

# Prédiction de la teneur en eau de matériaux cimentaires par application d'un processus d'homogénéisation aux propriétés électromagnétiques du milieu

V. GUIHARD <sup>a, b</sup>, J.P. BALAYSSAC <sup>b</sup>, F. TAILLADE <sup>a</sup>, J. SANAHUJA <sup>c</sup>,  
B. STECK <sup>a</sup>, F. DEBY <sup>b</sup>

a. EDF R&D Chatou, 6 quai Watier, 78400 CHATOU, vincent.guihard@edf.fr.

b. LMDC Toulouse, 135 avenue de Ranguel, 31077 TOULOUSE.

c. EDF R&D Les Renardières, avenue des Renardières, 77818 MORET-SUR-LOING.

## Résumé :

*L'étude présentée propose la transposition d'une démarche d'homogénéisation de grandeurs mécaniques dans les bétons aux propriétés électromagnétiques afin d'extraire d'une mesure de permittivité macroscopique, la teneur en eau du milieu hétérogène étudié. Des similitudes existent dans les différents schémas permettant d'homogénéiser et lier grandeurs microscopiques et macroscopiques. Reposant sur la connaissance des propriétés intrinsèques de chaque hétérogénéité constituant le milieu, l'approche est d'ores et déjà validée pour un sable partiellement saturé et doit être étendue au cas des milieux cimentaires par une approche multi-échelle.*

**Mots clefs : béton ; teneur en eau ; homogénéisation ; propriétés électromagnétiques ; permittivité.**

## 1 Introduction

Parmi la plupart des phénomènes caractéristiques du vieillissement des structures en béton (fluage, corrosion des armatures etc.), la teneur en eau est un paramètre influent non négligeable. Son estimation de manière non destructive est donc déterminante dans l'étude du vieillissement des structures de génie civil. Les grandeurs électromagnétiques telles que la permittivité du milieu étant dépendantes de la teneur en eau, leur mesure peut être utilisée pour estimer la quantité d'eau contenue dans un milieu cimentaire. Différentes lois empiriques du comportement de ces propriétés en fonction de la teneur en eau existent [1] mais sont difficilement transposables d'un matériau à l'autre. La démarche de l'étude réalisée consiste à appliquer un processus d'homogénéisation des propriétés électromagnétiques aux différentes échelles de la microstructure de matériaux cimentaires de manière

à établir une loi de dépendance des propriétés macroscopiques mesurables aux aspects microstructuraux tels que la teneur en eau.

## 2 Permittivité électrique des bétons et milieux cimentaires

La réponse d'un milieu diélectrique ou peu conducteur à une excitation électromagnétique se manifeste de différentes manières. Les deux principaux phénomènes électriques observés dans un matériau sont le transport des charges libres et la polarisation des charges liées. Ainsi, sous excitation électromagnétique, la réponse d'un matériau conducteur se manifeste par le déplacement de charges libres et donc par la circulation d'un courant électrique. En revanche, dans un diélectrique parfait (sans charges libres), les charges liées ne sont susceptibles de se déplacer que sur de très faibles distances. Les conséquences de ces déplacements peuvent être la création d'un moment dipolaire localisé ou bien l'orientation parallèle au champ électrique incident d'un moment dipolaire permanent porté par une molécule polaire (comme c'est le cas pour l'eau). Différents types de polarisations (électronique, ionique, dipolaire, interfaciale) peuvent être observées dans un milieu multiphasique tel que les matériaux cimentaires. On définit la grandeur « permittivité électrique  $\varepsilon$  » pour traduire et quantifier ces phénomènes. Il s'agit d'une grandeur complexe à dépendance fréquentielle incluant la contribution de la polarisation et de la conduction. Lors d'une mesure de permittivité par propagation d'un champ électromagnétique au travers d'un matériau de génie civil en béton, la quantité d'eau localisée au sein des pores de la matrice cimentaire influera grandement sur la grandeur évaluée. Ainsi, la teneur en eau des bétons peut être déterminée de façon non destructive par l'exploitation de mesure de permittivité. Néanmoins, aucune loi non empirique ne permet aujourd'hui de lier la grandeur macroscopique mesurée d'un milieu hétérogène et la quantité d'eau contenue au sein de sa microstructure.

## 3 Homogénéisation de grandeurs électromagnétiques dans les bétons

La permittivité macroscopique d'un ciment ou béton résulte de la contribution de chacune des hétérogénéités constituant le milieu. En effet, chaque constituant (granulats, eau, hydrates etc.) peut être caractérisé par une permittivité électrique intrinsèque. Outre la difficulté à évaluer ces propriétés pour certains constituants séparés, le lien entre celles-ci et la grandeur macroscopique mesurable est difficile à établir. Différentes lois d'homogénéisation de la permittivité ont été développées au cours du siècle dernier [2]. On remarque une grande similitude entre ses lois d'homogénéisation analytiques et celles utilisées pour prédire le comportement mécanique d'un milieu hétérogène. Le schéma dit de Mori Tanaka est par exemple assimilable dans sa construction à l'équation de Maxwell-Garnett en électromagnétisme. L'étude consiste donc à transposer une démarche déjà utilisée et validée en mécanique [3] aux propriétés électromagnétiques par un processus de remontée d'échelle depuis la composition de la pâte cimentaire jusqu'à l'effet des granulats sur la propriété étudiée, afin de prédire par analyse inverse la teneur en eau d'un béton. La Figure 1 schématise les différentes échelles distinguables au sein d'un béton. Une étape d'homogénéisation pour chacune des échelles permettra de lier grandeurs macroscopiques et microscopiques.

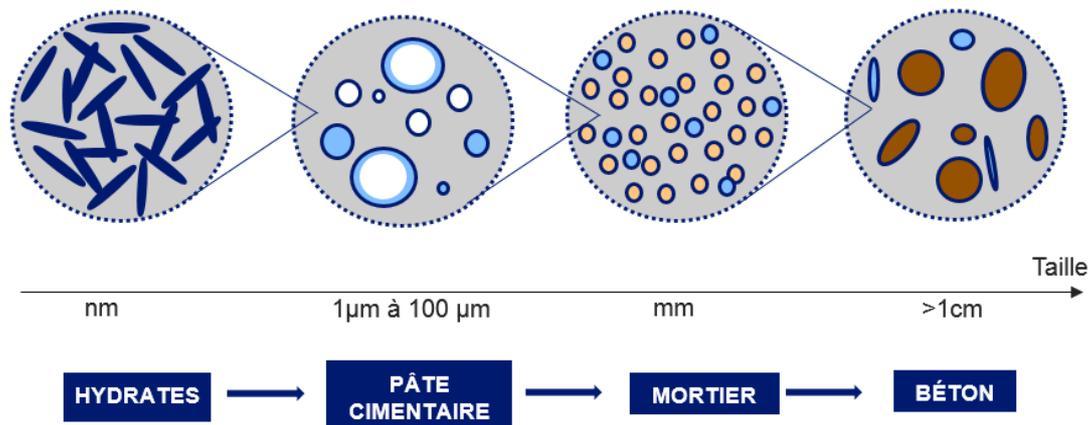


Figure 1. Différentes échelles distinguables pour un béton depuis les hydrates (nanométriques) jusqu'aux granulats (centimétriques).

#### 4 Validations sur un sable partiellement saturé

Des résultats prometteurs ont déjà permis de comparer une propriété macroscopique mesurée expérimentalement aux résultats obtenus par utilisation de différents modèles analytiques. Une sonde coaxiale à effet de bout [4] a permis de comparer la justesse des différents modèles existants pour le cas d'un sable sec ou parfaitement saturé d'eau. Il a notamment été montré que dans chacun de ces deux cas pour lesquels les fractions volumiques d'inclusions (grains de sable en contact avec eux-mêmes et avec de l'air ou de l'eau) sont élevées, un schéma de type « auto-cohérent », également appelé « modèle de Bruggeman symétrique », se révèle être le plus adapté. Pour le cas non saturé, le système étudié est constitué de trois phases distinctes (eau, air et solide). Les mêmes schémas analytiques restent applicables. L'étude est alors complétée par un processus d'homogénéisation numérique qui, après construction d'une géométrie tridimensionnelle de sphères aléatoirement dispersées dans une matrice cubique, utilise un code de calcul de type Lattice Boltzmann Method [5] développé à EDF R&D pour insérer un volume de liquide dans la matrice entourant les sphères. La géométrie résultante est présentée Figure 2.

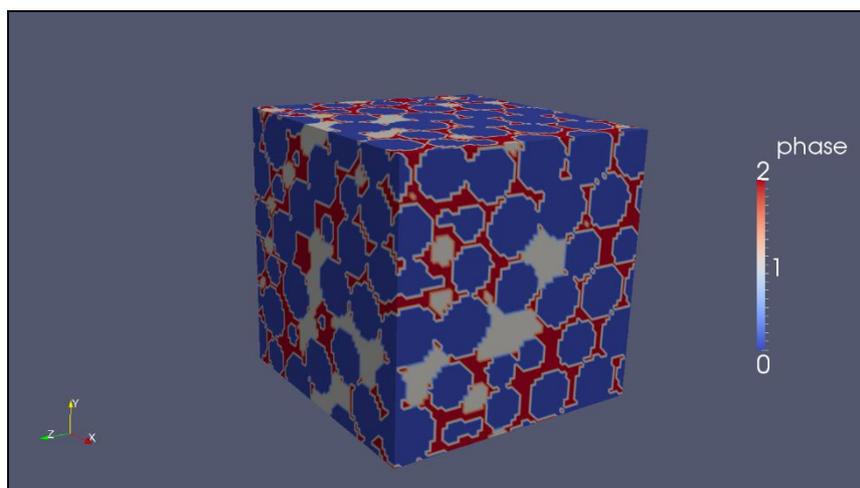
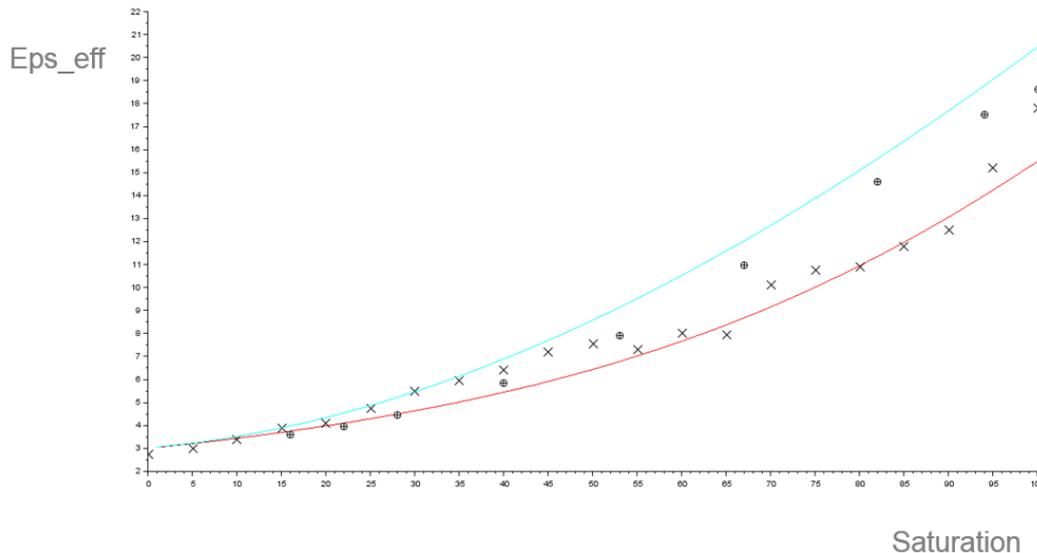


Figure 2. Géométrie constituée de particules solides (bleues), d'eau (rouge) et d'air (blanc).

Un calcul par différence finies appliqué à ce type de géométrie après attribution des propriétés (permittivité) à chacune des hétérogénéités permet de calculer numériquement la valeur de la grandeur homogène équivalente du milieu [6] [7]. Ces simulations ont été conduites pour différentes saturations aux côtés de mesures expérimentales sur un sable à la structure maîtrisée. La comparaison des résultats de permittivité effective en fonction du degré de saturation du sable est présentée Figure 3. On remarque une bonne cohérence avec les modèles dits de Topp (bleu) et auto-cohérent (rouge).



**Figure 3. Permittivité effective du sable suivant le modèle auto-cohérent (rouge), de Topp (bleu), numérique (cercles) ou déterminée expérimentalement (croix).**

## 5 Conclusion et perspectives

L'étude présentée valide l'utilisation de modèles d'homogénéisation analytiques et numériques de la permittivité dans les milieux poreux non saturés. La bonne cohérence observée entre permittivités issues de simulations numériques, analytiques et mesurées sur un sable partiellement saturé est un résultat prometteur pour l'application de tels processus d'homogénéisation dans les milieux à la microstructure plus complexe tels que les milieux cimentaires.

## Références

- [1] Topp, G.C., J.L. David, and A.P. Annan. Electromagnetic, Determination of Soil Water Content: Measurement in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research* 16:3. p. 574-582, 1980.
- [2] Cosenza P. et al. Differential effective medium schemes for investigating the relationship between high-frequency relative dielectric permittivity and water content of soils. *Water Resources Research*, 39, 2003.
- [3] Sanahuja et al., Modelling elasticity of a hydrating cement paste. *Cement and Concrete Research* 37, 1427-1439, 2007.
- [4] Stuchly and Stuchly, Coaxial line reflexion methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies – a review. *Transaction on Instrumentation and Measurement*, (3), 1980.

- [5] Huang H., Sukop M. and Lu X., Multiphase Lattice Boltzmann Methods: Theory and Application. John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [6] Lavergne F., Contributions à l'étude des déformations différées des matériaux composites viscoélastiques. Matériaux. Université Paris-Est, 2015.
- [7] Sanahuja J. and Toulemonde C., Numerical homogenization of concrete microstructures without explicit meshes. Cement and Concrete Research (41), 2011.