

Institut Farman FR 3311 : appel à projets AAP 2016

Proposition de projet Farman – Volet scientifique

HYDEM

Caractérisation hydrique de bétons par méthodes électromagnétiques

LMT-SATIE

Intitulé du projet (acronyme ou autre) : HYDEM

Titre explicite : Caractérisation hydrique de bétons par méthodes électromagnétiques

Version : Standard

Responsables scientifiques :

Farid Benboudjema, LMT, tel : 01 47 40 74 77, mel : farid.benboudjema@ens-cachan.fr

Eric Vourc'h, SATIE, tel : 01 47 40 55 90, mel : eric.vourch@satie.ens-cachan.fr

Durée du projet : 24 mois

Membres pressentis de l'équipe-projet :

<i>Nom</i>	<i>Fonction</i>	<i>Laboratoires</i>	
Farid BENBOUDJEMA	PU	LMT	10% (~2 pers.mois)
Kamilia ABAHRI	MCF	LMT	10% (~2 pers.mois)
Jérôme CARETTE	Post-doc	LMT	10% (~2 pers.mois)
Eric VOURC'H	MCF	SATIE	15% (~3,5 pers.mois)
Franck DAOUT	MCF	SATIE	10% (~2 pers.mois)
Françoise Schmitt	MCF	SATIE	10% (~2 pers.mois)
Thierry Bore	Post-doc	Queensland University (Australie)	
A recruter	2 Stage M2R	LMT-SATIE	100% (5 pers.mois)

Partenaires hors Institut Farman : Le projet HYDEM pourra bénéficier du partenariat du **CEA Saclay** (LECBA) et de l'**Andra**, partenaires du SATIE sur des projets ayant trait à la caractérisation de matériaux pour les sites de stockage géologique de déchets nucléaires. Des moyens de caractérisation développés dans le cadre du projet LaSIPS RFhydroméca avec ces partenaires pourront être utilisés dans le projet HYDEM complémentaire du projet RFhydroméca.

Résumé du projet :

Le projet HYDEM se situe dans la perspective du contrôle santé des ouvrages de génie civil via des mesures hydriques concernant les bétons des ouvrages. Nous proposons d'étudier la pertinence de méthodes de spectroscopie diélectrique large bande appliquées à la caractérisation des propriétés hydriques des bétons. A cette fin nous proposons de mettre en œuvre une cellule de spectroscopie en transmission et réflexion afin d'analyser la sensibilité de la dépendance à la teneur en eau de la permittivité diélectrique des bétons, sur une bande de fréquence s'étendant jusqu'au GHz. Nous proposons par ailleurs d'effectuer en laboratoire, grâce à

des éprouvettes de bétons aux paramètres hydriques connus, des mesures hydriques au moyen d'une sonde de réflectométrie. Enfin, nous envisagerons l'utilisation des mêmes sondes pour caractériser le gradient de séchage et la présence d'armatures en acier sur des ouvrages de génie civil.

Description scientifique du projet

1. Problématique

Le contrôle santé des ouvrages de génie civil (ponts, barrages, tunnels, centrales nucléaires etc.) nécessite le **suiti des propriétés hydro-mécaniques** (teneur en eau, densité...) des matériaux dont ils sont faits, à commencer par **les bétons**. En effet, les structures en béton armé sont le siège de réactions de gonflement internes dépendantes de leur état hydrique — telles que la réaction sulfatique interne et la réaction alcali-granulats — qui peuvent dégrader la tenue mécanique ou l'étanchéité, voire conduire à la ruine de l'ouvrage. Ces pathologies se développent en général très lentement. Elles sont susceptibles d'apparaître après une période d'incubation de 10 à 30 ans. Par contre, après l'apparition des premiers signes de gonflement, elles se développent très rapidement avec des conséquences sur les fonctions de sûreté des ouvrages. Si les réactions de gonflement dépendent fortement de l'état hydrique du matériau c'est que les réactions chimiques mises en jeu nécessitent que l'eau soit présente dans la porosité. Notons que d'autres phénomènes méritant un suivi ou une caractérisation sont également fortement dépendants de l'état hydrique des bétons : l'hydratation, le retrait, le fluage, les propriétés de transfert de masse et d'énergie [des08, Hil14] etc. On voit par là que les caractérisations hydriques des bétons, telles que la détermination de leur teneur en eau et de la distribution spatiale de celle-ci, est un enjeu de santé des ouvrages de génie civil. Cette connaissance nécessite naturellement l'emploi de méthodes d'instrumentation adaptées.

2. Etat de l'art

Les **mesures par gammadensimètre** [Bar94] permettent de mesurer des gradients de teneur en eau. Elles nécessitent des moyens expérimentaux relativement complexes à mettre en œuvre et des précautions d'utilisation demandant des certifications en raison de leur dangerosité pour la santé. Elles ne sont pas nécessairement adaptées à des mesures in situ (i.e. sur ouvrages).

Des **mesures de résistance électrique** peuvent être utilisées afin d'estimer la porosité et la teneur en eau sur des éprouvettes humides de matériaux. Il s'agit de mesures globales, c'est-à-dire représentatives de la teneur en eau et de la porosité sur l'ensemble du volume des échantillons analysés, sans possibilité de séparer les deux effets [App06].

Les **mesures par ultrasons** [Vil15] sont par nature sensibles à des modifications des propriétés mécaniques (résistance, module d'élasticité) ou de porosité des milieux et peuvent se prêter à la mesure de l'état de saturation en eau de matériaux comme les bétons. Toutefois, du fait de l'atténuation des ondes mécaniques, la sensibilité des mesures se trouve considérablement affectée dès lors que la distance parcourue est élevée. De ce fait, les ultrasons ne sont pas nécessairement adaptés au suivi d'ouvrages d'art à l'échelle 1.

Les **méthodes électromagnétiques** relevant de la caractérisation diélectrique, peuvent elles aussi se prêter à des mesures hydriques compte tenu du fait que la permittivité diélectrique relative ϵ_r auxquelles elles sont sensibles est fonction de la composition, densité, hétérogénéité et teneur en eau des milieux, sans oublier la température.

On distingue parmi ces méthodes celles de nature électrostatique, celles de type impulsionnel (time domain reflectometry (TDR)), ou encore celles relevant de la spectroscopie (méthodes fréquentielles).

Les **méthodes électrostatiques** [Bor13, Der08] permettent d'ausculter les matériaux et de mettre en évidence leurs contrastes de permittivité diélectrique mais aussi de mesurer localement leurs grandeurs hydromécaniques.

Les méthodes impulsionnelles [Bor13b, Hag04] reposent quant à elles sur l'utilisation de sondes consistant en général en des tiges métalliques introduites dans le milieu à caractériser et sur l'estimation de la permittivité diélectrique de celui-ci via la mesure du temps de vol d'une impulsion électrique le long des tiges. Or, il s'avère que les bétons (au même titre que d'autres matériaux comme les argiles) sont dispersifs : ϵ_r dépend de la fréquence [Jon99, Miu98]. Cette dispersion est liée à différents phénomènes de

relaxation (polarisation ionique, interfaciale et dipolaire [Jon99]) intimement liés à la structure du matériau et donc à ses caractéristiques hydromécaniques (teneur en eau, densité...). Les méthodes impulsives sont mal adaptées à la caractérisation de matériaux dispersifs, notamment en raison d'une bande passante trop faible des sondes vis-à-vis de la gamme de fréquence qu'il est intéressant d'investiguer (de l'ordre du GHz, voire supérieure). Elles peuvent en outre manquer de robustesse en raison du volume d'air qu'il peut y avoir entre les tiges de la sonde et le matériau à caractériser dans lequel elles sont insérées.

Compte tenu de ces limites, nous proposons dans le cadre de ce projet Farman de chercher à **caractériser les propriétés hydromécaniques de bétons par un autre moyen**, à savoir une méthode de **spectroscopie diélectrique large bande** [Wa14, Yag07, Kre03]. L'approche proposée repose sur des mesures couvrant approximativement la gamme de fréquence s'étendant du kHz au GHz et faites au moyen d'une sonde ou d'une cellule conçue(s) à cet effet.

3. Approche proposée

L'objectif du projet est d'étudier la pertinence d'un suivi des propriétés hydriques du béton de bâtiments et d'ouvrages d'art par spectroscopie large bande — La spectroscopie repose sur un balayage en fréquence du milieu sous test au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel associé à un dispositif électromagnétique (guide d'onde, élément rayonnant...) fonctionnant en transmission ou en réflexion [Wa14, Bore13]. — Nous envisageons 3 volets à ce projet.

Cellule de spectroscopie de bétons en transmission et réflexion :

Un premier volet des travaux concernera la caractérisation diélectrique de bétons à l'aide d'une cellule de spectroscopie large bande fonctionnant tant en transmission qu'en réflexion (Figure 1). Il est en principe possible, notamment en raison des symétries géométriques de ces dispositifs, d'en modéliser le comportement électromagnétique et d'en déduire les caractéristiques diélectriques de l'échantillon sous test. Ces cellules sont des guides d'ondes hyperfréquences constitués de deux transitions symétriques connectées à une partie centrale dont le « cœur » est constitué du milieu à caractériser (en l'occurrence le béton de teneur en eau connue). Nous utiliserons une cellule coaxiale de géométrie cylindrique pour la partie centrale et conique pour les transitions.

Ces caractérisations diélectriques/hydriques nous permettront d'analyser la sensibilité de la permittivité diélectrique des bétons à leur teneur en eau, et ce en fonction de la fréquence. Notons que les échantillons de matériau nécessaires seront réalisés avec les moyens et les compétences du LMT.

Sonde spectroscopie en réflexion :

Le second volet des travaux portera sur des caractérisations de bétons présentant des teneurs en eau connues au moyen cette fois d'une sonde de spectroscopie large bande fonctionnant uniquement en réflexion (sonde à effet de bout : Figure 1). Contrairement à la cellule précédente qui ne se prête qu'à des mesures en laboratoire, on peut envisager d'utiliser une telle sonde sur des ouvrages. Toutefois, la modélisation électromagnétique de ses interactions avec le milieu sous test n'est pas triviale [Ott91], notamment parce que la géométrie du guide d'onde est ouverte à une extrémité, ce qui rend la résolution du problème inverse (détermination de la permittivité diélectrique à partir des signaux mesurés) difficile. Néanmoins, pour atteindre l'objectif visé, qui est de caractériser la teneur en eau du milieu, il n'est pas indispensable de déterminer la permittivité diélectrique. L'important est que les signaux mesurés par la sonde (coefficients de réflexion) soient eux-mêmes sensibles à la teneur en eau d'une manière que l'on puisse calibrer.

C'est ce que nous chercherons à valider. D'un point de vue pratique nous pourrons utiliser les sondes à effet de bout existantes développées par le SATIE [Fer16]. Quant aux échantillons de béton à caractériser ils seront réalisés par le LMT.

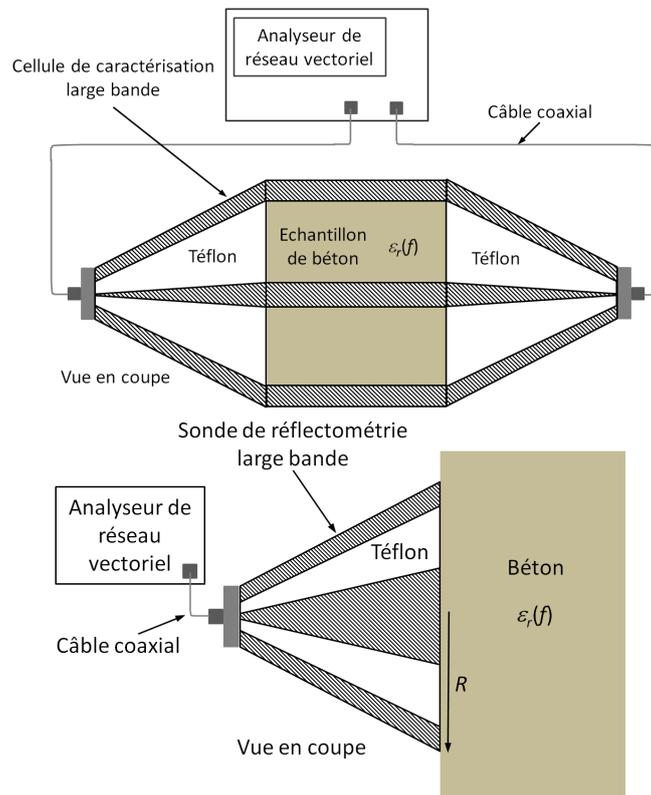


Figure 1. Cellule de caractérisation large bande (schéma de gauche :) et sonde de réflectométrie large bande (schéma de droite).

Mesures in situ :

Si, comme nous l'espérons, les résultats de la seconde étape s'avèrent probants, c'est-à-dire si les mesures par réflectométrie large bande présentent une sensibilité à la teneur en eau significative, nous nous proposons dans un troisième temps de les mettre en œuvre sur des structures réelles de Génie Civil, dans le cadre des projets de recherche actuels et futurs auxquels participent le LMT et le SATIE : maquette Vercors (enceinte de confinement de centrales nucléaires à l'échelle 1/3), maquettes ODOBA sur le site de l'ENS de Cachan ou/et sur le site de Cadarache. Ces expérimentations sur site pourront viser à caractériser le gradient de séchage et la présence d'armatures en acier, moyennant un choix approprié des zones de mesure.

Par ailleurs, les gradients d'humidité du béton étant particulièrement importants en début de séchage sur quelques centimètres en surface, il pourrait être intéressant de développer des techniques de mesure adaptées à cette problématique. Dans cette optique, il serait utile d'étudier jusqu'à quel point la taille des sondes de réflectométrie peut être réduite. Pour ce faire des simulations par méthodes éléments finis au moyen du logiciel HFSS pourront être réalisées.

4. Bibliographie

- [App06] Programme Génie Civil et Urbain (RGCU) (2006), Projet APPLÉT : Durée de vie des ouvrages en béton : Approche Prédictive Performante et probabiliste/
- [Bar94] Baroghel-Bouny, V. (1994). Caractérisation microstructurale et hydrique des pâtes de ciment et des bétons ordinaires et à très hautes performances, Thèse de doctorat de l'ENPC.
- [Bore13] Bore, T., Placko, D., Taillade, F., & Sabouroux, P. (2013). Electromagnetic characterization of grouting materials of bridge post tensioned ducts for NDT using capacitive probe. *NDT & E International*, 60, 110-120.
- [Bore13b] Bore, T., Placko, D., Taillade, F., Lesoille-Delepine, S., Six, G., & Sabouroux, P. (2013, April). Theoretical and experimental study of a time-domain-reflectometry (TDR) probe used for water content measurement of clayrock through their electromagnetic properties. In *SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring* (pp. 86921U-86921U). International Society for Optics and Photonics.
- [Der08] X. Dérobert, J. Iaquina, G. Klysz and J.-P. Balayssac, "Use of capacitive and GPR techniques for the non-destructive evaluation of cover concrete", *Nondestruct. Test. Eval.Int.*, vol. 41, no. 1, pp.44-52, 2008
- [Des08] de Sa, C., Benboudjema, F., Thiery M., Sicard J. (2008). Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage, *Cement and Concrete Composites*, vol. 30, no. 10, pp. 947-956.
- [Kre03] Kremer, F. (2003). *Broadband dielectric spectroscopy*, Berlin: Springer.

- [Hag04] Hager III, N. E., & Domszy, R. C. (2004). Monitoring of cement hydration by broadband time-domain-reflectometry dielectric spectroscopy. *Journal of applied physics*, 96(9), 5117-5128.
- [Jon99] Jonscher, A. K. (1999). Dielectric relaxation in solids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32(14).
- [Mic15] Michou A., Hilaire A., Benboudjema F., Nahas G., Wyniecki P., Berthaud Y. (2015). Reinforcement-concrete bond behavior: experimentation in drying conditions and meso-scale modeling, *Engineering Structures*, vol. 101, no. 15, pp. 570–582
- [Miu98] Miura, N., Shinyashiki, N., Yagihara, S., & Shiotsubo, M. (1998). Microwave dielectric study of water structure in the hydration process of cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(1), 213-216.
- [Ott91] Otto, G. P., & Chew, W. C. (1991). Improved calibration of a large open-ended coaxial probe for dielectric measurements. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 40(4), 742-746.
- [Fer16] Ferhat M., Vourc'h E., Daout F., Bore T., Lesoille S., Gatabin C.. Sonde de spectroscopie large bande pour la caractérisation de matériaux hétérogènes. C2i 2016 - 7ème colloque Interdisciplinaire en Instrumentation. 20-21 janvier 2016, Saint-Nazaire.
- [Vil15] Villain, G., Sbartaï, Z. M., Lataste, J.-F., Garnier, V., Dérobert, X., Abraham, O., Bonnet, S., Balayssac, J.-P., Nguyen, N. T., Fares, L., Characterization of Water Gradients in Concrete by Complementary NDT Methods, *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)* September 15 - 17, 2015, Berlin, Germany.
- [Wa14] Wagner, N., Schwing, M., & Scheuermann, A. (2014). Numerical 3-D FEM and experimental analysis of the open-ended coaxial line technique for microwave dielectric spectroscopy on soil. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 52(2), 880-893.
- [Yag07] Yagihara, S., Asano, M., & Shinyashiki, N. (2007). Broadband dielectric spectroscopy study on hydration of cement and some aqueous solution and dispersion systems. In *International Conference on Electromagnetic Wave Interaction with Water and Moist Substances (Vol. 4, pp. 15-18)*.

Originalité du projet et valeur ajoutée des différents partenaires à sa réalisation

Le LMT mène des travaux de recherche orientés vers la modélisation et la simulation numérique du comportement hydromécanique des bétons en s'appuyant sur des procédés expérimentaux traditionnels (mesures de masse ou capteurs d'humidité relative noyés sur des éprouvettes placées dans des enceintes contrôlées en température et humidité). On peut citer parmi les travaux récents sur ces sujets ceux concernant les incompatibilités de déformation hydrique entre les différents constituants du béton armé (pâte de ciment, granulats, armatures métalliques) [Mic15].

Le laboratoire SATIE s'intéresse quant à lui à la caractérisation d'ouvrages de génie civil par méthodes électromagnétiques au sens large. Il a ainsi récemment développé sur ce sujet des méthodes électrostatiques [Bor13] mais aussi impulsionnelles [Bor13b], les unes en vue de la caractérisation de câbles de précontraintes de ponts et les autres de mesures hydriques dans les argilites des sites de stockage géologique de déchets radioactifs. Le SATIE s'oriente actuellement vers les méthodes de spectroscopie diélectrique pour la caractérisation des matériaux pour le génie civil présentant des caractéristiques dispersives. Un projet est en cours depuis 2015, qui concerne le contrôle santé des scellements de bentonite (argiles gonflantes) des sites de stockage géologique [Fer16], il associe le SATIE, le CEA Saclay (LECBA) et l'Andra.

On voit que la caractérisation hydrique des bétons représente tant pour le LMT que pour le SATIE une problématique sur laquelle il est souhaitable que soient mises à profit leurs complémentarités, respectivement en matière d'études hydromécaniques des bétons et d'instrumentation électromagnétique. Ces complémentarités constituent le ressort du projet HYDEM. Son originalité réside dans l'application de méthodes de spectroscopie diélectrique large bande à la caractérisation hydrique de bétons. Choix qui se justifie par la nature dispersive de ce matériau du point de vue diélectrique.

Il est à noter que le projet HYDEM bénéficiera des moyens expérimentaux et de simulation dont disposent les deux laboratoires (mais aussi ceux développés dans le cadre de collaborations avec d'autres partenaires, à savoir l'Andra et le CEA Saclay qui seront associés au projet) :

- Enceintes climatiques, dessiccateurs et salles contrôlées en température et humidité (LMT);
- Capteurs d'humidité relative et centrales d'acquisition adaptés au suivi de l'humidité relative dans les bétons (LMT);
- Moyens de réalisation d'échantillons de béton (LMT) ;
- Banc de caractérisation hyperfréquence (incluant des analyseurs de réseau vectoriels) (SATIE) ;
- Cellule de spectroscopie diélectrique en transmission et réflexion ; sondes de réflectométrie (SATIE SATIE/ANDRA et CEA) ;
- Moyens de simulation hyperfréquence (par méthode éléments finis (logiciel FFSS)) (SATIE/ANDRA et CEA).

Publication du publication du projet scientifique sur site web Farman

Acceptez-vous la publication de ce projet scientifique sur le site web Farman ? O