

Investigation de l'impact de la morphologie réelle d'un mortier de polystyrène sur les transferts hydriques

Maroua Maaroufi^{1,2}

¹LMT, ENS Cachan, CNRS, Université Paris-Saclay, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France

²LaSIE, Université de La Rochelle, CNRS, UMR 7356, Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle, France

RESUME Les transferts d'humidité dans les matériaux de construction sont de grande importance à cause de leur impact sur la durabilité mais aussi sur le confort des habitants. De plus, les matériaux de construction sont généralement fortement multiphasiques et hétérogènes. Une attention particulière doit donc être portée à leur modélisation pour une meilleure prédiction du comportement énergétique des bâtiments. Dans ce travail, l'originalité est d'élaborer un modèle de transferts couplés de chaleur et d'humidité, en incluant le phénomène d'hystérésis d'adsorption et de désorption d'eau et en utilisant les microstructures réelles du matériau d'étude. Les résultats numériques démontrent que la prise en compte des hétérogénéités du matériau à travers des volumes 3D reconstruits permettait une meilleure appréhension de son comportement hygrothermique.

Mots-clefs Transferts hygrothermiques, Hystérésis d'adsorption et de désorption d'eau, Simulations 3D, Mortier de polystyrène

I. INTRODUCTION

De nos jours, l'humidité à l'intérieur des bâtiments revêt une importance égale à la température dans les ambiances habitables, puisqu'elle a un impact tout aussi significatif sur la qualité de l'air intérieur [1]. L'humidité a une influence non négligeable sur la durabilité des constructions, et représente une des causes majeures de leurs dégradations. Elle influence également les performances énergétiques réelles des bâtiments [2] et augmente les écarts entre les mesures et les résultats de simulations numériques des transferts couplés de chaleur et d'humidité. La réponse à cette problématique est nécessaire pour une prédiction plus précise des comportements hygrothermiques des bâtiments, et une meilleure évaluation de leur durabilité. En effet, l'accumulation d'eau dans la porosité des matériaux influence considérablement leurs propriétés de transport. L'étude des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein des matériaux de construction est ainsi nécessaire dans tout travail de génie civil, puisqu'elle permet une appréhension plus fine du comportement du bâtiment.

Le béton de polystyrène est un matériau où les agrégats ont été remplacés par du polystyrène expansé recyclé. En plus de limiter la surexploitation des ressources naturelles et d'aider à la protection de l'environnement, il présente d'excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique qui améliorent le confort des usagers. Toutefois, c'est un matériau peu connu et ses propriétés ne sont pas largement disponibles dans les bases de données. Il a quand même démontré de bonnes propriétés thermiques, une bonne résistance à l'humidité, et une meilleure durabilité [3-5]. Le béton de polystyrène est un matériau multiphasique et l'investigation de sa microstructure démontre une forte hétérogénéité au niveau des propriétés hygrothermiques des phases qui le constituent [6]. Ainsi, son comportement macroscopique est fortement influencé par sa géométrie, et il est judicieux d'étudier les interactions à l'échelle microscopique en considérant une géométrie plus représentative de ces hétérogénéités, dans le but de décrire le comportement réel du matériau. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'étude tridimensionnelle des transferts d'humidité dans un mortier à base de polystyrène en considérant sa géométrie réelle qui permet d'appréhender la complexité de sa microstructure. Les géométries 3D seront obtenues à l'aide de la microtomographie aux rayons X disponible au LMT-Cachan, et subiront un traitement d'images adapté avant d'être importées dans les outils de simulation. Le modèle de transferts d'humidité sera présenté, et les résultats numériques obtenus seront présentés.

II. MATERIAUX ET METHODES

Dans cette partie, la formulation du matériau d'étude sera présentée dans un premier temps. Par la suite, le modèle élaboré de transferts hydriques qui permet de considérer l'influence du phénomène d'hystérésis sur la valeur de la teneur en eau. Finalement, les résultats des simulations numériques sur les microstructures réelles seront présentés.

Le matériau d'intérêt dans ce travail est un mortier de polystyrène dont la composition est donnée dans le tableau 1 [6]. C'est un mortier à base de ciment CEMIII et de polystyrène expansé, en respectant un ratio massique d'eau sur ciment est égal à 0,35. La densité du matériau obtenu est égale à 540kg/m³, ce qui le place dans la catégorie des matériaux légers.

TABLEAU 1. Composition du mortier de polystyrène

Matériaux	Ratio volumique
Ciment	30%
Polystyrène expansé	53%
Eau	17%

Le modèle de transferts d'humidité élaboré dans ce travail repose sur l'équation de conservation de la masse et utilise la teneur en eau comme moteur de transfert. Il est explicité dans les travaux de Maaroufi [7] et s'écrit selon l'équation (1) ci-dessous.

$$\rho_s \frac{\partial \omega}{\partial t} - \operatorname{div} \left[\frac{D_m}{c_m} (\nabla \omega) \right] = 0 \quad (1)$$

ρ_s (kg/m³) est la masse volumique du matériau, ω (kg/kg) est la teneur en eau massique, D_m (kg/m.s) est le coefficient de diffusion de l'humidité et C_m (-) est la capacité de stockage d'humidité du matériau obtenue à partir des courbes d'adsorption et de désorption de vapeur d'eau [8]. La capacité de stockage d'humidité permet d'inclure le phénomène d'hystérésis d'adsorption et de désorption d'eau, car il traduit l'accumulation d'eau dans les pores.

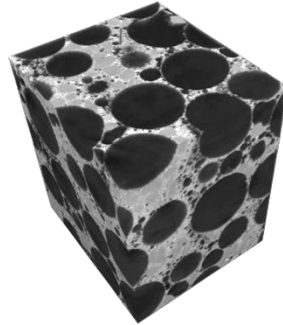


FIGURE 1. Volume reconstruit du mortier de polystyrène à une résolution de 17 μ m/voxels

Le mortier de polystyrène est étudié expérimentalement grâce à la tomographie aux rayons X qui permet d'obtenir les volumes reconstruits en incluant toutes les hétérogénéités de la microstructure. La figure 1 montre un volume 3D reconstruit à partir d'un échantillon de mortier de polystyrène de 2x2x2cm³ à une résolution de 17 μ m par voxel. Les billes de polystyrène expansé apparaissent en phase noire de la même manière que la porosité du matériau, à cause de leur très faible densité. La matrice cimentaire, beaucoup plus dense, est la phase claire.

Ce volume subit un post-traitement adapté afin d'identifier les différentes phases qui composent le mortier de polystyrène, en particulier la porosité et les billes de polystyrène qui sont difficiles à différencier. Le post traitement des images 3D est donc long et laborieux et nécessite plusieurs outils afin d'obtenir un résultat concluant (Avizo [9], Image J [11], Imorph [12]). Au terme du traitement d'images, on arrive à extraire le volume de la matrice cimentaire seule, en plus de différencier les billes de polystyrène expansé de la porosité de la matrice cimentaire. Le volume reconstruit de la matrice cimentaire est présenté dans la figure 2.

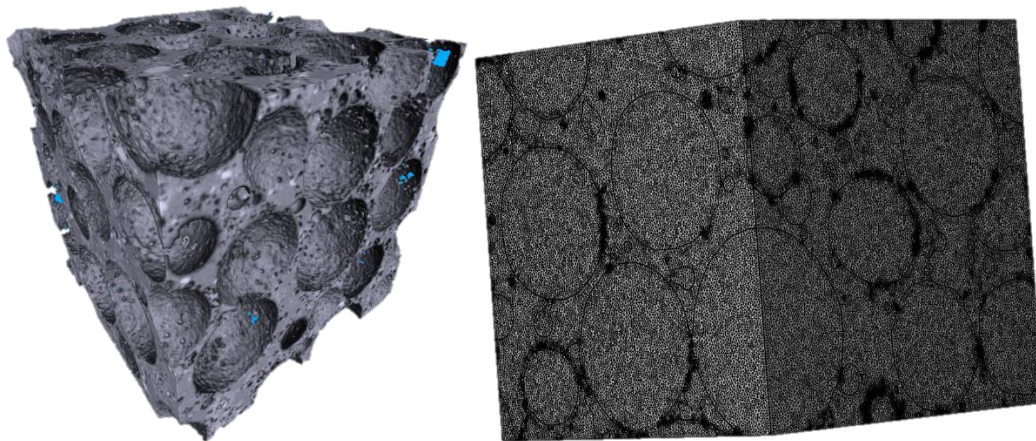


FIGURE 2. Reconstructions 3D. a) Matrice cimentaire ; b) Maillage du volume

Par la suite, un maillage adapté est réalisé en affinant les tailles d'éléments aux interfaces et dans la porosité puisque c'est dans les pores que s'effectuent les transferts d'humidité. Le maillage est réalisé sur le logiciel Avizo [9] et présenté en figure 2.b. Dans le cas du volume choisi, correspondant à $6 \times 6 \times 6 \text{ mm}^3$, le nombre d'éléments du maillage est de 10^7 .

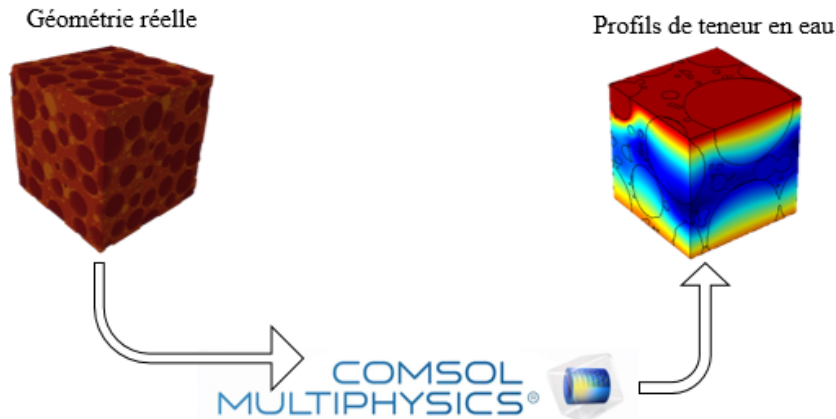


FIGURE 3. Schéma des simulations

Le volume est ensuite importé dans le logiciel COMSOL Multiphysics basé sur un calcul par éléments finis [12] afin de mener les simulations des transferts hydriques suivant le modèle développé, comme on peut le voir sur la figure 3. Après avoir subi les traitements permettant de différencier les trois différentes phases du matériau, les volumes reconstruits du mortier de polystyrène sont maillés avant d'être importés pour effectuer les simulations numériques.

Les conditions aux limites sont de type Dirichlet sur les surfaces supérieure et inférieure, avec une isolation sur les surfaces latérales. Les conditions aux limites de teneur en eau dans ce cas d'étude sont représentées dans la figure 4. On effectuera les calculs en régime stationnaire, dans un premier temps sur le volume reconstruit, puis sur un volume homogène de mêmes dimensions afin d'évaluer l'influence de la prise en compte de la microstructure réelle sur le comportement hydrique.

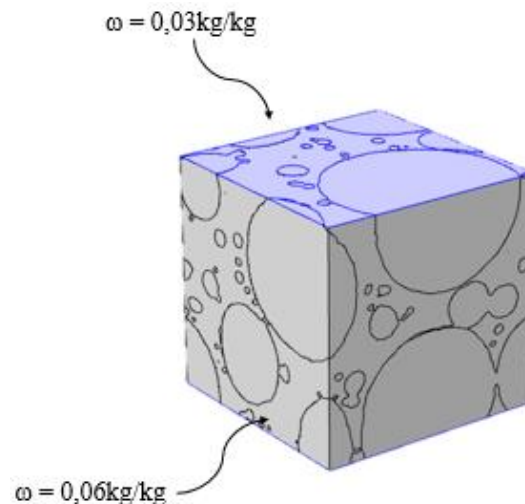


FIGURE 4. Conditions aux limites

III. RESULTATS

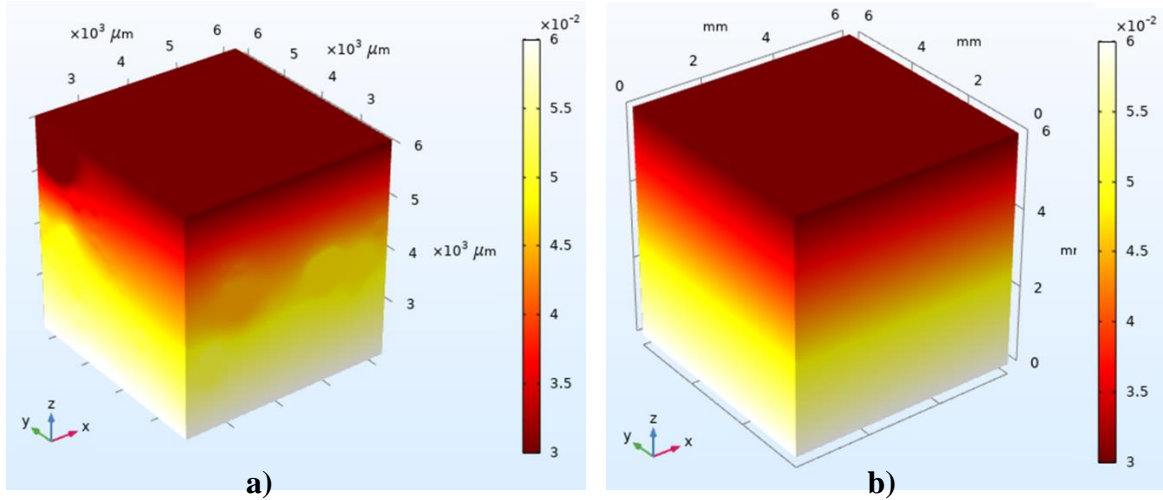


FIGURE 5. Distribution de teneur en eau. a) Volume réel ; b) Volume homogène

Les distributions de teneur en eau à l'équilibre dans les deux volumes réel et homogène sont présentées en figure 5. A travers la figure 5.a, on remarque que le transfert hydrique est plus important dans les pores, et très lent dans les billes de polystyrène expansé. On voit également une forte hétérogénéité dans les distributions de teneur en eau pour le volume réel comparé au volume homogène où on observe une distribution régulière.

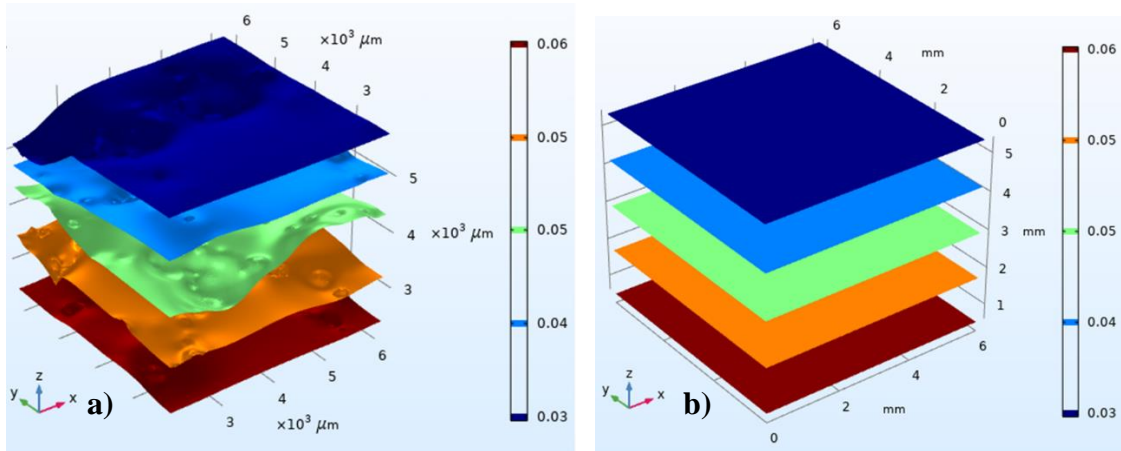


FIGURE 6. Courbes iso-surfaces. a) Volume réel ; b) Volume homogène

Les hétérogénéités du champ de distribution de teneur en eau sont mieux représentées à travers les courbes iso-surfaces illustrées en figure 6. Dans le cas du volume réel (figure 6.a), on peut observer des fluctuations selon la complexité de la morphologie et la géométrie du matériau. Ces variations très marquées sont également dues à la topologie des interfaces entre les différentes phases qui constituent le mortier de polystyrène, à cause de leurs coefficients de diffusion d'humidité très différents. Dans le cas d'un volume uniforme, les distributions de teneur en eau sont homogènes et les courbes iso-surfaces obtenues sont parallèles.

III. CONCLUSION

Dans ce travail, le comportement hydrique d'un mortier de polystyrène a été étudié par la modélisation numérique des transferts d'humidité en utilisant une nouvelle approche basée sur l'utilisation de microstructures réelles en 3D. Ces dernières ont été obtenues expérimentalement par micro-tomographie à rayons X, et un post traitement adapté a permis de définir les différentes phases constituant le matériau.

Les champs de distribution de teneur en eau dans les trois directions ont été présentés. Les résultats ont montré une forte hétérogénéité des transferts d'humidité dans la géométrie réelle du mortier de polystyrène, à cause des coefficients de transferts qui sont très différents dans chaque phase. La comparaison entre les distributions dans les volumes réel et homogène démontre une différence importante dans les profils de teneur en eau obtenus.

Ce travail met en évidence la complexité des phénomènes de transferts dans des matériaux hétérogènes et fortement multiphasiques et montre la forte influence de la géométrie. La prise en compte de la microstructure réelle permet donc une meilleure appréhension des transferts de teneur en eau dans les matériaux poreux de construction.

REFERENCES

- [1] H. J. Moon, S. H. Ryu & J. T. Kim. (2014). The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings. *Energy and Buildings* 75, 439-446. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.039>
- [2] C. Zhuang, S. Wang, K. Shan. (2019). Adaptive full-range decoupled ventilation strategy and air-conditioning systems for cleanrooms and buildings requiring strict humidity control and their performance evaluation. *Energy* 168, 883-896. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.147>
- [3] V. Ferrandiz-Mas & E. García-Alcocel. (2013). Durability of expanded polystyrene mortars, *Construction and Building Materials*, 46, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.029>
- [4] Y. Li, N. Liu & B. Chen. (2015). Properties of lightweight concrete composed of magnesia phosphate cement and expanded polystyrene aggregates, *Materials Structures*, 48, 269–276. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0182-6>.
- [5] M. Fathi, A. Yousefipour & E.H. Farokhy. (2017). Mechanical and physical properties of expanded polystyrene structural concretes containing Microsilica and Nano-silica. *Construction and Building Materials*, 136, 590–597. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.040>
- [6] M. Maaroufi, K. Abahri, C. El Hachem & R. Belarbi. (2018). Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. *Construction and Building Materials*, 178, 339-348. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142>
- [7] M. Maaroufi. (2019). Modélisation des transferts hygrothermiques dans les matériaux poreux de construction. *Thèse de doctorat*, Université de La Rochelle.

[8] M. Maaroufi, K. Abahri, F. Bennai & R. Belarbi. (2019). Moisture transfer modelling in polystyrene mortar with consideration of sorption hysteresis. *E3S Web of Conferences*, 128. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912807006>

[9] Avizo User's Guide, English, *FEI Visualization Sciences Group*

[10] C.A. Schneider, W.S. Rasband & K.W. Eliceiri. (2012). NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nat. Methods*, 9, p. 671

[11] E. Brun, J. Vicente, F. Topin, R. Ocelli & M. Clifton. (2009). Microstructure and Transport Properties of Cellular Materials: Representative Volume Element. *Advanced Engineering Materials* 10, 805-810

[12] COMSOL Multiphysics 4.3 User's Guide (2012), *COMSOL U.S.A.*