

## Diffusivité : Essais de migration sous champ électrique

Le dimensionnement de plusieurs grands ouvrages récents, tels que le tunnel sous la Manche, le pont de Vasco de Gama à Lisbonne par exemple, a été réalisé de manière à garantir une durée de vie supérieure à la centaine d'années. Dans ces ouvrages, tous situés près de la mer, c'est la durabilité vis-à-vis du problème de corrosion des armatures qu'il faut considérer.

Le but de ces travaux pratiques est d'étudier la sensibilité de matériaux à faible impact environnemental à la diffusion des chlorures à l'aide d'un essai accéléré. A cette fin, trois compositions de pâtes de ciment ayant un même rapport E/L (0,47) ont été testés :

1. 100% CEM I
2. 5% CEM I + 75% Laitier de haut-fourneau + 20% Cendres volantes
3. 5% CEM I + 75% Laitier de haut-fourneau + 20% Cendres volantes + 4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (poids du laitier)

### a) Introduction

1. Pourquoi les compositions n°2 et 3 sont définies comme des compositions à plus faible impact environnemental ?

Justifiez votre réponse sur base du tableau ci-dessous :

Matériaux	Emissions liées à la phase de production (kg CO <sub>2</sub> /kg)
Ciment	0,70
Laitier de haut-fourneau	0,16
Cendres volantes	0,39

2. Quel est le rôle du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dans la composition n°3 ?
3. Décrivez l'essai de migration sous champ électrique.

Quels sont ses conditions aux limites ? Quel est l'état hydrique de l'éprouvette testée ?

4. Le flux ionique  $J_i$  est donné de manière générale par l'équation suivante :

$$J_i = -\theta D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \theta \frac{D_i z_i F}{R T} C_i \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \theta D_i C_i \frac{\partial \ln \gamma_i}{\partial x} + C_i V_x$$

Où  $C_i$  est la concentration de l'espèce ionique  $i$ ,  $\theta$  la teneur volumique en eau dans les pores,  $\varphi$  le potentiel électrique,  $D_i$  le coefficient de diffusion,  $z_i$  la valence de l'espèce,  $F$  la constante de Faraday,  $R$  la constante des gaz parfait,  $T$  la température,  $\gamma_i$  le coefficient d'activité chimique et  $V_x$  la vitesse du fluide.

Expliquez la signification physique de chacun de ces termes.

Comment pouvez-vous simplifier cette équation pour vos cas d'études ?

## b) Expérimentation

Les échantillons testés dans le cadre de vos travaux pratiques ont un âge de 28 jours et 1 an.

- Le groupe A travaillera sur les échantillons âgés de 28 jours
- Le groupe B travaillera sur les échantillons âgés de 1 an

### 1. Mesure du front de pénétration des chlorures :

- Démontez une cellule pour chaque composition.
- Mesurez l'épaisseur des éprouvettes.
- Réalisez un essai de fendage sur chaque échantillon.
- Appliquez une solution d'AgNO<sub>3</sub> sur chaque face. Quel est son rôle ?
- Mesurez la profondeur de pénétration (environ 10 points de mesure en évitant les effets de bord).

### 2. Sur base du front de pénétration, déterminez le coefficient de diffusion des chlorures $D_{nssm}$ en régime transitoire à l'aide de l'équation de Nernst-Einstein ci-dessous :

$$D_{nssm} = \frac{R \cdot T \cdot L}{Z \cdot F \cdot \Delta E} \cdot \frac{(X_d - \alpha \cdot \sqrt{X_d})}{\Delta t} \quad \text{avec} \quad \alpha = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T \cdot L}{Z \cdot F \cdot \Delta E}}$$

Avec  $X_d$  est le front de pénétration des chlorures (m),  $\Delta t$  la durée de l'essai (s),  $R$  la constante des gaz parfaits (8.314 J/mol.K),  $T$  la température (K),  $L$  l'épaisseur de l'éprouvette (m),  $Z$  la valence des ions de chlorures (1),  $F$  la constante de Faraday (96500 J/V mol),  $\Delta E$  la différence de potentiel (V) and  $\xi$  une constante dépendant de la concentration en chlorure (0.764).

### 3. Commentez vos résultats par groupe.

### 4. Expliquez comment la valeur de $D_{nssm}$ va être impactée par un accroissement de la tortuosité ?

### 5. Les essais que vous venez de réaliser concerne des pâtes de ciment. Dans certains cas, le passage de la pâte de ciment au mortier peut se faire à l'aide d'une loi de dilution donnée ci-dessous :

$$D_{nssm} = D_{nssm}^{p\grave{a}te} (1 - V_{agr\acute{e}gats})$$

Comment la valeur de  $D_{nssm}$  va être impactée par l'ajout d'agrégats (40%) ?

Quelles sont les limites de cette approche au vu des modifications de la microstructure de la pâte induites par l'ajout d'agrégats (sable, granulats) ?

### 6. Dans certains cas, le matériau peut être fissuré. Déterminez l'impact d'une fissure de 150 $\mu\text{m}$ et de 50 $\mu\text{m}$ sur la diffusion des chlorures à l'aide de l'équation ci-dessous :

$$D_{nssm} = \frac{A_c D_c + A_{un} D_{nssm,un}}{A_c + A_{un}}$$

Dans cette équation, la fissure est considérée délimitée par deux plans parallèles aux extrémités. Suite à l'application d'un champ électrique,  $D_c$  est calculé à partir de la mobilité électrique des ions de chlorures  $u_i$  dans une solution ( $7.9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ) et la relation de Nernst-Einstein. Sa valeur est égale à  $2 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Cette valeur est valable pour une solution infiniment diluée.

Quels sont les paramètres affectant  $D_{nssm}$  qui ne sont pas pris en compte dans cette relation ? De quelles manières vont-ils modifier la valeur de  $D_{nssm}$  ?

Discutez de la fissuration des échantillons du TP et de son impact sur la diffusion des chlorures, en mettant en commun les résultats de vos deux groupes A et B.

### c) Modélisation

Dans cette partie, nous allons revenir sur les mécanismes de diffusion des ions au travers d'une solution, d'un milieu poreux, et la prise en compte de leur interaction avec la matrice cimentaire. Ensuite, le calcul du coefficient de diffusion en régime stationnaire sera réalisé et appliqué à un béton dont le rapport E/C varie (0,3 ; 0,45 et 0,60).

#### 1. Diffusion des ions en solution

On suppose pour l'instant qu'il n'y a pas d'interaction entre les chlorures et la matrice cimentaire. Nous nous plaçons dans la porosité du béton et considérons dans cette partie la diffusion des chlorures dans le liquide interstitiel. Le flux d'ions  $J$  traversant une surface unité de solution interstitielle est donné par la première loi de Fick :

$$J = -D \cdot \text{grad } C \quad \text{Soit en uniaxial : } J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

Où  $C$  est la concentration en ions  $\text{Cl}^-$  en solution en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $J$  est le flux en  $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  de solution interstitielle et  $D$  le coefficient de diffusion en  $\text{m}^2/\text{s}$ , que l'on supposera constant pour un matériau et une espèce ionique donnés.

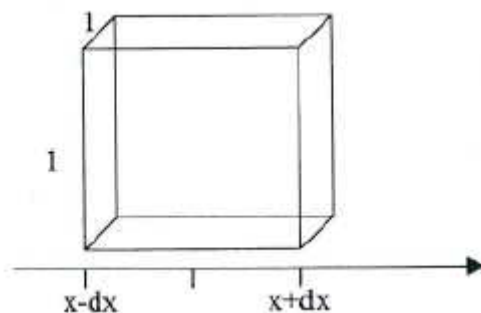


Figure 1. Volume élémentaire

En écrivant la conservation de la masse d'ions sur un volume élémentaire (Figure 1), montrez que l'on obtient la seconde loi de Fick (en uniaxial) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

#### 2. Diffusion dans un milieu poreux

Le béton est en fait un milieu poreux de porosité  $p$ . On supposera que si l'on fait une coupe, la porosité surfacique (rapport de la surface des pores à la surface totale) est égale à  $p$ . On écrit le flux  $J_b$  d'ions chlorures passant à travers une surface unité de béton de la manière suivante :

$$J_b = -D_e \cdot \text{grad } C$$

Où  $D_e$  est le coefficient de diffusion effectif en  $\text{m}^2/\text{s}$  et  $C$  est la concentration en ions  $\text{Cl}^-$  en solution en  $\text{kg}/\text{m}^3$  de solution.

Montrez que l'on a :

$$D_e = p \cdot D$$

### **Fin de la séance de travaux pratiques**

1. **Nettoyer** les capteurs et les éprouvettes (au sec).
2. **Ranger** le matériel.

Cette séance de travaux pratiques donnera lieu à un rapport à remettre **à la fin de la séance**.