

MODÉLISATION THÉORIQUE DES PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT : APPLICATION A LA CARBONATATION DES BETONS

Abdelkader Tahakour^{1a}, Abdelkarim ait mokhtar^{2a}, Lyacine Bemacer^{3b}.

^{1a} Maître de Conférences, Laboratoire de Technologie des Matériaux et de Génie des Procédés, Université de Béjaïa, Targa Ouzemour, 06000 Béjaïa, Tél. fax: 034 21 45 01

^{2a} Professeur, laboratoire d'Études des Phénomènes de Transfert Appliqués aux Bâtiments Université de la Rochelle (France)

^{3b} Maître Assistant Université d'Adrar, 01 000 Adrar

RÉSUMÉ

Le béton est le matériau le plus répandu en construction, sa haute performance inclut sa durabilité, qui est supérieure à celle de ses principaux concurrents, aciers et bois. Par contre, la durabilité des structures en béton armé est insuffisante dans les environnements chimiquement agressifs. La durabilité d'un béton est fonction de sa capacité à résister aux attaques chimiques qu'il subit. L'évaluation de cette dernière nécessite la connaissance du comportement du béton à long terme vis-à-vis de l'action des agents agressifs.

Nous proposons, dans cette étude, un modèle mathématique qui décrit le transport du dioxyde de carbone dans un milieu réactif non saturé, conduisant à la carbonatation qui touche à la durabilité des ouvrages en béton armé et précontraint. En intégrant les différents mécanismes qui interviennent dans ce phénomène de façon significative : (diffusion du dioxyde de carbone en phase gazeuse et sa dissociation dans la phase liquide, précipitation de la portlandite dans la solution interstitielle, réduction de la porosité due à la carbonatation et l'hydratation, formation et consommation des principaux hydrates du ciment ainsi que la calcite formée). Le système des équations de transport modélisant ces processus est non linéaire. La résolution du problème posé dans le cas unidimensionnel, est effectuée à l'aide d'une approche semi-discrète (méthode des lignes).

Mots-Clés

carbonatation, béton, durabilité, équation de transport, Phénomène de transfert.

1. INTRODUCTION

La durabilité d'un béton est fonction de sa capacité à résister aux attaques chimiques qu'il subit. L'évaluation de cette dernière nécessite la connaissance du comportement du béton à long terme vis-à-vis de l'action des agents agressifs. La détérioration des structures en béton armé est généralement engendrée par la corrosion des aciers d'armatures, initiée par la carbonatation et/ou les ions chlorures. Dans le cas de la carbonatation, la réaction chimique entre le dioxyde de carbone et les produits d'hydratation de la pâte de ciment réduit le pH de la solution interstitielle des pores à une valeur telle que le film passif protégeant l'acier de la corrosion n'est plus stable, dès lors la corrosion peut se développer en milieu aéré et humide. À l'issue de diverses investigations théoriques et expérimentales [1], [2], [3] menées sur ce sujet, la profondeur de la carbonatation est proportionnelle à la racine carrée du temps d'exposition. Cependant, la constante de proportionnalité dépend à la fois, de la composition du matériau (rapport E/C, dosage et type de ciment, durée de cure....) [4] et de son milieu environnant (humidité relative, température, teneur en dioxyde de carbone....) [4], [5], [9]. Ce travail porte sur la modélisation théorique suivi d'une simulation numérique du processus de carbonatation se déroulant au

2. LA CARBONATATION

2.1 LE DIOXYDE DE CARBONE DANS L'ATMOSPHERE

Le dioxyde de carbone est le résultat de la combinaison de deux éléments, le carbone et l'oxygène. Il est produit par le processus de la combustion du charbon et des hydrocarbures, (matières énergétiques), la respiration des êtres vivants, la fermentation des liquides,...etc. Il est l'un des principaux gaz à effet de serre, dans l'air sa teneur est naturellement de 0.03% en volume, qui varie avec la température, la pression et le milieu (agglomération, industries....) et peut atteindre 0.3 % dans les zones urbaines [5], [6], [7].

2.2 MESURE EXPÉRIMENTALE DE LA PROFONDEUR DE CARBONATATION

La profondeur de carbonatation est couramment mesurée par un essai de coloration à la phénolphtaléine. La profondeur du front de neutralisation n'est pas régulière du fait que cet indicateur ne permet pas de faire la différence entre la carbonatation pendant le

test et la préexistante. L'indicateur, colore en rose la partie non carbonatée dont le virage colorimétrique se situe à une valeur du pH d'ordre 9, figure n°1 [5].

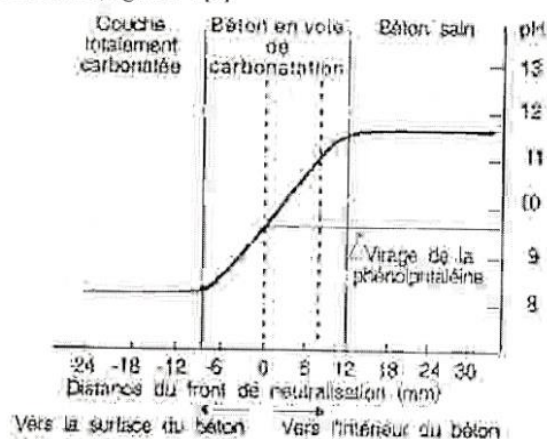


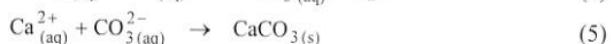
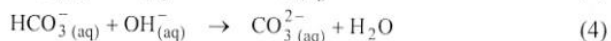
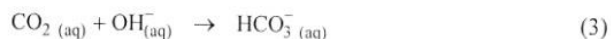
Figure n°1 : Gradient de pH en fonction de la profondeur carbonatée [5].

2.3 LA RÉACTION DE CARBONATATION

La carbonatation est simulée à la réaction du dioxyde de carbone (CO_2) avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de la pâte de ciment hydraté [6], en résultant de la carbonate de calcium comme produit final. Cette réaction se produit comme suit :



Le dioxyde de carbone se dissout également dans la solution des pores, à savoir :



La notation (s), (aq) et (g) désigne respectivement la phase solide, aqueuse et gazeuse.

3. LES ÉQUATIONS DE TRANSPORT

3.1 LE TRANSPORT DU DIOXYDE DE CARBONE DANS LE BÉTON

Pour décrire le transport du dioxyde de carbone à l'échelle du matériau, une méthode d'homogénéisation dite technique des moyennes spatiales sera appliquée aux paramètres intensifs. On désigne par $\langle \Psi^{(\alpha)} \rangle$ la moyenne de phase d'une grandeur tensorielle, vectorielle, ou scalaire associée à une phase (α) qui occupe le volume V_α , qu'on représente par l'intégrale volumique par rapport au volume élémentaire représentatif V_{ER} .

$$\langle \Psi_i^{(\alpha)} \rangle = \frac{1}{V_{ER}} \int_{V_{ER}} \Psi_i^{(\alpha)} dV \quad (6)$$

V_{ER} est le volume élémentaire représentatif du matériau. tel que: $V_{ER} = V_L + V_G + V_\sigma$

Le transport du dioxyde de carbone dans le béton est gouverné par l'équation du bilan suivante :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\varepsilon_p \{ (1-S) + H.R.T.S \} \langle n_C^{(G)} \rangle^G \right] \\ = \left[\varepsilon_p \left\{ (1-S) \right\} \frac{\partial \langle n_C^{(G)} \rangle^G}{\partial x^2} - \varepsilon_p S \langle R_C^{(L)} \rangle^L \right. \\ \left. - \tau_{L,\sigma} \left[\langle R_{CSH}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} + 3 \langle R_{C_3S,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} + 2 \langle R_{C_2S,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \right] \quad (7) \end{aligned}$$

avec le coefficient de diffusion effectif du dioxyde de carbone en phase gazeuse (G) est $D_{C,eff}^{(G)} = 1,64 \cdot 10^{-6} \varepsilon_p^{1,8} \left(1 - \frac{HR}{100} \right)^{2,2}$ [6], H est la constante d'Henry Pour la dissolution de CO_2 qui est égale à $34,2 [mol/m^3 \cdot atm]$ à (25 °C), R : constante des gaz parfaits, sa valeur est $8,206 \cdot 10^5 [m^3 \cdot atm/mol \cdot K]$, S est le degré de saturation du matériau, est la porosité instantanée du matériau, HR est l'humidité relative, est le taux de la surface d'échange entre la phase solide et liquide (L).

$\langle R_C^{(L)} \rangle^L, \langle R_{CSH}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma}, \langle R_{C_3S,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma}, \langle R_{C_2S,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma}$ sont respectivement les cinétiques de réaction de dissolution du dioxyde de carbone dans la phase liquide, et de carbonatation des constituants solide de la matrice cimentaire. Afin de prendre en considération le processus d'hydratation du ciment, les équations de conservation de masse des différents constituants de la matrice cimentaire seront couplées à l'équation de transport (7).

Remarque : on note par (l), (g), (σ) respectivement la phase liquide, gazeuse et solide. Et par (L) l'interface liquide-solide.

L'équation de conservation de masse d'un constituant i d'une matrice cimentaire soumise à une carbonatation est donnée par l'équation (8).

$$\frac{\partial n_i^{(L,\sigma)}}{\partial t} = \sum R_i^{(L,\sigma)} - \sum R_{j,C}^{(L,\sigma)} \quad (8)$$

$n_i^{(\alpha)}$ Est la concentration molaire du constituant i, $\sum R_i^{(L,\sigma)} - \sum R_{j,C}^{(L,\sigma)}$ respectivement est la somme de toutes les cinétiques des réactions chimiques aux interfaces impliquant le constituant i comme réactif ou produit dans le processus de carbonatation et d'hydratation. L'équation de conservation (8) est écrite pour les principaux constituants de la phase solide C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF et hydrates : CH et CSH. Les taux de production, et de consommation des hydrates sont obtenus à partir des équations (9) et (10) [7].

Avec
$$R_i^{(L,\sigma)} = - \frac{dn_i^{(\sigma)}}{dt} = k_{H,i} n_i^{(\sigma)}(0) \left[\frac{n_i^{(\sigma)}}{n_i^{(G)}(0)} \right]^{m_i} \quad (9)$$

$n_i^{(\sigma)}(0)$ Et $n_i^{(G)}$ sont respectivement les concentrations molaires surfacique initiales et instantanées de i ($i = C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF$), exprimées en $[mol \cdot m^{-3}]$.

$k_{H,i}$ En $[s^{-1}]$, et m_i sont des paramètres de la lois de régression.

$$R_{j,C}^{(L,\sigma)} = k_j \bar{V}_j n_j^{(\sigma)} n_C^{(L)} \quad (10)$$

Avec : $j = CSH, c_3S, c_2S$

$n_j^{(\sigma)}, \bar{V}_j$ sont respectivement, concentration et volume molaire du constituant solides j.

Le développement de l'équation (8) nous permettra d'obtenir un système d'équations de conservation de masse pour chaque constituant.

- *La portlandite*

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \varepsilon_p) \langle n_{CH}^{(\sigma)} \rangle^\sigma \right] = \tau_{L,\sigma} \left[\langle R_{CO}^{(L)} \rangle^{L,\sigma} - \langle R_{D,CH}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} + \frac{3}{2} \langle R_{C_3S}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \langle R_{C_2S}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} - 6 \langle R_{C_4AF}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} - \langle R_{C_3A}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

$R_{D,CH}^{(L,\sigma)}$ La vitesse de réaction de dissolution de la portlandite est proposée par [6] :

$$R_{D,CH}^{(L,\sigma)} = 0,5 \cdot k_s \left(n_{CH}^{(L)} \right)_{sat} \bar{V}_{CH} \left(\left(n_{OH^-}^{(L)} \right)_{sat} - n_{OH^-}^{(L)} \right) \quad (12)$$

\bar{V}_{CH} Est le volume molaire de CH, $\left(n_{CH}^{(L)} \right)_{sat}$ est la concentration volumique molaire de CH liquide saturée, $\left(n_{OH^-}^{(L)} \right)_{sat}$, $n_{OH^-}^{(L)}$ respectivement la concentration des ions OH^- sur l'interface liquide-solide et dans la phase liquide (loin de l'interface)

k_s représente le coefficient de transfert de masse pour la dissolution des CH solide qui est sensiblement égale à $5 \cdot 10^{-5} m/s$

- *silicate de calcium hydraté :*

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \varepsilon_p) \langle n_{CSH}^{(\sigma)} \rangle^\sigma \right] = \tau_{L,\sigma} \left[\frac{1}{2} \langle R_{C_3S}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} + \frac{1}{2} \langle R_{C_2S}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} - \langle R_{CSH,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \quad (13)$$

- *Silicate tricalcique :*

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \varepsilon_p) \langle n_{C_3S}^{(\sigma)} \rangle^\sigma \right] = - \tau_{L,\sigma} \left[\langle R_{C_3S}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} + \langle R_{C_3S,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \quad (14)$$

- *Silicate bicalcique :*

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \varepsilon_p) \langle n_{C_2S}^{(\sigma)} \rangle^\sigma \right] = - \tau_{L,\sigma} \left[\langle R_{C_2S}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} + \langle R_{C_2S,C}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \quad (15)$$

Les aluminoferrites tétracalciques :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \varepsilon_p) \langle n_{C_4AF}^{(\sigma)} \rangle^\sigma \right] = - \tau_{L,\sigma} \left[\langle R_{C_4AF}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \quad (16)$$

Les aluminates tricalciques :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1 - \varepsilon_p) \langle n_{C_3A}^{(\sigma)} \rangle^\sigma \right] = - \tau_{L,\sigma} \left[\langle R_{C_3A}^{(L,\sigma)} \rangle^{L,\sigma} \right] \quad (17)$$

La discrétisation de l'équation (7) selon un schéma aux différences finies semi discrète nous permet d'écrire le terme du second ordre sous la forme suivante :

$$\frac{\partial^2 \langle n_C^{(G)} \rangle^G}{\partial x^2} = \frac{\langle n_C^{(G)} \rangle_{j+1}^{(G)} - 2 \cdot \langle n_C^{(G)} \rangle_j^{(G)} + \langle n_C^{(G)} \rangle_{j-1}^{(G)}}{\Delta x^2} \quad (18)$$

On obtient, après discrétisation, un système d'équations différentielles ordinaires qui a comme inconnues les concentrations molaires des anhydres et des hydrates ainsi que la concentration du dioxyde de carbone gazeux.

Ce système décrit les cinétiques d'hydratation et de carbonatation. Sa fermeture nécessite une relation décrivant

l'évolution de la porosité initiale due aux phénomènes d'hydratation du ciment et aux processus de carbonatation [5], [7], [8]. Par conséquent, on désignera par $\Delta \varepsilon_H$ et $\Delta \varepsilon_C$, les variations de la porosité dues à ces deux mécanismes.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - \Delta \varepsilon_H(t) - \Delta \varepsilon_C(t) \quad (19)$$

- réduction de la porosité due à l'hydratation :

*pour $0 \leq t \leq t_c$

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta \varepsilon_H}{1 - \varepsilon_{p0}}\right) = (-\varepsilon_0) \left[n_{C_3S}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_3S} F_{C_3S}^{(\sigma)}(t) + < n_{C_2S}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_2S} F_{C_2S}^{(\sigma)}(t) + < n_{C_3A}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_3A} F_{C_3A}^{(\sigma)}(t) + < n_{C_4AF}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_4AF} F_{C_4AF}^{(\sigma)}(t) \right] \quad (20)$$

*Pour $t \geq t_c$

$$\ln\left(1 + \frac{\Delta \varepsilon_H}{1 - \varepsilon_{p0}}\right) = (-\varepsilon_0) \left[n_{C_3S}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_3S} F_{C_3S}^{(\sigma)}(t) + < n_{C_2S}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_2S} F_{C_2S}^{(\sigma)}(t) + < n_{C_3A}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_3A} F_{C_3A}^{(\sigma)}(t) + < n_{C_4AF}^{(\sigma)}(0) > \sigma \cdot \delta \bar{V}_{C_4AF} F_{C_4AF}^{(\sigma)}(t) \right] \quad (21)$$

- Réduction de la porosité due à la carbonatation :

Le terme $\Delta \varepsilon_C$ correspond à la réduction de la porosité due à la carbonatation des CH et CSH. Si on considère que la carbonatation ne débute qu'après le temps de cure t_{cu} .

Pour $t \geq t_c$:

$$\Delta \varepsilon_C = (-\varepsilon_0) \left[n_{CH}^{(\sigma)} \cdot \delta \bar{V}_{CH} + n_{CSH}^{(\sigma)} \cdot \delta \bar{V}_{CSH} \right] \quad (22)$$

Avec $\delta \bar{V}$ représente la variation de volume molaire du constituant i hydraté [7], $\delta \bar{V}_{CH}$ et $\delta \bar{V}_{CSH}$ et les variations de volume molaire correspondant à ces deux constituants réagissant avec le dioxyde de carbone.

Le système d'équations obtenu est résolu numériquement selon la méthode de Runge-Kutta du quatrième et cinquième ordre. Les conditions initiales et aux limites sont données comme suit :

4. CONDITIONS INITIALES

A l'état initial on a :

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_p(t=0) &= \varepsilon_{p0} = \frac{E}{C} \frac{\rho_C}{\rho_E} (1 - \varepsilon_A) + \varepsilon_A \\ &\quad \left(1 + \frac{E}{C} \frac{\rho_C}{\rho_E} + \frac{A}{C} \frac{\rho_C}{\rho_A} \right) \\ t=0 \Rightarrow < n_{CH}^{(\sigma)}(0) >_j < n_{CSH}^{(\sigma)}(0) >_j = 0 \\ < n_i^{(\sigma)}(0) >_j &= \frac{\varphi_{mi} \cdot \varphi_{cl} \cdot \rho_C}{M_i \left(1 + \frac{E}{C} \frac{\rho_C}{\rho_E} + \frac{A}{C} \frac{\rho_C}{\rho_A} \right)}, \text{ pour } i = C_3S, C_2S, C_3A, C_4AF \end{aligned} \right. \quad (23)$$

φ_i est la fraction massique du constituant i ($i = C_3S, C_2S, C_4AF$ et C_3A) dans le clinker et φ_{cl} celle du clinker dans le ciment. M_i est la masse molaire du constituant i en $[Kg.mol^{-1}]$

5. CONDITIONS LIMITES

$$\left\{ \frac{\partial < n_{CH}^{(\sigma)} >_j}{\partial x} \right\} = \left\{ \frac{\partial < n_{CH}^{(\sigma)} >_{j=n}}{\partial x} \right\} = 0, < n_C^{(G)} >_0 = < n_C^{(G)} >_{ext} \quad (24)$$

$$\left\{ \frac{\partial < n_C^{(G)} >_j}{\partial x} \right\} = 0, \left\{ \frac{\partial < n_C^{(G)} >_L}{\partial x} \right\} = 0, HR(x,t) = HR, T(x,t) = T \quad (25)$$

6. SIMULATIONS

Le béton utilisé pour les différentes simulations numériques est à base de ciment Portland artificiel (CEM I 52,5) dont les compositions chimique et minéralogique sont représentées respectivement dans les tableau n°1 et n°2. Les formulations du béton étudié sont présentées dans le tableau n°3.

Oxyde	CAO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	B ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	MnO	SrO	P ₂ O ₅	PF
%	62,02	19,81	5,19	2,38	0,90	1,11	0,06	3,50	0,28	0,05	0,15	0,16	2,23

Tableau n°1 : Composition chimique du ciment (CEM I 52,5) utilisé.

Silicate tricalcique C ₃ S	61,8 %
Silicate bicalcique C ₂ S	10,2 %
Aluminate tricalcique C ₃ A	9,7 %
Aluminoferrite tétracalcique C ₄ AF	7,2 %

Tableau n°2 : Composition minéralogique du clinker utilisé.

type	B1	B2	B3	B4	B5	B6
E/C	0,5	0,5	0,65	0,8	0,65	0,65
A/C	0	3	3	3	5	7

Tableau n°3 : Formulation des matériaux étudiés.

Les masses volumiques du ciment, de l'eau et des agrégats sont : $\rho_C = 3,13.10^{+3} \text{ kg/m}^3$, $\rho_E = 10^{+3} \text{ kg/m}^3$, $\rho_A = 2,712.10^{+3} \text{ kg/m}^3$

$T = 30^\circ C$, $HR = 65\%$, $S = 30\%$, $< n_C^{(G)} >_{ext} = 50\%$

La géométrie du milieu poreux est hautement irrégulière, ce qui rend l'étude du phénomène très complexe. Dans cette étude, on se limitera au cas d'un matériau isotrope. On se place dans un système unidirectionnel dans lequel pénètre le dioxyde de carbone (figure n°2).

Les entrées et sorties du modèle sont données dans l'organigramme présenté sur la figure n°3 :

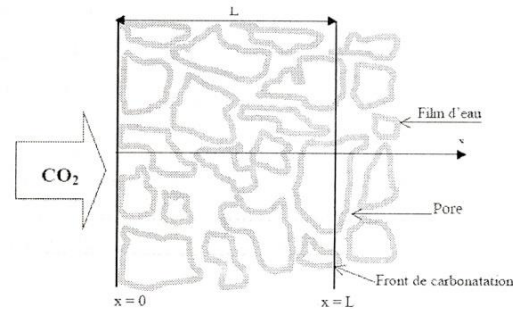


Figure n°2: Le domaine matériel soumis à une carbonatation unidimensionnelle.

Données liées à la composition du béton et à l'environnement
 $[C]_{sw}, HR, T, S, \frac{E}{C}, \frac{A}{C}, \rho_E, \rho_C, \rho_A, M_i, m_i, \varphi_{cl}, \varphi_i, k_i, k_j, k_k, k_{sw}$
 $v_{CH}, v_{CSH}, v_{CS}, v_{C_3S}, \Delta v_{CH}, \Delta v_{CSH}, \Delta v_i, \Delta v_{C_3A}, \Delta v_{C_4AF}, \Delta v_{C_3A}, \Delta v_{C_4AF}, \bar{s}$
 $[OH^-], \tau_{i,j} \text{ (i=C}_3\text{S, C}_2\text{S, C}_3\text{A, C}_4\text{AF, C}_3\text{A)}$

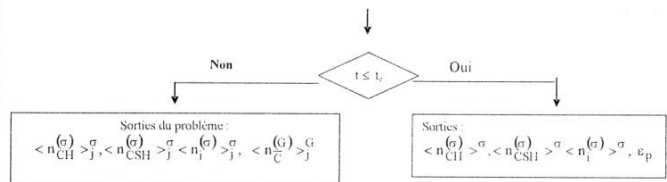


Figure n°3 : Entrées et sorties du problème

7. ÉVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE CARBONATATION :

Le modèle fournit l'évolution dans le temps des concentrations molaires des constituants du ciment et des hydrates qu'ils produisent ainsi que celle du dioxyde de carbone. Nous nous intéressons dans cette étude à l'évolution de la concentration du dioxyde de carbone. A partir de ces concentrations on obtient la profondeur de carbonatation.

Le tableau n°4 donne la profondeur de carbonatation pour les différents types de béton utilisés pour la simulation.

Temps d'exposition [jours]	Profondeur de carbonatation [mm]					
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	2,099	4,914	5,010	5,067	4,985	7,619
3	2,918	7,687	7,846	7,942	7,739	12,381
5	3,476	9,592	9,796	9,918	9,641	15,654
10	4,497	13,08	13,375	13,548	13,139	21,664
15	5,279	15,772	16,121	16,332	15,824	26,274
20	5,973	18,033	18,435	18,679	18,088	30,160

Tableau n° 4 : Profondeur de carbonatation en fonction du temps donnée par le modèle.

Afin de valider ce modèle, on compare nos résultats à ceux obtenus expérimentalement par Papadakis et al [3] avec une série d'essais de carbonatation accélérée sur des bétons de même composition et dans les mêmes conditions d'exposition utilisés dans cette étude.

8. RÉSULTATS :

La figure n°4 montre l'évolution de la profondeur de carbonatation obtenue expérimentalement et avec le modèle. L'évolution de la profondeur de carbonatation du béton est similaire à celle du mortier. Pour ce qui est de la comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'expérience, il apparaît que ces résultats sont globalement en accord dans l'ensemble. Les écarts obtenus peuvent être justifiés par le couplage de la porosité aux équations de transport d'une part et le degré de saturation pris en compte qui ne correspond pas à l'équilibre du système d'autre part.

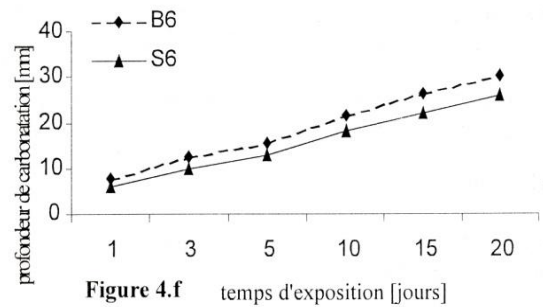
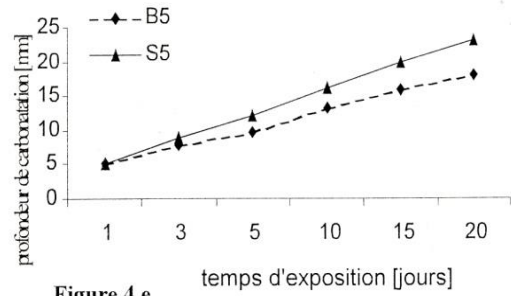
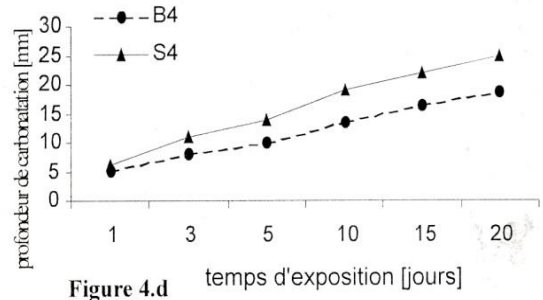
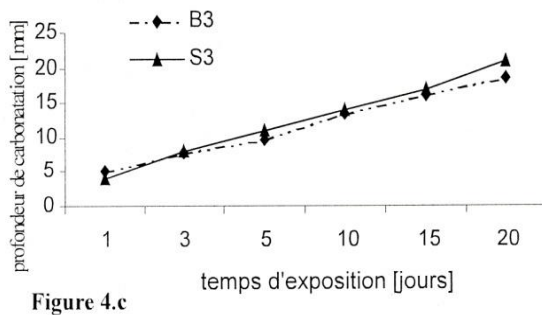
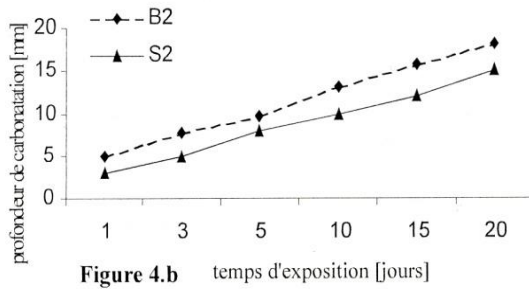
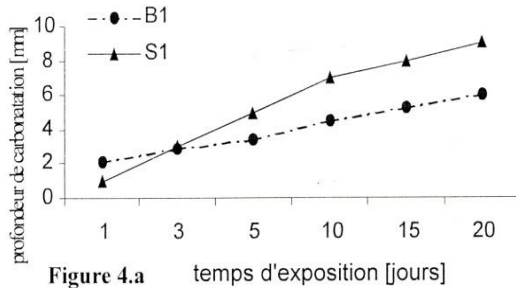


Figure n°4 : Comparaison des valeurs de la profondeur de carbonatation du modèle avec les valeurs expérimentales

9. CONCLUSION

Le modèle mathématique présenté dans cette étude repose sur l'utilisation des équations de conservation de la masse appliquées à tous les constituants de la matrice cimentaire. L'application de la théorie des moyennes spatiales sur les équations de transport microscopiques dans une phase homogène et aux interfaces fournit un système d'équation de transport à l'échelle du matériau. La résolution de ce système avec la méthode des lignes prend en compte l'hydratation et la carbonatation des constituants couplées avec la porosité du béton.

Les résultats que nous avons obtenus sur la carbonatation des bétons nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- la composition agit sur le phénomène de transport du dioxyde de carbone à l'intérieur du béton. De plus, il est apparu que la porosité du béton guidée par le rapport (E/C), (A/C), possède une influence sur le processus.
- La lenteur du processus de carbonatation, confirmée par les résultats obtenus nous permet de dire que l'hydratation peut être négligée.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] : **R. Miragliotta** : «Modélisation des processus physico-chimique de la carbonatation des bétons préfabriqués - prise en compte des effets de paroi », thèse de Doctorat de l'université de la Rochelle, 2000.

[2]: **V.g. Papadakis, c.g. vayenas, m.n. fardis** : «Fundamental Modelling and Experimental investigation of Concrete Carbonation » Aci materials Journal , Vol. 88, No.4, pp. 363-373, july-august 1991.

[3]: **B. Isgor, A. G. Razaqpur** : « Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures » Cement and Concrete Composites No. 25, 2003.

[4]: **J.p. Balayssac, ch.h. dÉTriche, j. grandet** : «effects of curing upon carbonation of concrete », construction and building materials, vol. 9, NO.2, 91-95, 1995.

[5]: **J. Baron, et J.-P. Ollivier** : «La durabilité des bétons », Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 453 p, 1992.

[6]: **V.g. papadakis, c.g. vayenas, m.n. fardis** : «A reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation » Aiche Journal, Vol. 35, No.10, pp. 1639-1650, October 1989.

[7]: **V.g. Papadakis, c.g. vayenas, m.n. fardis** : «Physical and Chemical characteristics affecting the Durability of Concrete » Aci materials Journal, Vol. 8, No.2, pp. 186-196, March-april 1991.

[8]: **Y. Houst**: « carbonatation du béton et corrosion des armatures » Chantiers/suisse, Vol 15, 6/84, pp.569-574, 1993.

[9]: **V.G. PAPANAKIS, C.G. VAYENAS, M.N. FARDIS** : «A Reaction engineering approach to the problem of concrete carbonation » AICHÉ Journal, Vol. 35, NO.10, pp. 1639- 1650, October 1989.