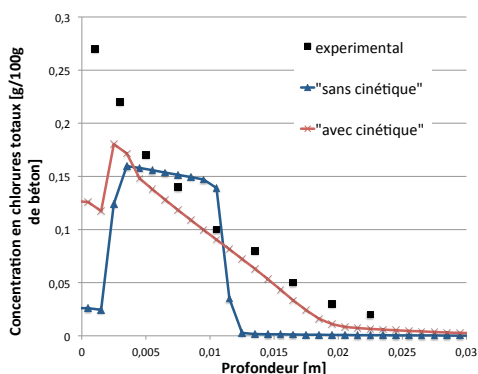


Figure 2. Profils en chlorures totaux après 89 jours d'exposition. Résultats numériques avec et sans cinétique et mesures expérimentales

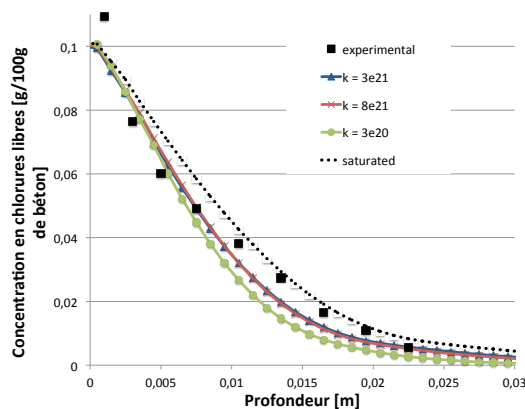


Figure 3. Profils en chlorures libres après 89 jours d'exposition. Résultats numériques avec cinétique pour différentes valeurs de perméabilité "intrinsèque", pour un béton constamment immergé et mesures expérimentales

La deuxième simulation montre le profil obtenu en prenant en compte des cinétiques. Ces résultats apparaissent sur la même figure 2. Ils sont beaucoup plus proches des résultats expérimentaux, à part dans les premiers millimètres où le modèle rend compte d'une lixiviation et d'une précipitation d'ettringite *a priori* moins marquées expérimentalement. Ces résultats sont confirmés sur les profils en chlorures libres (cf. figure 3). Néanmoins, ces "bons" résultats nécessitent de faire apparaître des paramètres de cinétiques qui n'existent pas dans la littérature à notre connaissance. Ainsi, s'il semble incontestable de devoir prendre en compte ces cinétiques, les résultats font l'objet d'un calage sur les résultats expérimentaux.

4. Etude paramétrique

4.1. Marnage vs saturé

Remarquant la grande fréquence de cycles d'humidification/séchage dans le cas étudié, il peut être intéressant de comparer les résultats obtenus par le modèle avec ceux obtenus par des modèles plus simples comme ceux supposant des conditions saturées. En effet, ces derniers modèles sont moins coûteux en temps de calcul et le nombre de paramètres d'entrée est réduit. La figure 3 montre l'influence de la valeur de la perméabilité "intrinsèque" sur les profils en chlorures libres. Les résultats sont comparés aux mesures expérimentales ainsi qu'aux résultats d'une simulation considérant que le béton est constamment immergé dans l'eau de mer.

Les résultats montrent que l'effet de la perméabilité "intrinsèque" est assez peu marqué dans le cadre du béton étudié et de ses conditions d'exposition. Les différences avec les résultats en conditions immergées sont plus notables (jusqu'à 2 fois plus). L'utilisation de ce type de modèle, s'affranchissant de la problématique mesure de la perméabilité "intrinsèque", pour prédire la vitesse de propagation des ions dans un béton soumis à des cycles d'humidification/séchage semble être une approximation importante dans le cas étudié.

4.2. Effet des conditions de séchage

L'effet des conditions de séchage se traduit, dans le cadre de cette étude, par la variation de la valeur de l'épaisseur de la couche limite en peau de béton. La figure 4 montre l'influence de cette valeur sur les profils en chlorures libres. Là encore, ce paramètre ne semble pas jouer de rôle considérable dans le cas étudié. Cet effet limité, tout comme celui, limité aussi, de la valeur de la perméabilité "intrinsèque", s'explique par la fréquence des cycles et le fait que la "profondeur de séchage" du matériau est assez limitée. En effet, sur la figure 5, il est clair que la saturation en liquide dans le matériau reste très élevée, y compris pour des valeurs de perméabilité importantes (plus de 90% au-delà de 10mm !).

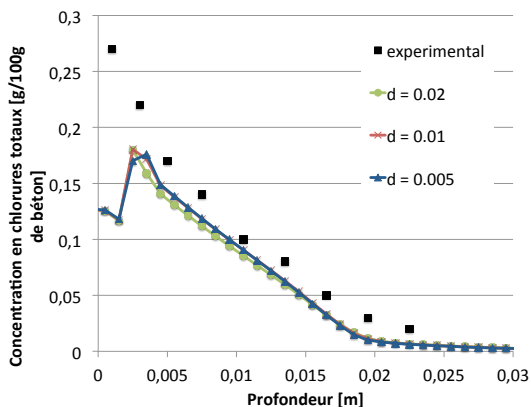


Figure 4. Effet de l'épaisseur de la couche limite sur la propagation des ions chlorures dans le béton après 89 jours d'exposition

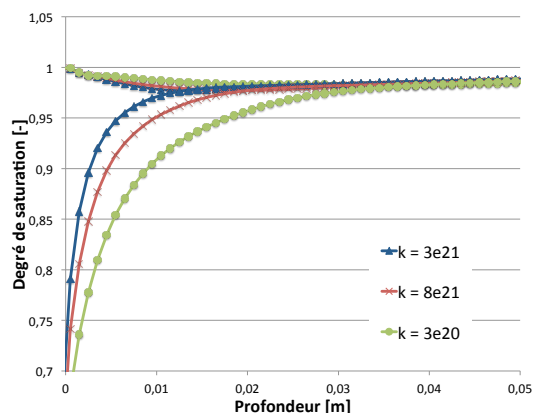


Figure 5. Profondeurs de séchage pour différentes perméabilité après 89 jours d'exposition

5. Conclusions

Cette étude s'est intéressée à la modélisation du transport d'eau de mer dans un béton soumis à des cycles d'humidification/séchage. Un modèle couplé chimie-transport prenant en compte le transport de l'eau, de l'air sous forme liquide ou gazeuse et des ions dans la solution a été mis en place. L'intérêt essentiel d'utiliser ce type de modèle est de réduire le nombre de paramètres empiriques associés notamment à la fixation des ions chlorures sur la matrice cimentaire lors du transport des ions. Il permet, en outre, de simuler l'évolution des espèces solides dans la matrice cimentaire ainsi que celle du pH, lequel semble essentiel dans la détermination d'un seuil d'initiation de la corrosion. Les résultats obtenus ont été comparés à des profils expérimentaux en chlorures libres et totaux. Une étude paramétrique a, en outre, été effectuée afin de déterminer l'influence de la perméabilité "intrinsèque" et de la vitesse de séchage en surface du matériau.

Les résultats ont montré d'une part que seuls les sels de Kuzel précipitent, les sels de Friedel n'apparaissant pas. La présence des ions sulfates dans l'eau de mer en est en partie responsable. D'autre part, les modélisations effectuées sur la base des seuls équilibres thermodynamiques ne suffisent pas à rendre compte des mesures expérimentales. L'ajout de cinétiques de précipitation et dissolution est indispensable, ce qui invalide l'hypothèse selon laquelle les dissolutions et précipitations peuvent être considérées comme instantanées. Cet ajout conduit à des résultats très proches des résultats expérimentaux. Néanmoins, cela ajoute des paramètres de cinétiques *a priori* inexistant dans la littérature. Un calage a donc été effectué.

Enfin, l'étude paramétrique a montré les influences peu marquées de la valeur de la perméabilité intrinsèque et de l'épaisseur de la couche limite en peau de matériau sur la propagation des ions chlorures dans le cas du béton étudié et de ses conditions d'exposition. L'utilisation d'un modèle en condition saturé, s'affranchissant de la problématique mesure de la perméabilité "intrinsèque", pour prédire la vitesse de propagation des ions dans un béton soumis à des cycles d'humidification/séchage semble être une importante approximation.

6. Bibliographie

- [ABA 03] ABABNEH A., BENBOUDJEMA F., XI Y., « Chloride Penetration in Nonsaturated Concrete », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 15, n° 2, p. 183–191, 2003.
- [BAR 11] BAROGHEL-BOUNY V., THIÉRY M., WANG X., « Modelling of isothermal coupled moisture-ion transport in cementitious materials », *Cement and Concrete Research*, vol. 41, n° 8, p. 828–841, Elsevier Ltd, août 2011.
- [BAR 13] BAROGHEL-BOUNY V., DIERKENS M., WANG X., SOIVE A., SAILLIO M., THIÉRY M., THAUVIN B., « Ageing and durability of concrete in lab and in field conditions : investigation of chloride penetration », *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 2, n° 2, p. 67–110, juin 2013.
- [BLA 07] BLANC P., LASSIN A., PIANTONE P., *Thermoddem : a database devoted to waste minerals*, rapport, BRGM, Orléans, France, 2007.
- [COR 54] COREY A., « The Interrelation Between Gas and Oil Relative Permeabilities », *Producers Monthly*, p. 38–41, 1954.
- [DZO 90] DZOMBAK D. A., MOREL F. M. M., *Surface complexation modeling*, New York, Wiley Interscience, 1990.
- [FIN 95] FINSTERLE S., PRUESS K., « Solving the estimation-identification problem in two-phase flow modeling », *Water Resources Research*, vol. 31, n° 4, p. 913–924, 1995.
- [GHE 04] GHEZZEHEI T. A., TRAUTZ R. C., FINSTERLE S., COOK P. J., AHLERS C. F., « Modeling Coupled Evaporation and Seepage in Ventilated Cavities », *Vadose Zone Journal*, vol. 3, p. 806–818, 2004.
- [GOU 70] GOUDA V. K., « Corrosion and corrosion inhibition of reinforcing steel. I. Immersed in alkaline solutions », *British Corrosion Journal*, vol. 5, p. 198–203, 1970.
- [HAG 13] HAGHIGHI E., SHAHRAEENI E., LEHMANN P., OR D., « Evaporation rates across a convective air boundary layer are dominated by diffusion », *Water Resources Research*, vol. 49, p. 1602–1610, 2013.
- [HAU 67] HAUSMANN D. A., « Steel corrosion in concrete. How does it occur ? », *Materials Protection*, vol. 6, p. 19–23, 1967.
- [IQB 09] IQBAL P. O., ISHIDA T., « Modeling of chloride transport coupled with enhanced moisture conductivity in concrete exposed to marine environment », *Cement and Concrete Research*, vol. 39, n° 4, p. 329–339, Elsevier Ltd, avril 2009.
- [LEH 08] LEHMANN P., ASSOULINE S., OR D., « Characteristic lengths affecting evaporative drying of porous media », *Physical Review E*, vol. 77, 2008.
- [MEI 05] MEIJERS S. J. H., BIJEN J., BORST R., FRAAIJ A., « Computational results of a model for chloride ingress in concrete including convection, drying- wetting cycles and carbonation », *Materials and Structures*, vol. 38, n° 2, p. 145–154, 2005.
- [NGU 07] NGUYEN T. Q., *Modélisations physico-chimiques de la pénétration des ions chlorures dans les matériaux cimentaires.*, PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [ROH 61] ROHSENOW W., CHOI H., *Heat, mass and momentum transfer*, Prentice Hall édition, 1961.
- [SAE 93] SAETTA A. V., SCOTTA R., VITALIANI R., « Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete », *ACI Materials Journal*, vol. 90, n° 5, p. 441–451, 1993.
- [SAM 05] SAMSON E., MARCHAND J., SNYDER K., BEAUDOIN J., « Modeling ion and fluid transport in unsaturated cement systems in isothermal conditions », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 1, p. 141–153, janvier 2005.
- [SAM 07] SAMSON E., MARCHAND J., « Modeling the effect of temperature on ionic transport in cementitious materials », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, p. 455–468, 2007.
- [SCH 88] SCHLÜNDER E.-U., « On the mechanism of the constant drying rate period and its relevance to diffusion controlled catalytic gas phase reactions », *Chemical Engineering Science*, vol. 43, n° 10, p. 2685–2688, 1988.
- [SHA 12] SHAHRAEENI E., LEHMANN P., OR D., « Coupling of evaporative fluxes from drying porous surfaces with air boundary layer : Characteristics of evaporation from discrete pores », *Water Resources Research*, vol. 48, p. 1–15, 2012.
- [THI 05] THIÉRY M., PLATRET G., MASSIEU E., VILLAIN G., BAROGHEL-BOUNY V., « Un modèle d'hydratation pour le calcul de la teneur en portlandite des matériaux cimentaires comme donnée d'entrée des modèles de carbonatation », *Journées Ouvrages d'Art du réseau des L.P.C.*, Lyon, 2005.
- [Van 80] VAN GENUCHTEN M. T., « A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils 1 », *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, p. 892–898, 1980.
- [XU 12] XU T., SPYCHER N., SONNENTHAL E., *TOUGHREACT User's Guide : A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Transport in Variably Saturated Geologic Media*, version 2.0, 2012.