

S. CARE * et E. HERVE **

* Division Béton et Composite Cimentaire - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

** Laboratoire de Mécanique des Solides - Ecole Polytechnique - et Université de Versailles – Saint Quentin en Yveline -

Prédiction du coefficient de diffusion des ions chlorures dans les matériaux à matrice cimentaire (mortier) par des méthodes d'homogénéisation.

Problématique :

La dégradation des ouvrages en béton armé par le processus de corrosion des armatures est liée aux interactions physico-chimiques entre les composants du matériau « béton » et les espèces agressives contenues dans le milieu environnant, par exemple les ions chlorures apportés par les sels de déglaceage ou le CO₂ atmosphérique. Le béton étant un milieu poreux, les espèces agressives peuvent pénétrer selon des processus diffusif ou darcéen. A chacun de ces processus correspond un coefficient de transfert particulier (coefficient de diffusion et de perméabilité) qui peut être considéré comme un indicateur de durabilité, car il qualifie le matériau vis à vis de son aptitude à être traversé par des espèces agressives et donc à ne pas s'endommager par le processus de corrosion des armatures.

Les coefficients de diffusion et de perméabilité dépendent de la formulation du béton. Leur prédiction en fonction des différents composants du béton permettrait au maître d'œuvre de s'assurer d'une structure durable. Cette étude s'attache plus particulièrement à montrer comment les méthodes d'homogénéisation peuvent permettre d'estimer les coefficients de diffusion des ions chlorures dans les mortiers.

Influence des granulats :

Les coefficients de transfert dépendent des caractéristiques du matériau composite « béton » qui est constitué de pâte de ciment et de granulats. En effet, l'aptitude du matériau « béton » à être traversé par les espèces agressives dépend de la structure poreuse de la pâte de ciment qui est fonction de la nature du ciment et du rapport Eau/ Ciment, mais aussi des granulats.

En effet les granulats modifient la structure poreuse de la pâte de ciment (figure 1). Des zones, de porosité plus importante, appelées « auréoles de transition » peuvent apparaître autour des granulats, ce qui favorise les transferts. La présence des granulats qui modifie localement la porosité de la pâte de ciment fait donc que le béton se comporte comme un matériau à gradients de microstructure et donc de propriétés. Le mortier peut être considéré comme un matériau triphasique : les granulats qui sont non poreux, la matrice de ciment de la pâte de mortier (la pâte de ciment contenue dans le mortier sans les auréoles de transition) et les auréoles de transition.

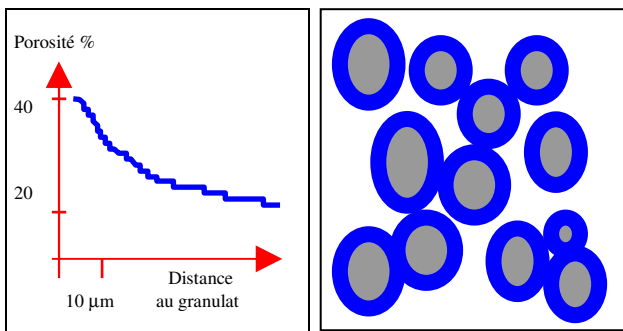


Figure 1 : Microstructure des bétons : matériau triphasique (granulat, auréole de transition, matrice cimentaire).

Principe du modèle :

Afin de pouvoir prédire les propriétés de diffusion des ions chlorures dans les matériaux composites à inclusions formées de n couches concentriques, placées dans une matrice, nous avons utilisé un modèle de type « autocohérent généralisé ». La mise au point de ce modèle a nécessité deux étapes.

La première étape consiste à étudier, en régime permanent, le problème de diffusion dans une matrice formée d'une seule inclusion à n couches concentriques (chaque phase i est caractérisée par sa fraction volumique et son coefficient de diffusion D_i, cf. figure 2) placée dans un matrice infinie soumise à un gradient de concentration.

Grâce aux équations de base qui sont :

- la première loi de Fick : $\mathbf{J} = D_e \cdot \text{grad } C_{ef}$, où \mathbf{J} désigne le flux d'ions chlorures à travers une surface (de section unitaire) d'un solide poreux et C_{ef}, la concentration en ions chlorures et D_e le coefficient de diffusion,

- et la seconde loi de Fick qui exprime la conservation de matière : $\text{div } \mathbf{J} = 0$, et grâce aux conditions de continuité aux interfaces, il est possible de déterminer la concentration C_{ef} en tout point de la configuration étudiée.

La seconde étape correspond à l'homogénéisation et repose sur la condition d'autocohérence suivante : la moyenne du gradient de concentration dans l'inclusion n-couches est égale au gradient de concentration imposé à l'infini lorsque le milieu infini représente le milieu effectif (D_{n+1} est alors remplacé par

D_e et désigne le coefficient de diffusion effectif). Cette condition permet de déterminer D_e en fonction des coefficients de diffusion de chacune des phases. Cette problématique est la même que celle de l'étude de la conduction thermique dans un matériau composite ayant la même morphologie [1]. Les phases sont caractérisées par leur fraction volumique.

Les résultats de ce modèle ont été appliqués à des matériaux à matrice cimentaire en choisissant comme phase 1 les granulats, comme phase 2 les auréoles de transition et comme phase 3 la matrice de ciment. Contrairement au modèle utilisé par Garboczi [2], cette méthode présente l'avantage de pouvoir être appliquée quelque soit la fraction volumique de granulats.

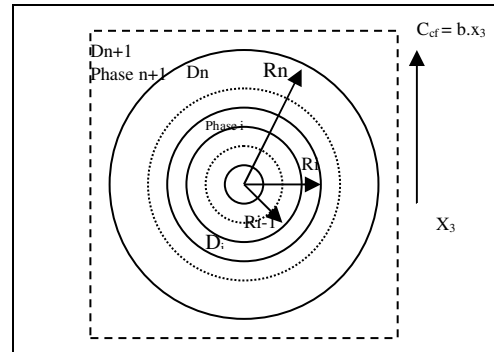


Figure 2 : Inclusion n-phases dans une matrice infinie.

Confrontation Expérience-Modélisation :

Les résultats expérimentaux sont issus de travaux effectués au LCPC [3]. Les matériaux d'étude (mortiers) ont été fabriqués avec différents sables et différentes fractions volumiques de sable (g = 0, 0,25, 0,50), le rapport E/ C est de 0,45. Le coefficient de la pâte de ciment est égal à 5.6 E-12 m².s⁻¹. Les coefficients de diffusion des mortiers sont donnés dans la figure 3.

Les données connues sont donc les fractions volumiques des différentes phases, les coefficients de diffusion dans le sable et la matrice de ciment. Le coefficient de diffusion dans l'auréole de transition est inconnu, il est fixé pour le mortier de fraction volumique de sable 50% et de concentration d'auréole 9%. Le modèle permet alors de prédire de manière satisfaisante les coefficients de diffusion des autres mortiers (figure 3).

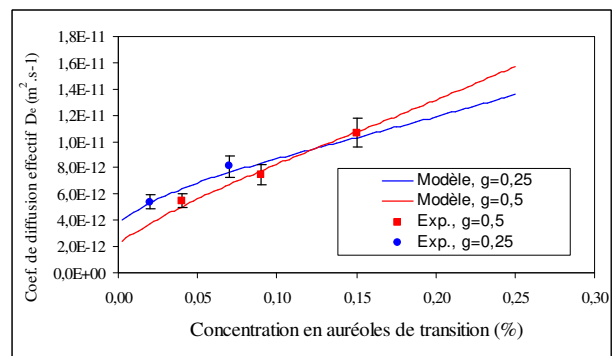


Figure 3 : Coefficient de diffusion effectif des ions chlorures des différents mortiers en fonction de la fraction volumique d'auréoles de transition. Confrontation Expérience – Modélisation.

Conclusion :

L'objectif de notre travail était de prédire plus particulièrement les coefficients de diffusion des ions chlorures dans le béton à partir de ceux des différentes phases constituant ce matériau composite. Les gradients de microstructure peuvent être intégrés dans un modèle de changement d'échelle via l'utilisation d'un modèle autocohérent généralisé (modèle n-phases).

Les coefficients obtenus par ce type de modélisation ont été confrontés à des résultats expérimentaux obtenus sur mortier. Notre étude montre que le modèle de changement d'échelle utilisé ouvre des perspectives quant à la prédiction des coefficients de diffusion des chlorures dans les bétons.

Références :

[1] : E. Hervé, Thermoelastic behaviour of multiply coated inclusion-reinforced composites. A Paraître.
 [2] : E.J. Garboczi, D.P. Bentz, Multiscale Analytical/ Numerical Theory of the Diffusivity of Concrete. Advn Cem Bas Mat, Vol8, pp77-88, 1998.
 [3] : S. Caré, Influence des granulats dans les bétons sur le coefficient de diffusion des ions chlorures par une approche multi - échelle. A Paraître.