

M2R MAISES et ECD : Transferts couplés dans les milieux poreux – Examen

Partie A

Exercice A-1 : Isothermes de sorption désorption

Lors de la construction du logement individuel, le maître d'ouvrage a prés-sélectionné deux isolants thermiques : L'isolant de fibre en bois et la laine de roche. Les isothermes de sorption désorption correspondantes à chacun de ces isolants sont indiquées sur la figure 1.

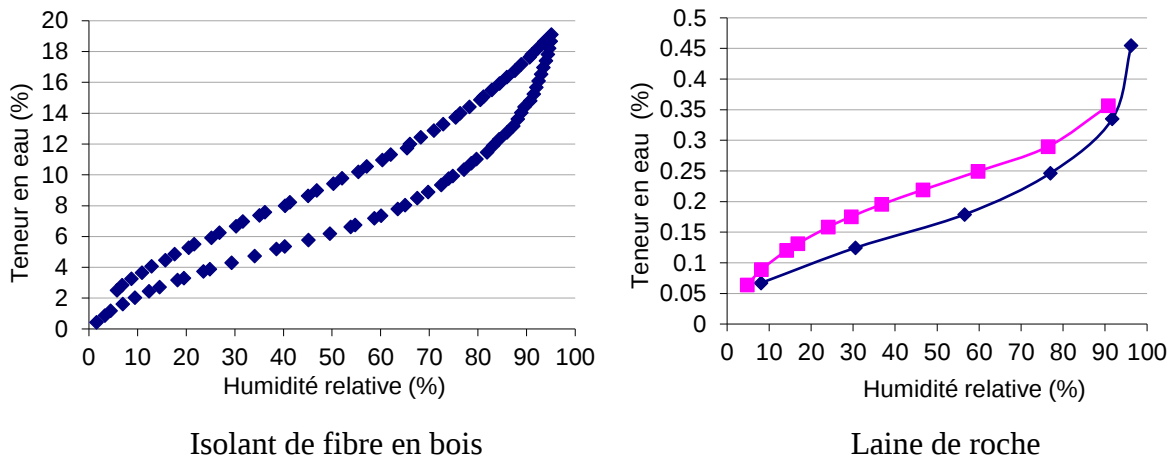


Figure 1 : Isotherme de sorption désorption des isolants fibreux

1. Indiquer par un schémas simple le chemin d'adsorption et celui de désorption sur les courbes isothermes (figure 1). Argumentez votre réponse
2. Expliquez la différence entre les deux isothermes présentées sur la figure 1.
3. Quel est l'isolant qui présente le fort risque de dégradation ? et quels sont les facteurs de dégradations les plus affectants dans ce cas ?
4. En s'appuyant sur ces deux dernières réponses donner votre avis et argumenter le bon choix de l'isolant qui pourra servir comme référence pour le maître d'ouvrage.

Exercice A-2 : Transfert vapeur : diffusion de Fick

On s'intéresse au séchage d'une dalle en béton initialement saturée en eau (teneur en eau initiale $C_0 = 200 \text{ kg d'eau par m}^3$). Si le séchage est trop rapide (temps sec, vent ...), il y a risque de fissuration en surface (entraînant la réduction de la durabilité de la dalle). La dalle en béton est considérée semi-infinie afin de simplifier le problème. La concentration en eau (sous forme de vapeur) dans l'air est $C_{\text{air}} = 0,01 \text{ kg d'eau par m}^3$. Le coefficient de diffusion effectif dans le béton est $D = 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. On considère l'équation de diffusion suivante pour déterminer l'évolution de la teneur en eau :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

En surface de la dalle, la concentration est notée $C(x=0, t) = C_s(t)$. La condition aux limites à la surface est de type convective. Ainsi, le flux d'eau qui s'évapore en surface de la dalle s'écrit :

$$\vec{J}_e(x, t) \Big|_{x=0} = -D \text{grad} C(x, t) \Big|_{x=0} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad \vec{x} = \alpha (C_{\text{air}} - C_s(t)) \vec{x} \quad (2)$$

Où α est une constante de proportionnalité qui dépend des conditions météorologiques (température et vitesse de l'air ...).

Par conséquent, la concentration en surface de la dalle $C_s(t)$ n'est pas forcément égale à la concentration en eau dans l'air C_{air} . On a, bien entendu, $C_s(t=0) = C_0$.

l'expression suivante est solution du problème :

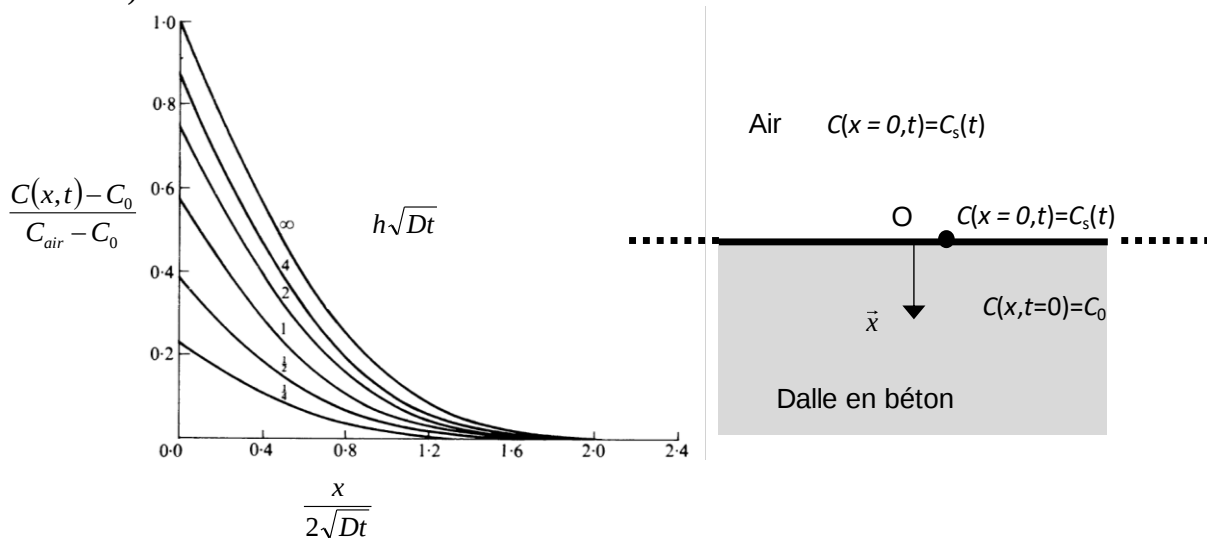
$$\frac{C(x,t)-C_0}{C_{air}-C_0} = \left[\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) - \exp(hx + h^2 Dt) \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} + h\sqrt{Dt}\right) \right] \quad (3)$$

$$\operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_y^{\infty} e^{-\xi^2} d\xi$$

Avec $h = \alpha/D$ et

- 1) Quelle est l'unité de α ?
- 2) Le risque de fissuration de la dalle est d'autant plus important que le gradient de la concentration est important.
 - a) A partir de la figure donnée ci-dessous, justifiez que le gradient de la concentration est maximal en surface.
 - b) A quel instant est-il atteint ?
 - c) Montrez que sa valeur maximale vaut (en valeur absolue) $g^{\max} = h(C_0 - C_{air})$.
 - d) Le séchage de la dalle en béton génère des contraintes de traction σ égale à $\sigma = E\beta g^{\max}$, avec $\beta = 10^{-9}$ SI et $E = 30$ GPa (module de Young du béton). La résistance en traction du béton est $f_t = 3$ MPa. Pour quelle valeur de α aura-t-on fissuration ($\sigma = f_t$) ?
- 3) Pour $\alpha = 3 \cdot 10^{-10}$ SI, calculez la valeur de la concentration en eau dans la dalle en béton (en vous aidant de la figure ci-dessous) pour
 - a) $x = 2$ cm à 1 an, 10 ans et 100 ans
 - b) $x = 10$ cm à 1 an, 10 ans et 100 ans
 - c) $x = 50$ cm à 1 an, 10 ans et 100 ans
 Commentez ces résultats.

La figure ci-dessous donne des valeurs de la concentration (les nombres sur les courbes sont les valeurs de $h\sqrt{Dt}$) :



Partie B Carbonatation en conditions insaturées

Question 1

La corrosion des armatures constitue le principal risque pour la durabilité des ouvrages en béton armé.

Expliquer en quoi la carbonatation est importante pour la corrosion (et rappeler les principaux mécanismes mis en jeu dans cette relation).

Question 2

On peut estimer le temps nécessaire à l'initiation de la corrosion des armatures en supposant que cette dernière se déclenche lorsque le front de carbonatation atteint les armatures. Pour cela on peut utiliser le modèle de Papadakis. La profondeur carbonatée x_c évolue linéairement en fonction de la racine carrée du temps t :

$$x_c(t) = k\sqrt{t} \text{ avec } k = \sqrt{2D_{CO_2}^c \frac{[CO_2]^0}{[CH]^0 + 3[CSH]^0}}$$

Où $D_{CO_2}^c$ est le coefficient de diffusion du CO_2 dans le matériau carbonaté (en m^2/s) ; $[CO_2]^0$ est la concentration en CO_2 dans l'air (en mol/m^3) ; $[CH]^0$ et $[CSH]^0$ sont les concentrations en portlandite et C-S-H dans le matériau cimentaire non carbonaté (en mol/m^3).

Le coefficient de diffusion $D_{CO_2}^c$ peut être estimé au moyen de fonctions calées sur la base de résultats expérimentaux, par exemple :

$$D_{CO_2}^c = D_{CO_2}^a \phi^\alpha (1 - S)^\beta$$

Où $D_{CO_2}^a$ est le coefficient de diffusion du CO_2 dans l'air (en m^2/s) ; ϕ et S sont la porosité du béton et son degré de saturation (sans unité) ; α et β sont deux constantes. Le degré de saturation du béton S peut être calculé au moyen de la loi de van Genuchten :

$$S = \left[1 + \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m}$$

Où m et P_0 sont deux constantes positives. La loi de Kelvin-Laplace permet quant à elle de calculer la pression capillaire P en fonction de l'humidité relative (HR) :

$$P = -\rho \frac{RT}{M} \ln(HR)$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau (kg/m^3) ; R est la constante des gaz parfaits ($J/mol/K$) ; T est la température absolue (K) ; M est la masse molaire de l'eau (kg/mol) et HR est l'humidité relative.

Calculer le coefficient de diffusion $D_{CO_2}^c$, pour cela on prendra :

- $D_{CO_2}^a = 1,6 \times 10^{-5} m^2/s$; $\phi = 0,16$;
- $\alpha = 1,8$ et $\beta = 3,0$; $m = 0,45$; $P_0 = 25 \times 10^6 Pa$;
- $\rho = 1000 kg/m^3$; $R = 8,31 J/mol/K$; $T = 293,15 K$; $HR = 0,54$; $M = 0,018 kg/mol$.

Question 3

En supposant que l'enrobage des armatures est de 3 cm, **combien d'années faudra-t-il pour que le front de carbonatation atteigne cette profondeur ? Quel enrobage devrait-on choisir pour que la carbonatation atteigne les armatures à 50 ans d'exposition ?** On prendra :

- $[CH]^0 = 1300 \text{ mol/m}^3$; $[CO_2]^0 = 0,014 \text{ mol/m}^3$; $[CSH]^0 = 800 \text{ mol/m}^3$.

Question 4

Pour un enrobage de 3 cm, quelle devrait être la valeur maximale du coefficient de diffusion pour que la carbonatation n'atteigne pas les armatures avant 50 ans ? Utiliser un ciment composé est un bon moyen pour réduire le coefficient de diffusion du béton. **Est-ce une bonne idée du point de vue de la carbonatation ? Expliquer pourquoi ?**

Question 5

De manière alternative, un essai de carbonatation accélérée peut être effectué en laboratoire pour estimer la durée de service des ouvrages. En supposant que l'essai a été effectué avec une concentration en CO_2 égale à 50% et que les résultats peuvent se mettre sous la forme suivante :

$$x_c(t) = k\sqrt{t}$$

Où x_c est la profondeur carbonatée mesurée à l'instant t . **Calculer le temps nécessaire pour que le front de carbonatation atteigne les armatures sur l'ouvrage réel.** On supposera que ce dernier est soumis aux mêmes conditions environnementales et on prendra les valeurs suivantes :

- Enrobage = 30 mm
- Concentration en CO_2 dans l'atmosphère = 0,04%
- Coefficient $k = 7,5 \text{ mm/j}^{0,5}$

En supposant que le front de carbonatation ne doit pas atteindre les armatures avant 50 ans, **quelle doit être la valeur du coefficient k à ne pas dépasser en carbonatation accélérée ?**

_____Partie C_____

Vous trouverez ci-joint un document (solution) qui explique et quantifie l'osmose.

Il vous est demandé de résumer une explication de la façon la plus compacte des raisons d'existence d'un tel phénomène. Il est demandé de travailler sur le pourquoi et non le comment en usant des équations ou formules.