

Lois d'homogénéisation en électromagnétisme pour l'estimation de la teneur en eau des bétons

Vincent Guihard^{1,2}

¹ Université de Toulouse, UPS, INSA, LMDC (Laboratoire des Matériaux et Durabilité des Constructions), 135, Avenue de Rangueil, F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

² EDF R&D, PRISME, MPSP, 6 quai Watier 78400 Chatou, France

RÉSUMÉ. La quantité et la distribution de l'eau interstitielle dans l'espace poral des milieux cimentaires sont des marqueurs fondamentaux de la durabilité des structures de Génie Civil en béton. L'évaluation de la teneur en eau par méthode non-destructive électromagnétique de type RADAR, par exemple, requiert l'utilisation d'une grandeur intermédiaire telle que la permittivité diélectrique. La relation entre cette propriété électromagnétique et la teneur en eau dépend alors de la composition et donc de la formulation du béton. En électromagnétisme, les lois d'homogénéisation permettent de lier la permittivité macroscopique d'un matériau hétérogène avec la permittivité intrinsèque et la fraction volumique de chaque hétérogénéité présente. Afin de pallier le temps important requis pour l'établissement d'une courbe de calibration expérimentale propre à chaque formulation, cette étude propose la mise en place d'une démarche d'homogénéisation de la permittivité pour lier quantité d'eau présente dans un béton et permittivité macroscopique du matériau. Les travaux présentés rapportent la fabrication, la modélisation et l'utilisation de sondes coaxiales ouvertes pour la mesure de la permittivité complexe de matériaux solides et liquides. Le concept d'estimation de la teneur en eau par utilisation de lois d'homogénéisation est validé pour le cas d'un sable partiellement saturé en eau. Au vu des résultats prometteurs obtenus par modélisation analytique, des schémas d'homogénéisation sont combinés lors d'un processus de remontée d'échelle depuis celle des hydrates jusqu'à celle des granulats, en tenant compte de la morphologie de la microstructure. Les propriétés intrinsèques des principaux constituants d'un béton (granulats, hydrates, ciment anhydre) sont alors mesurées par sonde coaxiale et utilisées en données d'entrée du modèle construit. Une bonne cohérence est observée entre parties réelles de la permittivité simulées et mesurées, pour des échantillons de pâtes de ciment, mortiers et bétons. A la différence des lois expérimentales et empiriques, le modèle construit se caractérise par un temps de calcul quasi-instantané et peut être adapté d'une formulation de béton à une autre.

ABSTRACT. Prediction of delayed behaviour in concrete can be significantly improved by monitoring the amount and spatial distribution of water within a concrete structure over time by means of electromagnetic NDT methods such as GPR. Indeed, electromagnetic properties of heterogeneous and porous materials, such as dielectric permittivity, are closely related to water content. Measurement of these properties is thus a common non-destructive technique used to assess the moisture content, but a calibration curve is required to link the measured permittivity to the saturation degree. This curve can be determined experimentally, or from empirical models. However, the first approach is tedious and time consuming, while the second one is not always adapted to concrete. Hence, this contribution proposes an alternative route, relying on electromagnetic homogenization schemes, to connect the macroscopic permittivity of cement-based materials with the water content of the structure. Therefore, different open-ended coaxial probes were designed, modelled and tested in order to perform complex permittivity measurements of both solids and liquids. The homogenization approach is first validated on unsaturated sand. Then, the permittivity of concrete components (aggregates, hydrates, interstitial liquid, anhydrous cement) was assessed by means of coaxial probe measurements. Finally, a specific combination of analytical homogenization laws taking into account the microstructure's morphology of the material is built. Results show that there is a good correlation between the model and measurements acquired on different cement pastes, mortars and concretes, at different saturation degrees. The model is characterized by a quasi-instantaneous calculation time and can be adapted to different concretes.

MOTS-CLÉS : contrôle non-destructif, permittivité diélectrique, matériaux cimentaires, homogénéisation, teneur en eau.

KEY WORDS: non-destructive testing, dielectric permittivity, cementitious materials, homogenization schemes, water content.

1. Introduction

L'importance portée au suivi de l'état de santé des ouvrages en béton au sein des moyens de production d'électricité trouve sa justification dans le rôle majeur qu'ils tiennent dans la sûreté de fonctionnement des installations. Le suivi de la déformation et la surveillance de l'émergence de défauts structurels servent d'indicateurs de l'état de santé de ces ouvrages. Dans une démarche d'optimisation de la maintenance de ses installations, EDF met en place un suivi, organisé suivant une phase d'évaluation des propriétés du béton, de diagnostic d'état de santé et enfin de pronostic de durée de vie des ouvrages du parc de production d'électricité (enceintes de confinement et tours aéroréfrigérantes de centrales nucléaires, barrages). Parmi l'ensemble des mécanismes altérant la durabilité du béton, nombreux sont ceux liés à l'évolution de la quantité ainsi que de la répartition de l'eau dans l'espace poral du matériau (fluage, retrait, émergence de pathologies de gonflement). La connaissance de ces informations pourrait donc améliorer significativement le pronostic de durée de vie des ouvrages. L'évaluation de la teneur en eau par une technique non destructive requiert l'utilisation d'une grandeur physique intermédiaire, dépendante de la quantité d'eau présente dans le milieu. La permittivité diélectrique d'un matériau hétérogène, mesurée par méthodes électromagnétiques sans besoin de prélèvement de matériau, est directement sensible à la présence d'eau dans le milieu. Le passage des données mesurées aux gradients de teneur en eau requiert alors l'utilisation d'une loi de calibration souvent créée par regroupement de jeux de données expérimentales acquises sur matériau témoin. Ces lois étant liées à une formulation particulière de béton, elles sont difficilement transposables d'un matériau à l'autre. La porosité du béton, la nature du ciment, les conditions environnementales ou encore l'origine géographique et géologique des granulats utilisés sont autant de paramètres influençant la grandeur électromagnétique macroscopique mesurée. Afin de pallier cette difficulté, les travaux présentés proposent la prise en compte approfondie des caractéristiques microstructurelles des milieux cimentaires pour la construction d'une loi de calibration de la permittivité en fonction de la teneur en eau. On ne considère plus le béton comme un milieu triphasique eau-solide-gaz, mais comme une structure aux multiples échelles, où la nature et l'agencement des composants élémentaires contribuent aux propriétés macroscopiques mesurables. L'utilisation de lois d'homogénéisation permet d'associer aux mesures effectuées sur des milieux hétérogènes, les propriétés et fractions volumiques des espèces présentes dans le milieu. Supposant la permittivité macroscopique mesurée sur un ouvrage comme la résultante de la contribution des propriétés de chaque hétérogénéité constituant le volume sondé, les lois d'homogénéisation permettront de lier fraction d'eau incluse et permittivité macroscopique du béton. Une combinaison de ces schémas selon un processus de remontée d'échelle permettra de tenir compte de la place occupée par l'eau dans l'espace poreux du béton. Afin de répondre à cette problématique, on présente dans un premier temps le développement de la chaîne de mesure utilisée pour caractériser la permittivité des bétons et de leurs différentes phases, à savoir un ensemble de sondes coaxiales ouvertes. La démarche d'homogénéisation de la permittivité est ensuite appliquée au cas d'un échantillon de sable partiellement saturé en eau, comme preuve de concept. Une description des résultats de campagnes de caractérisation de la permittivité intrinsèque des principaux constituants du béton précèdera finalement la réunion des données et schémas pour l'élaboration d'un modèle complet de la permittivité du béton, liant permittivité macroscopique et teneur en eau.

2. Conception et modélisation de sondes coaxiales ouvertes pour la mesure de permittivité

Sous excitation électromagnétique, différents types de polarisations (électronique, ionique, dipolaire, interfaciale) peuvent être observés dans un milieu diélectrique ou peu conducteur tel qu'un matériau cimentaire. Les conséquences de ces déplacements peuvent être, entre autres, dans la gamme de fréquence des RADARS usuels, l'orientation parallèle au champ électrique incident du moment dipolaire permanent porté par les molécules d'eau. La permittivité ϵ est une grandeur complexe à dépendance fréquentielle permettant de traduire et de quantifier les phénomènes de polarisation ainsi que les phénomènes de conduction, caractéristiques de déplacement de charges libres (électrons, ions). La partie réelle de cette permittivité, appelée constante diélectrique, est liée au stockage d'énergie sous forme de polarisation. Sa partie imaginaire dénommée facteur de pertes traduit les pertes à la fois diélectriques et ohmiques. Les deux parties sont directement influencées par la teneur en eau d'un milieu hétérogène.

Le choix du dispositif de mesure de la permittivité adapté à la présente étude est conditionné par certaines contraintes dont la possibilité de mesures sur échantillons de petites tailles (composants de la phase cimentaire, pâtes de ciment) comme de plus grandes tailles (mortiers, bétons). Une autre contrainte concerne la possibilité de mesures sans conditionnement des échantillons, ou encore de mesures sur de larges gammes de fréquence. Contrairement aux sondes capacitatives [FAR 16], aux dispositifs RADAR [KLY 07] ou TDR (Time Domain Reflectometry [YU 04]), les sondes coaxiales ouvertes adoptées dans l'étude réunissent l'ensemble de ces

critères. Dans le passé, leurs caractéristiques ont été étudiées et appliquées à la caractérisation de milieux comme les liquides et tissus biologiques [STU 80], les produits agricoles, les sols [DEM 16] ou encore les bétons [FIL 08] [DAM 09].

La Figure 1 présente le système de mesure constitué d'un analyseur de réseau vectoriel Anritsu MS46121A et de la première sonde conçue [GUI 17]. Celle-ci est constituée d'une âme centrale séparée d'une gaine métallique par de l'air. Lors d'une mesure, le signal électromagnétique émis par l'analyseur de réseau est propagé dans la sonde jusqu'à l'extrémité de celle-ci. L'échantillon à étudier est placé en contact de la surface inférieure de la sonde. L'analyseur de réseau permet alors l'acquisition d'un coefficient de réflexion du signal associé à l'échantillon testé et relié à la permittivité diélectrique de celui-ci à travers l'utilisation d'un modèle dit « capacitif » [STU 80]. L'utilisation d'une telle sonde et d'un tel modèle requiert une calibration spécifique détaillée dans [GUI 17] et faisant intervenir des mesures effectuées sur deux échantillons témoins de permittivité connue (ici de l'air et du Téflon). On note que la profondeur d'investigation est dépendante du diamètre du dispositif en bout de sonde. Un large diamètre permettra la mesure de permittivité d'échantillons caractérisés par des volumes élémentaires représentatifs élevés.

Les travaux menés consistent en la conception de trois nouvelles sondes de tailles différentes ainsi que leur modélisation par éléments finis qui permet de valider le fonctionnement des sondes comme outils de mesure de la permittivité [GUI 18]. Trois dispositifs ont été conçus et modélisés. Un dispositif de diamètre en bout de sonde de 2,4 mm permet la mesure de la permittivité d'échantillons de petite taille (phases cimentaires pures) ; un dispositif de diamètre 13 mm permet la mesure de permittivité d'échantillons de taille intermédiaire (sable, pâtes de ciment, mortiers) et une sonde de diamètre 21,5 mm a été conçue pour l'étude des bétons.

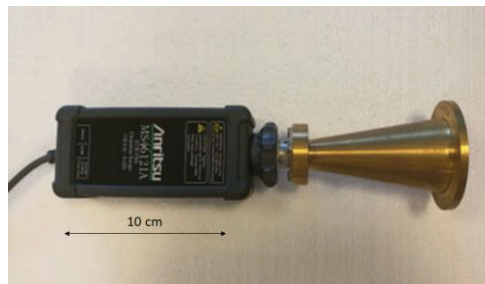


Figure 1. Sonde coaxiale de diamètre 13 mm et analyseur de réseau vectoriel pour la mesure de permittivité.

3. Preuve de concept de calcul de teneur en eau sur un sable par homogénéisation de la permittivité

Différentes lois d'homogénéisation ont été développées au cours du siècle dernier [COS 09] pour lier permittivité intrinsèque, fraction volumique et forme des phases d'un milieu hétérogène avec la permittivité macroscopique et mesurable de celui-ci. Parmi ces différentes lois, les modèles de Bruggeman [BRU 35], Maxwell-Garnett [MAX 04] ou encore la théorie des milieux effectifs différentiels (DEMT) [COS 03] figurent parmi les plus célèbres et les plus utilisés. L'équation de Bruggeman pour le cas d'un milieu hétérogène comportant K phases constituées d'inclusions sphériques de permittivité ϵ_k et présentes dans une fraction volumique f_k est rappelée ci-dessous. ϵ_{eff} désigne ici la permittivité macroscopique équivalente du milieu.

$$\sum_k^K f_k \frac{\epsilon_k - \epsilon_{eff}}{\epsilon_k + 2\epsilon_{eff}} = 0 \quad [1]$$

Comme preuve de concept d'une application de ces modèles analytiques au calcul de teneur en eau dans les bétons, on s'intéresse dans un premier temps à un matériau à la microstructure moins complexe, à savoir, un sable silico-calcaire. Dans la présente étude, différents schémas analytiques reposant sur une description du matériau comme un mélange d'inclusions d'air, d'eau et de grains solides ont été utilisés pour modéliser la partie réelle de la permittivité macroscopique d'un sable partiellement saturé en eau. La pertinence de ces modèles a été jugée par comparaison des résultats avec différentes mesures obtenues par utilisation de la sonde coaxiale ouverte de diamètre 13 mm sur le sable, à différents degrés de saturation contrôlés. Une comparaison avec les résultats issus d'une simulation numérique est également effectuée. Un modèle numérique tridimensionnel du sable est construit pour le calcul de la grandeur homogénéisée d'une géométrie fidèle à la morphologie du sable. Ce modèle repose sur l'utilisation d'un code de calcul permettant la répartition d'une phase liquide selon la méthode de Boltzmann sur réseau (LBM) [ADI 17] dans un milieu constitué de sphères modélisant des grains de

sable, aléatoirement dispersés dans une matrice d'air. Un calcul par différences finies appliqué à ces géométries après attribution des permittivités intrinsèques à chacune des hétérogénéités permet de calculer numériquement la valeur de la grandeur homogène effective du milieu. Ces simulations ont été conduites pour différents degrés de saturation depuis un état totalement sec vers un état totalement saturé.

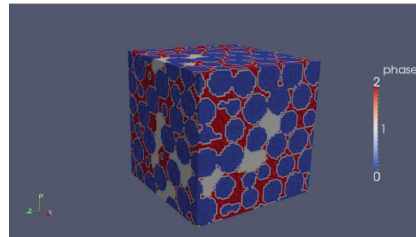


Figure 2. Géométrie numérique du sable (rouge : eau ; bleu : sable ; blanc : air), saturation de 60%.

La Figure 3 rassemble des données issues des calculs numériques, analytiques ainsi que les mesures effectuées sur le sable. Les permittivités mesurées sont affichées moyennées sur la gamme de fréquence [200 MHz ; 800 MHz]. L'adéquation de l'utilisation de la sonde coaxiale sur cette gamme de fréquence a préalablement été validée dans [GUI 17]. On observe ici une tendance similaire entre mesures et calculs numériques malgré une surestimation de la permittivité effective calculée numériquement. Les modèles DMT et de Maxwell-Garnett tendent, eux, à sous-estimer la grandeur mesurée, notamment aux forts degrés de saturation. On observe finalement un écart conséquent entre l'équation de Topp classiquement utilisée dans l'étude des sols [TOP 80] et l'ensemble des données mesurées. En conclusion, le modèle de Bruggeman pour un ensemble de trois phases sphériques s'avère être le plus performant. Il sera retenu dans la suite de l'étude. La démarche analytique, étant validée pour le cas du sable et caractérisée par un temps de calcul nettement plus faible que celui des simulations numériques, on s'intéresse dans la suite à sa transposition aux matériaux cimentaires.

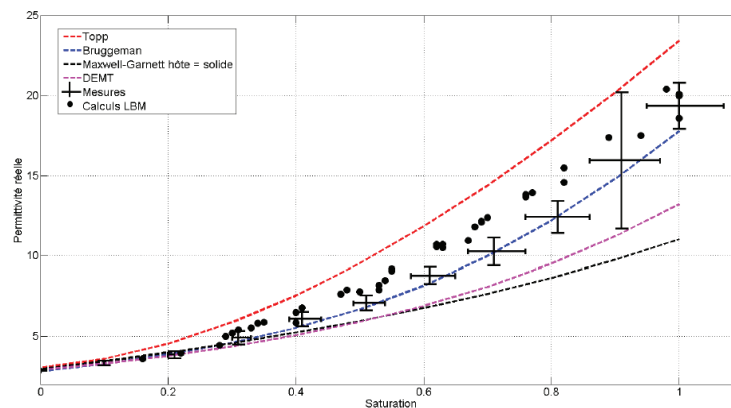


Figure 3. Comparaison des mesures et simulations analytique et numérique des parties réelles de la permittivité macroscopique du sable, à différents degrés de saturation.

4. Détermination de la permittivité des phases du béton

La transposition de la démarche de calcul de teneur en eau par homogénéisation de la permittivité du cas d'un sable à celui des milieux cimentaires requiert une description affinée de la morphologie plus complexe du milieu étudié. Cette morphologie, descriptible du nanomètre (échelle des hydrates) jusqu'au centimètre (échelle des granulats), suggère une réflexion approfondie quant au choix de la combinaison de schémas d'homogénéisation analytiques à utiliser pour établir le lien entre fraction des constituants et grandeur macroscopique, à travers un processus de remontée d'échelles. Outre l'agencement des nombreuses phases constituant les milieux cimentaires, la connaissance de leur permittivité diélectrique intrinsèque est également nécessaire à l'alimentation des modèles utilisés. Dans la présente étude, une démarche d'identification de la permittivité des principaux constituants d'un béton (ciment anhydre, gel de C-S-H, portlandite, solution interstitielle, granulats), absentes de la littérature, est mise en œuvre. Directement mesurée par sonde coaxiale

ouverte lors de l'étude des granulats et de la solution interstitielle, la permittivité du ciment anhydre, du gel de C-S-H et de la portlandite est déterminée par combinaison de mesures et de schémas d'homogénéisation sur des systèmes hétérogènes à la morphologie connue.

Concernant la permittivité de la portlandite, celle-ci est isolée de la permittivité macroscopique d'un mélange d'air et de portlandite mesurée par sonde coaxiale. Ce mélange prend la forme de briques cylindriques obtenues par compression de poudre de portlandite pure par presse hydraulique. La mesure de porosité des échantillons permet d'identifier la fraction volumique d'air et de portlandite dans les mélanges ainsi formés. L'inversion de l'équation de Bruggeman à deux phases (air et portlandite) permet alors d'identifier la permittivité de la portlandite. Après différents essais de reproductibilité et grâce à l'utilisation d'un processus de Monte Carlo pour la propagation des incertitudes dans l'inversion, la permittivité de la portlandite est estimée à $7,4 \pm 0,3$.

Une démarche identique est appliquée pour l'identification de la permittivité d'un ciment anhydre CEM-I (CEM-I 52.5 N CE CP2 NF). Celle-ci est alors de $9,0 \pm 0,3$.

La détermination de la permittivité du gel de C-S-H est, elle, complexifiée par la difficulté à isoler ce composant de la pâte cimentaire dans un volume suffisamment élevé pour permettre une mesure par sonde coaxiale ouverte. La démarche à appliquer est d'autant moins triviale que la composition de cet élément varie tout au long de la réaction d'hydratation mais également en fonction des conditions initiales d'hydratation (rapport eau sur liant, arrangement local des phases anhydres, etc.). Parmi les différents processus de synthèse de gel de C-S-H existants (réaction pouzzolanique, etc.), celui retenu dans le cadre de l'étude consiste en l'hydratation d'une phase de C_3S pure de structure monoclinique. Une telle réaction permet la fabrication d'échantillons poreux de plusieurs centimètres cubes présentant une phase solide hétérogène contenant une phase amorphe de C-S-H et de portlandite, dont les caractéristiques électromagnétiques ont pu être étudiées précédemment. Il devient alors concevable d'identifier la permittivité du gel de C-S-H à partir d'une mesure de la grandeur électromagnétique macroscopique et d'une combinaison de lois d'homogénéisation, en supposant connues la permittivité de la portlandite et la fraction de chaque phase dans le volume total (identifiée par porosimétrie et analyse quantitative de spectres de Diffraction par Rayons X - DRX). La meilleure cohérence entre permittivité des mélanges simulée analytiquement et mesurée par sonde coaxiale est obtenue pour une permittivité du gel de C-S-H de $5,3 \pm 0,5$. Les résultats en terme de parties réelle et imaginaire de la permittivité mesurée et simulée pour un mélange de gel de C-S-H et de portlandite sont présentés Figure 4 sur la gamme de fréquence [10 MHz ; 1 GHz]. On y observe la bonne cohérence entre mesure et simulation de la permittivité macroscopique pour une permittivité du gel de C-S-H de 5,3.

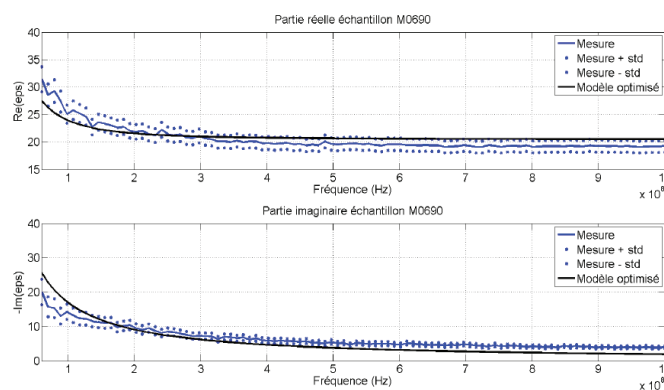


Figure 4. Permittivité mesurée sur un échantillon à base de gel de C-S-H sur la gamme [100 MHz ; 1 GHz] comparée au résultat du processus d'homogénéisation pour $\epsilon_{CSH} = 5,3$.

L'ensemble des résultats obtenus et retenus pour la suite de l'étude est finalement présenté Tableau 1.

Tableau 1. Récapitulatif des permittivités déterminées pour les principales phases d'un béton.

Phase	Permittivité	Incertitude
Gel de C-S-H	5,3	0,5
Ciment anhydre	9,0	0,3

Phase	Permittivité	Incertitude
Portlandite	7,4	0,3
Granulat	4,9	0,2

5. Construction du modèle électromagnétique du béton

Disposant d'outils de caractérisation de la permittivité complexe des milieux cimentaires, à savoir différentes sondes coaxiales ouvertes (cf. Section 2), ainsi que des informations sur les propriétés électromagnétiques intrinsèques des principales phases existantes au sein de la microstructure (cf. Section 4), il est maintenant possible de combiner différentes lois d'homogénéisation de la permittivité présentées Section 3 pour lier quantité d'eau incluse dans l'espace poral et permittivité macroscopique mesurable. On s'intéresse alors à la construction d'un schéma d'homogénéisation combinant différentes lois d'homogénéisation selon un processus de remontée d'échelle depuis celle des hydrates jusqu'à celle des granulats.

La combinaison de lois d'homogénéisation adoptée pour la modélisation des pâtes de ciment repose sur une démarche mise au point par Sanahuja et al, [SAN 07] pour la modélisation de l'élasticité mécanique et illustrée Figure 5. Le processus de remontée d'échelle est divisé en trois étapes d'homogénéisation tenant compte de la géométrie de la microstructure. Pour chacune de ces étapes, un modèle de Bruggeman est adopté pour la remontée d'échelle. L'homogénéisation d'un mélange de gel de C-S-H et de ciment anhydre permet l'estimation de la permittivité d'une phase d'inner. En parallèle, l'homogénéisation d'un mélange de pores (eau et air), de gel de C-S-H et de portlandite permet l'estimation de la permittivité d'une phase d'outer. L'homogénéisation des phases d'outer et d'inner permet finalement l'estimation de la permittivité de la pâte de ciment.

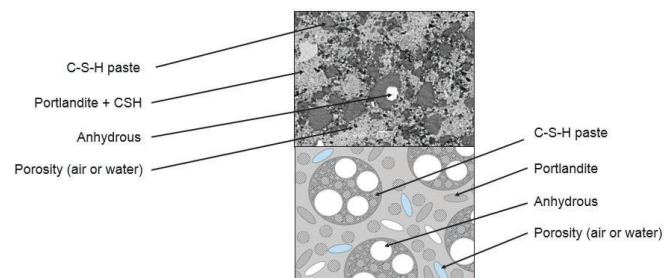


Figure 5. Image MEB d'un échantillon de pâte de ciment et géométrie modélisée par loi d'homogénéisation.

Afin de valider le modèle développé, différents échantillons de pâtes de ciment ont été fabriqués à partir du ciment CEM-I présenté Section 4. La composition de leur microstructure a été caractérisée par porosimétrie, DRX et analyse thermogravimétrique. La simulation de la permittivité effective de tels échantillons est finalement comparée avec celle mesurée par sonde coaxiale à différents degrés de saturation contrôlés. A mesure que la teneur en eau diminue, on observe une baisse de la partie réelle de la permittivité des échantillons. Les permittivités mesurées et simulées sont affichées Figure 6, moyennées sur la gamme de fréquence [400 MHz ; 800 MHz] pour les pâtes de ciment. La bonne cohérence entre mesures et simulations valide ainsi le modèle développé pour les pâtes de ciment. On s'intéresse alors au cas des mortiers et des bétons, en ajoutant un dernier changement d'échelle caractérisé par l'ajout d'une phase de granulat au matériau modélisé. L'homogénéisation de la phase de ciment avec celle des granulats permet l'estimation de la permittivité du mortier ou du béton.

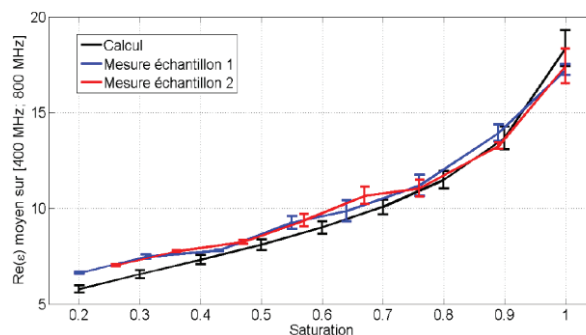


Figure 6. Permittivité réelle moyenne mesurée et calculée pour un échantillon de pâte de ciment.

La comparaison du modèle avec différents résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons de mortier et de béton à la morphologie et à la composition caractérisées en laboratoire est présentée Figure 7 et Figure 8. On note ici encore une bonne cohérence entre modèle et mesure. Le processus d'homogénéisation développé permet donc de reproduire la variation de permittivité réelle d'un béton, à partir de la connaissance de ses constituants et en fonction de son degré de saturation. La modèle développé se caractérise également par une meilleure prédiction de la permittivité d'un matériau cimentaire que les modèles empiriques classiquement utilisés pour estimer la teneur en eau (Topp, CRIM).

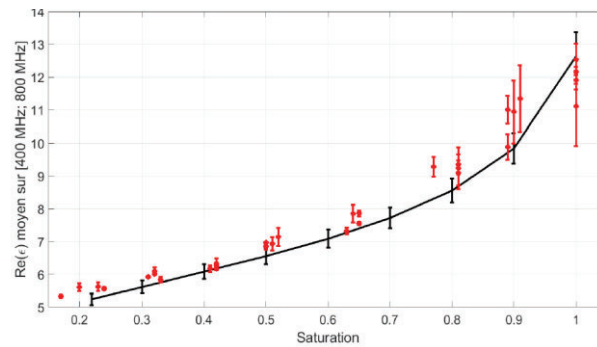


Figure 7. *Permittivité réelle moyenne mesurée et calculée pour un échantillon de mortier.*

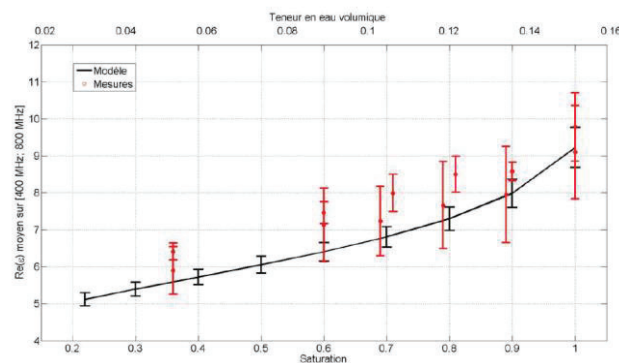


Figure 8. *Permittivité réelle moyenne mesurée et calculée pour un échantillon de béton.*

6. Conclusion

Le verrou scientifique auquel répond la présente étude est la prédiction de la permittivité d'un béton de formulation connue, afin d'interpréter les mesures électromagnétiques mises en œuvre sur ouvrage. La modélisation de la permittivité macroscopique du béton doit ainsi permettre d'associer à une mesure effectuée en surface ou à cœur du béton, une valeur de teneur en eau. L'approche adoptée pour répondre à cette problématique consiste en l'application d'un processus d'homogénéisation de la permittivité par remontée d'échelle. Les modèles d'homogénéisation utilisés permettent d'approcher la permittivité macroscopique équivalente d'un matériau hétérogène en tenant compte de la fraction volumique, de la forme et de la permittivité intrinsèque de chaque phase le constituant. Les résultats obtenus font état d'une bonne cohérence entre partie réelle de la permittivité simulée et mesurée par sonde coaxiale ouverte sur différents matériaux (pâte de ciment, mortier, béton). Le modèle construit est une combinaison de schémas de Bruggeman appliqués aux différentes échelles rencontrées au sein de la microstructure d'un béton, depuis celle des hydrates jusqu'à celle des granulats. A la différence des lois expérimentales, le modèle construit se caractérise par un temps de calcul quasi-instantané et peut être adapté d'une formulation de béton à une autre. A l'issue de cette étude, différentes perspectives peuvent être dégagées afin d'enrichir et d'accompagner le modèle créé afin qu'il puisse être utilisé pour estimer finement des variations de teneur en eau au sein d'un béton par des mesures non destructives et alimenter ainsi des modèles de vieillissement. Dans le futur, on s'intéressera notamment à la performance des lois d'homogénéisation dans la prédiction de la partie imaginaire de la permittivité des matériaux cimentaires, jusqu'à non démontrée. Le modèle sera également testé sur différentes formulations de béton, en faisant varier la

nature et donc la permittivité des granulats, le type de ciment ou encore le rapport eau sur ciment. Finalement, dans un contexte d'auscultation des ouvrages de production d'électricité, la combinaison de mesures par sondes coaxiales ouvertes et d'un processus d'homogénéisation de la permittivité pourra être transposée à la détection et à la quantification de défauts dans les pales d'éoliennes (inclusions d'air par exemple).

7. Bibliographie

- [FAR 16] FARES M., FARGIER Y., VILLAIN G., DÉROBERT X., LOPES S. « Determining the permittivity profile inside reinforced concrete using capacitive probes », *NDT & E International*, vol. 79, n° 1, 2016.
- [KLY 07] KLYSZ G., BALAYSSAC J.P., « Determination of volumetric water content of concrete using ground-penetrating RADAR », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, p. 1164-1171, 2016.
- [YU 04] YU X., DRNEVICH P., OLEK J., « Time domain Reflectometry for measuring water cement ratio of concrete », *International RILEM Symposium on Concrete Science and Engineering*, 2004.
- [STU 80] STUCHLY M., STUCHLY S., « Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-a review », *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 29, n° 10, p. 176-183, 1980.
- [DEM 16] DEMONTOUX F., RAZAFINDRATSIMA S., BIRCHER S., RUFFIE G., BONNAUDIN F., JONARD F., WIGNERON J.P., SBARTAI M., KERR Y., « Efficiency of end effect probes for in-situ permittivity measurements in the 0.5-6GHz frequency range and their application for organic soil horizons study », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 254, n° 12, p. 78-88, 2016.
- [FIL 08] FILALI B., BOONE F., RHAZI J., BALLIVY G., « Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 56, n° 11, p. 2322-2328, 2008.
- [DAM 09] VAN DAMME S., FRANCHOIS A., DE ZUTTER D., TAERWE L., « Nondestructive determination of the steel fiber content in concrete slabs with an open-ended coaxial probe », *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, n° 01, p. 2511-2521, 2009.
- [GUI 17] GUIHARD V., TAILLADE F., BALAYSSAC J.P., STECK B., SANAHUJA J., « Modelling the behavior of open-ended coaxial probe to assess the permittivity of heterogeneous dielectric solids », *Progress In Electromagnetism Research Symposium*, 2017.
- [GUI 18] GUIHARD V., Homogénéisation de grandeurs électromagnétiques dans les milieux cimentaires pour le calcul de teneur en eau, Thèse de doctorat, Université de Toulouse III Paul Sabatier, 2018.
- [COS 09] COSENZA P., GHORBANI C., CAMERLYNCK F., REJIBA F., GUÉRIN R., TABBAGH A., « Effective medium theories for modelling the relationships between electromagnetic properties and hydrological variable in geomaterials: A review », *Near Surface Geophysics*, vol. 7, n° 10, p. 563-578, 2009.
- [BRU 35] BRUGGEMAN, « Berechnung verschiedener physikalischer konstanten von heterogenen substanzen dielektrizitätskonstanten und leitfähigkeiten der mischkarper aus isotropen substanzen », *Annalen der Physik*, 1935.
- [MAX 04] MAXWELL-GARNETT J.C., « Colours in metal glasses and in metallic films », *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1904.
- [COS 03] COSENZA P., CAMERLYNCK, TABBAGH A., « Differential effective medium schemes for investigating the relationship between high-frequency relative dielectric permittivity and water content of soils », *Water Resources Research*, vol. 39, 2003.
- [ADI 17] ADIA J.L., Modélisation multi échelle des phénomènes de retrait et de fluage dans les matériaux cimentaires : approches numériques couplant les éléments finis et la méthode de Lattice-Boltzmann, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2017.

[TOP 80] TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P., « Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines », *Water Resources Research*, vol. 16, n° 6, p. 574-582, 1980.

[SAN 07] SANAHUJA J., DORMIEUX L., CHANVILLARD G., « Modelling elasticity of a hydrating cement paste », *Cement and Concrete Research*, vol. 37, n° 10, p. 1427-1439, 2007.