

Distribution spatiale de la teneur en eau et du degré de saturation d'un voile en béton ordinaire

Nabil Issaadi, Rafik Belarbi, Abdelkarim Aït-Mokhtar, Ameer El Amine Hamami

Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement : LaSIE UMR CNRS 7356, Université de La Rochelle, nabil.issaadi@univ-lr.fr

RÉSUMÉ. L'objectif principal de cette communication est d'exposer une méthodologie expérimentale et numérique de l'évaluation de la distribution spatiale de la teneur en eau d'un élément en béton à l'échelle 1. Après présentation du cas d'étude et du modèle de transfert utilisé, sont présentés les différents essais réalisés sur carottes issues d'un voile en béton réalisé au laboratoire dans le but d'évaluer la variabilité spatiale de quelques propriétés gouvernant le transfert et le stockage de la vapeur d'eau : perméabilité à la vapeur et isotherme de sorption. Aussi, cette partie nous a permis de mettre en exergue la corrélation spatiale des champs étudiés et d'entreprendre, dans un second lieu, des simulations 2D de transfert hygrothermique avec prise en compte de la variabilité spatiale des deux propriétés citées. Cela a été mis en œuvre en adoptant une approche probabiliste. Elle est basée sur la génération, par la décomposition de Karhunen-Loève, de réalisations de champs aléatoires spatialement corrélés. Les résultats montrent une distribution hétérogène, suivant la surface de la paroi, de la teneur en eau et du degré de saturation.

ABSTRACT. The main objective of this communication is to expose an experimental and numerical methodology to evaluate the spatial distribution of the water content in concrete wall. After presentation of the considered case study and the adopted model, characterization of the concrete spatial variability was performed. This latter included a significant number of tests allowing the assessment of some properties that govern the transfer and storage of water vapour (water vapour permeability and water vapour sorption isotherm). For this purpose, a concrete wall was built at laboratory from which specimens were periodically cored and tested. The obtained results allow quantifying the spatial variability of some concrete properties. They also allow highlighting the spatial correlation length of the studied fields and to undertake 2D hygrothermal transfer simulation by taking into account the spatial variability of the two cited properties. This approach is based on generating, by using Karhunen-Loeve expansion, the random fields spatially correlated. Results showed a heterogeneous distribution, along the surface of the wall, of the water content and the saturation degree.

MOTS-CLÉS : Béton, teneur en eau, variabilité spatiale, propriétés hygrothermiques, longueur de corrélation, champs aléatoires.

KEY WORDS: Concrete, water content, spatial variability, hygrothermal properties, correlation length, random fields.

Les matériaux cimentaires et plus particulièrement les bétons, qui sont de nos jours les matériaux les plus utilisés en construction, possèdent une microstructure très complexe dont la forme est hétérogène conduisant à des propriétés physiques et mécaniques très aléatoires. Ces propriétés sont affectées par des phénomènes d'origine chimique (hydratation) ou physique (transfert de chaleur, d'humidité ou d'agents agressifs). Ces derniers peuvent considérablement varier dans l'espace occupé par le béton en fonction de sa fabrication, sa mise en œuvre et sa conservation. Cette variabilité spatiale affecte à son tour le comportement du matériau en général et, plus particulièrement, les mécanismes de transfert. Quelques études ont été consacrées à l'évaluation de la corrélation spatiale de résultats obtenus sur des structures en béton [DEL 12 ; O'CO 13].

Le présent travail se focalise sur l'étude de la distribution spatiale de la teneur en eau d'un voile en béton à l'échelle 1. En raison de l'hétérogénéité du matériau étudié, la variabilité spatiale de quelques propriétés parmi les plus influentes sur son comportement hygrothermique a été évaluée et prise en compte dans les simulations.

2. Cas d'étude

Le cas d'étude traité est illustré sur la figure 1. Nous considérons un voile en béton de 2 m de hauteur, 2 m de largeur et 20 cm d'épaisseur avec des conditions initiales de $T_0=20^\circ\text{C}$ et $HR_0=50\%$ sous un climat intérieur contrôlé à $T_1=20^\circ\text{C}$ et $HR_1=65\%$ et sous un climat extérieur chaud et humide à $T_2=40^\circ\text{C}$ et $HR_2=80\%$.

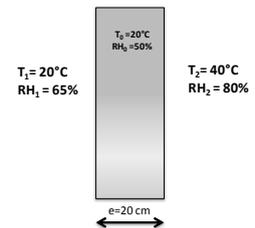


Figure 1. Configuration étudiée

La distribution spatiale de la teneur en eau du voile est obtenue par simulation numérique en utilisant le modèle développé au laboratoire (éq. 1 et 2). La formulation mathématique de ce dernier est la suivante :

$$C_m \rho_s \frac{\partial P_v}{\partial t} = \text{div} (K_m \nabla P_v + K_T \nabla T) \quad (1)$$

$$C_p \rho_s \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div} (\lambda \nabla T + \alpha \nabla P_v) + L_v \rho_s \sigma C_m \frac{\partial P_v}{\partial t} \quad (2)$$

$C_m = (1/P_{vsat})(\partial U/\partial HR)$ est la capacité de stockage d'humidité en $[kg/(kg.Pa)]$; $K_m [kg/(m.s.Pa)]$ représente la perméabilité à la vapeur d'eau ; $K_T [Kg/(m.s.K)]$ est la conductivité de l'eau liquide due à un gradient de température ; $\alpha [m^2/s]$ représente le coefficient de convection de chaleur. $\lambda [W/m.K]$ et $C_p [J/(kg.K)]$ sont respectivement la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

3. Caractérisation expérimentale

Afin de respecter l'hétérogénéité du matériau béton et d'obtenir une distribution plus fine de la teneur en eau, nous avons mené une campagne expérimentale d'évaluation des deux paramètres gouvernants le transfert et le stockage de la vapeur d'eau, à savoir la perméabilité à la vapeur et l'isotherme de sorption. Pour accéder à ces données, un voile expérimental en béton de 1,20 m de largeur, 2 m de hauteur et 0,15 m d'épaisseur a été confectionné au laboratoire. Des prélèvements de carottes ont été effectués suivant six colonnes verticales du voile (Figure 2).

Le béton utilisé est à base de ciment Portland CEMI 52.5 N. Il a été préparé conformément aux prescriptions de la norme NF EN 206-1. Sa composition est récapitulée dans le tableau 1. Les essais de compression à 28 jours donnent en moyenne une résistance mécanique de 40 MPa.

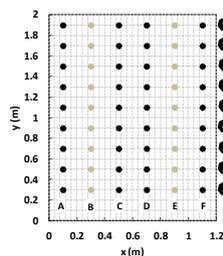


Figure 2. Position des carottes

Tableau 1. Composition du béton voile

Constituants	kg/m ³
Ciment CEM1 52.5N	350
Gravillon 10/14	1201
Sable 0/4	762
Eau	211,8
Superplastifiant	7

3.1. Perméabilité à la vapeur

La variabilité spatiale de la perméabilité à la vapeur d'eau est évaluée sur les échantillons prélevés sur les quatre colonnes (A, C, D et F) du voile expérimental (36 échantillons). Les essais sont réalisés en utilisant le dispositif Gravitest[®] suivant la méthode de la coupelle dont le mode et les conditions opératoires sont les mêmes que ceux décrits dans [ISS 15]. Les valeurs de perméabilité à la vapeur moyenne, de son écart-type, du coefficient de variation, du minimum et maximum en fonction de la colonne de prélèvement sont résumées dans

le tableau 2. Ces valeurs varient entre une perméabilité de $0,2 \cdot 10^{-12}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ et maximum de $\delta_{p,\text{max}} = 3,6 \times 10^{-12}$ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$. La figure 3 montre l'étendue de cette variabilité observée sur les 36 échantillons prélevés sur le voile ainsi que les distributions de probabilité pouvant lui être associées.

Tableau 2. Perméabilité à la vapeur : données statistiques

Colonne	A	C	D	F	Voile complet
Moyenne ($\times 10^{-12}$)	2,45	1,97	1,87	2,09	2,08
Écart-type ($\times 10^{-12}$)	0,74	0,27	0,48	0,45	0,54
Coefficient de variation (%)	20,22	14,00	25,79	21,44	25,94
Minimum ($\times 10^{-12}$)	1,60	1,60	1,51	1,37	1,37
Maximum ($\times 10^{-12}$)	3,60	2,40	3,02	2,89	3,60

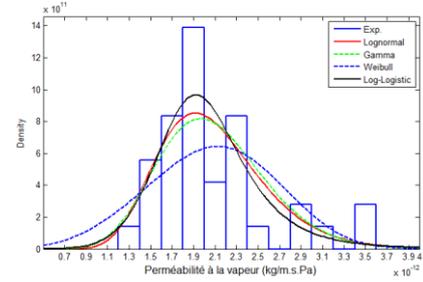


Figure 3. Distribution de la perméabilité à la vapeur

3.2. Isotherme de sorption

La variabilité spatiale des isothermes d'adsorption et de désorption de la vapeur d'eau est évaluée sur les échantillons prélevés selon la colonne A du voile expérimental (9 échantillons). Les essais sont réalisés à l'aide du dispositif Belsorp Aqua-3[®] selon le même protocole décrit dans [ISS 15] et ce pour tous les échantillons. La figure 4 présente les isothermes de sorption de la vapeur d'eau à 20 °C des bétons prélevés suivant la colonne A. Ce résultat vient illustrer une dispersion plus importante au voisinage des humidités relatives les plus élevées. En effet, le coefficient de variation au voisinage de 5% d'humidité relative (Tableau 4) est d'environ 73%, plus important que celui obtenu au voisinage de 95% d'humidité relative (24%). De plus, il montre une importante variabilité spatiale de la teneur en eau en désorption en comparaison avec celle mesurée en sorption.

Figure 4. Variabilité des isothermes de sorption et de désorption suivant la colonne A à 20°C

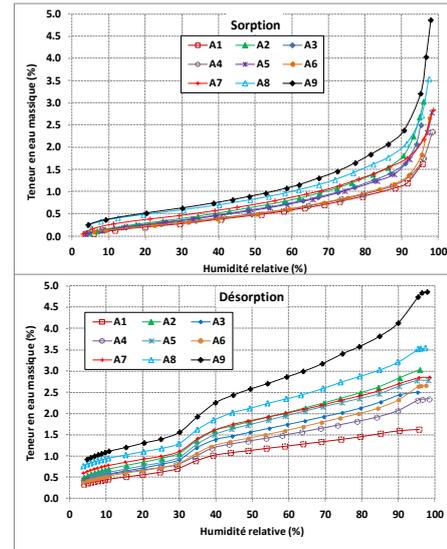


Tableau 4. Isotherme de sorption : données statistiques

	HR (%)	5	10	30	50	70	95
Adsorption	Moyenne (%)	0,12	0,21	0,43	0,66	1,05	2,35
	Écart-type (%)	0,09	0,11	0,12	0,17	0,22	0,56
	Coefficient de variation (%)	72,98	53,83	28,47	25,73	21,00	23,93
Désorption	Moyenne (%)	0,56	0,69	1,02	1,72	2,12	2,89
	Écart-type (%)	0,19	0,22	0,27	0,44	0,54	0,87
	Coefficient of variation (%)	33,41	31,38	26,55	25,38	25,58	30,06

4. Approche de modélisation-Prise en compte de la variabilité spatiale

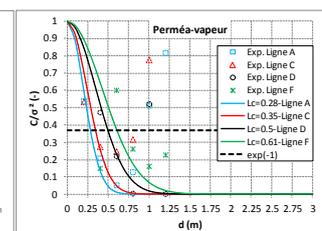
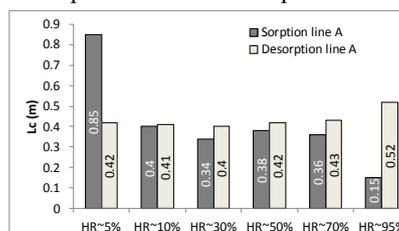
La prise en compte de la variabilité spatiale des propriétés des matériaux dans la prédiction de leur comportement hygrothermique nécessite le passage par la génération de champs aléatoires. Dans notre cas, nous supposons que nos champs aléatoires sont spatialement corrélés suivant la fonction de covariance donnée dans l'équation 3.

$$C(x, y) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{L_c^2}\right) \quad (3)$$

$C(x,y)$ représente la covariance entre les deux points x_i et x_j . Les vecteurs x_i et x_j donnent la position des nœuds correspondants. σ^2 est la variance du champ aléatoire, tandis que le paramètre L_c correspond à la longueur de corrélation. Elle est déterminée à partir d'un variogramme. La figure 5 présente une comparaison des longueurs de corrélation en adsorption-désorption suivant la colonne A et leur évolution en fonction du palier d'humidité relative considérée ainsi que celles de la perméabilité à la vapeur.

Figure 5. Identification de la longueur de corrélation

La démarche proposée dans cet article est basée sur la génération de réalisations indépendantes de champs aléatoires spatialement corrélés. Spanos et Ghanem



[SPA 02] ont montré que la décomposition de Karhunen-Loève était la plus performante pour parvenir à cette fin. La décomposition modale de Karhunen-Loève propose une décomposition d'un champ aléatoire $f(\vec{x}, \omega)$ en l'écrivant sous la forme d'une série infinie (équation 4) :

$$f(\vec{x}, \omega) = \bar{f}(\vec{x}) + \sum_{i=0}^{+\infty} \sqrt{\lambda_i} \phi_i(\vec{x}) \xi_i(\omega) \quad (4)$$

Avec $\xi_i(\omega) \sim \mathcal{N}(0,1)$ sont des variables aléatoires centrées réduites dont découle la dépendance stochastique. (λ_i, ϕ_i) sont les valeurs et vecteurs propres qui gouvernent la dépendance spatiale du champ.

5. Résultats et discussion

Nous nous proposons de suivre l'évolution de la teneur en eau et du degré de saturation en 9 points de la surface du voile à une épaisseur de 0,18 m suivant deux lignes : verticale (points : 1 ; 4 ; 5 ; 8 et 9) et horizontale (points : 2 ; 3 ; 6 et 7). La figure 6 illustre une comparaison de deux résultats déterministe et probabiliste.

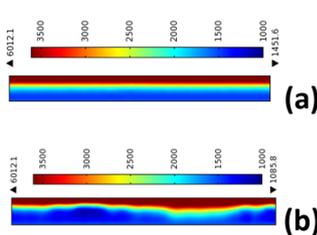


Figure 6. Distribution de la pression de vapeur selon une coupe suivant l'épaisseur du voile suivant deux approches : déterministes (a) et probabiliste (b).

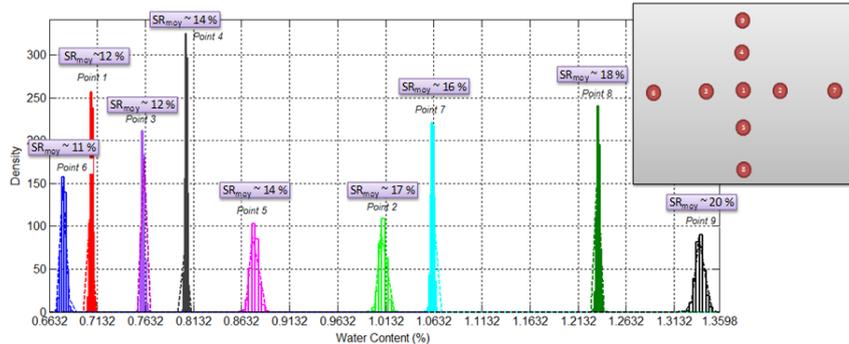


Figure 7. Distribution de la teneur en eau aux différents points de suivi pour $L_c=0,3m$

La figure 7 donne la distribution de la teneur en eau suivant les 9 points de suivi définis précédemment. Ce résultat est obtenu après 1000 simulations numériques en considérant à chaque fois une réalisation du champ aléatoire de perméabilité à la vapeur et les paramètres associés aux modèles GAB et/ou GDW pour obtenir la teneur en eau correspondante. Nous remarquons une distribution non uniforme de la teneur en eau suivant la l'épaisseur (Figure 6) et suivant la surface (Figure 7) à l'instar des résultats d'une simulation déterministe. En effet, la teneur en eau du voile peut varier de 0,66% (point 6) à 1,36% (point 9). Ce résultat présente aussi le degré de saturation moyen en chaque point de suivi qui varie entre 11 à 20% dans ce cas. Il montre une distribution hétérogène de ce dernier qui aura un impact inévitable sur la durabilité du matériau avec une possible dégradation locale qui est difficilement identifiable lors d'une simulation déterministe.

6. Conclusion

Dans cet article, une campagne expérimentale de caractérisation de la variabilité spatiale de quelques propriétés de transferts parmi les plus influentes sur le comportement hygrothermique du béton a été présentée. Pour cela, deux propriétés ont été retenues. Il s'agit de la perméabilité à la vapeur et l'isotherme de sorption de la vapeur d'eau. A l'issue de cette campagne expérimentale, nous avons noté que :

- La perméabilité à la vapeur varie entre $\delta_{pmin}=1,37 \times 10^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ et $\delta_{pmax}=3,6 \times 10^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ avec un écart type de $2,08 \times 10^{-12} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$. Le coefficient de variation obtenu sur tous le voile est de
- Une augmentation de la variabilité du taux de sorption avec le palier d'humidité relative considéré est enregistrée. De plus, une dispersion plus importante est relevée en désorption en comparaison avec celle obtenue en adsorption.

Après prise en compte de cette variabilité lors de la simulation numérique, cette étude a fait ressortir les limites des approches déterministes et l'importance du recours aux approches probabilistes pour prédire le comportement hygrothermique des matériaux poreux de construction. Elle a mis en évidence l'importance de la prise en compte de la combinaison des deux variabilités (perméabilité à la vapeur, isotherme de sorption).

Références

- [DEL 12] De Larrard T., Benboudjema F., Colliat J. B., Torrenti J. M., « Influence of the spatial variability of leaching kinetics parameters on the lifespan of a concrete structure », *European Journal of Environment and Civil Engineering*, vol. 15, 2012, p. 606-624.
- [ISS 15] Issaadi N., Nouviaire A., Belarbi R., Aït-Mokhtar A., « Moisture characterization of cementitious material properties: Assessment of water vapor sorption isotherm and permeability variation with ages », *Construction and Building Materials*, vol. 83, 2015, p. 237-247.
- [O'CO 13] O'Connor A. J., Kenshel O., « Experimental evaluation of the scale of fluctuation for spatial variability modeling of the chloride-induced reinforced concrete corrosion », *Journal of Bridge Engineering*, vol. 18, 2013, p. 3-4.
- [SPA 02] Spanos P. D., Ghanem R. G., *Stochastic finite element, a spectral approach*, (Revised ed.), Dover Publication, 2002.