

<i>Titre du Projet</i>	<b>Acronyme</b>
Vers le développement de méthodes électromagnétiques de spectroscopie RF large bande pour le suivi et la modélisation des propriétés hydromécaniques de matériaux hétérogènes : conception, réalisation et caractérisation d'une sonde pour les argiles gonflantes.	RFHYDROMECA
<b>Mots clés (choix libre)</b>	
Capteurs, instrumentation, mesures in situ, radiofréquences, spectroscopie diélectrique large bande, matériaux hétérogènes, hydromécanique	
<b>Résumé du Projet (maximum 10 lignes)</b>	
Le suivi et la modélisation des propriétés mécaniques des matériaux hétérogènes, qui trouve des applications dans l'étude des sols, l'état de santé des ouvrages d'art ou des sites de stockage de déchets radioactifs, requiert des méthodes d'instrumentation alliant génies électrique et mécanique. La spectroscopie large bande en est une, qui s'offre comme une alternative originale aux plus classiques méthodes TDR. Son développement dans un cadre RF large bande est l'objectif général de ce projet réunissant le SATIE, le CEA, le LMT et l'ANDRA. Nous proposons dans ce cadre de concevoir, réaliser et caractériser une sonde adaptée à la mesure des propriétés hydromécaniques d'argiles gonflantes (bentonites), lesquelles sont jusqu'à présent peu étudiées du point de vue électromagnétique. L'idée étant, grâce à un démonstrateur, de poser les bases sur lesquelles pourront ensuite être développés des modèles multi-physiques permettant de prévoir et de suivre l'évolution de matériaux argileux, voire d'autres milieux hétérogènes.	

<b>Coordinateur NOM Prénom</b>	<b>Sigle du Laboratoire</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Adresse mail</b>
VOURC'H Eric	SATIE	ENS Cachan	Eric.vourch@satie.ens-cachan.fr
<b>Equipe(s) participante(s) NOM Prénom</b>	<b>Sigle du laboratoire</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Adresse mail</b>
Franck Daout Dominique Placko	SATIE	ENS Cachan	prenom.nom@satie.ens-cachan.fr
Claude Gatabin	LECBA	CEA	Claude.GATABIN@cea.fr
Mohend Chaouche	LMT	ENS Cachan	chaouche@lmt.ens-cachan.fr
S. Lesoille		ANDRA	Sylvie.lesoille@andra.fr

## Exposé scientifique du projet :

### 1. Présentation du projet

#### Titre :

Vers le développement de méthodes électromagnétiques de spectroscopie RF large bande pour le suivi et la modélisation des propriétés hydromécaniques de matériaux hétérogènes : conception, réalisation et caractérisation d'une sonde pour les argiles gonflantes.

#### Problématique :

La sûreté des stockages des déchets nucléaires représente un enjeu de santé publique mais aussi écologique. Elle repose sur la capacité à réaliser des sites de stockage définitif (projet Cigéo [R1]) protégeant l'homme et l'environnement des substances radioactives sur de très longues échelles de

temps. Un système de surveillance est mis en œuvre pendant l'exploitation (100 à 1000 ans) et est partiellement maintenu en post fermeture. Ceci nécessite des techniques d'instrumentation adaptées faisant appel à des expertises pluridisciplinaires relevant notamment du génie électrique et de la mécanique [R2]. Leur conception représente un défi qui fait l'objet de projets de recherche internationaux (à l'instar du projet européen MoDeRn [R3]). Le SATIE, qui a l'expérience du développement de capteurs électromagnétiques pour des applications en génie civil [R4], le CEA et le LMT qui ont l'expertise de l'analyse du comportement des milieux hétérogènes [R5-6], s'intéressent à ces problématiques. Nous formons un projet relevant des travaux sur les propriétés hydromécaniques de matériaux de confinement (bétons, argilites, bentonites...) et des techniques d'instrumentation dites THMC (thermique, hydrique, mécanique et chimique) [R7], en référence aux caractéristiques à mesurer. Notre projet a pour originalité de concerner la bentonite, matériau encore peu étudié du point de vue électromagnétique, mais dont le suivi de caractéristiques est néanmoins important [R8]. Et c'est pourquoi l'ANDRA participe également au projet à titre d'utilisateur des développements (« end-user »), notamment dans la perspective ultérieure d'une mise en œuvre sur site (Cigéo).

Notre objectif est de concevoir et de caractériser une sonde électromagnétique RF de mesure des propriétés hydrodynamiques des bentonites. Sonde qui présentera l'originalité d'être très large bande tout en étant adaptée au milieu environnant. A plus long terme, notre objectif est d'établir, sur la base de caractérisations réalisées avec la sonde, des modèles multi-physiques (électromagnétiques/hydromécaniques) permettant de prévoir et de suivre l'évolution des milieux considérés.

#### Etat de l'art :

Les sites de stockage géologique de déchets radioactifs (tels Cigéo [R1]) sont constitués d'un réseau de galeries souterraines (situées à plusieurs centaines de mètres de profondeur) percées dans un matériau de confinement tel que l'argilite. Les architectures de stockage font appel à différents matériaux, dont ceux à base d'argile gonflante (bentonites) qui sont notamment utilisés dans les ouvrages de fermeture (fig. 1). Ces scellements ont pour fonction de limiter les flux d'eau (potentiellement vecteurs de radionucléides). Ils sont constitués d'un noyau de bentonite confiné mécaniquement entre deux massifs de béton (fig. 1). La bentonite se présente initialement sous la forme d'un assemblage de matériaux granulaires fortement hétérogène qui va s'hydrater progressivement au contact de la roche environnante pour aboutir, à terme, à un scellement de faible perméabilité à l'eau et développant une pression de gonflement de quelques MPa (fig. 2). Le gonflement de la bentonite à mesure qu'elle se sature en eau a pour effet d'aboutir, in fine, à un matériau homogène. L'étanchéité du confinement étant en partie liée au comportement hydromécanique des scellements, il est important de le connaître et de le modéliser. La compréhension des processus transitoires de resaturation dans les matériaux argileux gonflants hétérogènes est pour cela essentielle. Aussi, un capteur capable de détecter les hétérogénéités initiales, puis de suivre à la fois l'homogénéisation du matériau et sa cinétique de gonflement est particulièrement intéressant, à la fois pour des études à l'échelle du laboratoire et pour identifier les processus à l'échelle industrielle pour le monitoring des ouvrages.

Dans ce contexte, les méthodes de caractérisation électromagnétiques large gamme (ou spectroscopie diélectrique) constituent une approche privilégiée et innovante [R9] qui se pose en alternative aux traditionnelles méthodes temporelles (TDR) [R10]. En effet, les matériaux fortement hétérogènes comme la bentonite ont une permittivité diélectrique qui varie considérablement avec la fréquence [R11-12], et ce en particulier sur une bande s'étendant de 1 MHz à 10 GHz. Cette dispersion est liée à différents phénomènes de relaxation (polarisation ionique, interfaciale et dipolaire [R13]), lesquels sont intimement liés à la structure du matériau et donc à ses caractéristiques hydromécaniques (teneur en eau, densité...). C'est pourquoi la modélisation multi-physique (électromagnétique et mécanique) et large bande du spectre diélectrique sur la base d'études d'expérimentales est un moyen intéressant de remonter aux caractéristiques structurales du matériau [R14]. C'est dans une telle démarche que s'inscrit notre projet, qui est de concevoir une sonde RF large bande adaptée aux bentonites pour des applications en laboratoire, et à plus long terme in situ, en vue de l'établissement de modèles d'évolution de ces milieux. Sa réalisation devant s'appuyer sur des complémentarités en génies électrique et mécanique, présentes au sein du LaSIPS, en l'espèce au SATIE pour les unes et au CEA (LECBA) et au LMT pour les autres.

#### Résultats attendus :

Programme de travail :

Conception de la sonde : Nous proposons de concevoir une sonde répondant à trois spécifications essentielles : 1° : être large bande (1MHz – 10GHz) ; 2° : interagir avec le volume élémentaire représentatif (VER) de la bentonite ; 3° : présenter une robustesse mécanique suffisante. La première répond au besoin d'une spectroscopie large bande expliqué plus haut, la seconde tient à ce que la caractérisation de milieux fortement hétérogènes requiert des sondes adaptées à leur (VER), lequel représente en première approche au moins trois fois la taille de la plus grande hétérogénéité du milieu ( $\cong$  100 mm de diamètre pour les bentonites [R15]) (fig. 2). La dernière est liée à la pression de plusieurs MPa régnant dans les milieux considérés. L'étape de conception, qui s'appuiera sur des modélisations multiphysiques, représente une part majeure de ce projet. Les contraintes considérées nous conduisent à envisager une sonde à effet de bout (« open ended probe ») insérée dans le matériau à caractériser [R16]. De telles sondes sont habituellement exploitées pour caractériser de faibles volumes de liquides et suspensions par mesure de coefficient de réflexion [R17-18]. Le volume de matériau interrogé croissant avec l'ouverture de la sonde [R19], nous nous orientons ici vers une sonde « géante » (fig. 3), ce qui est original [R20]. Pour la concevoir, le savoir faire et les moyens du SATIE seront conjugués à ceux du CEA pour conduire les simulations électromagnétiques (champs rayonnés, adaptation d'impédance) [R21] et mécaniques (résistance à la pression...) nécessaires.

Caractérisation : La seconde étape consiste en la réalisation d'un démonstrateur et en sa caractérisation. Pour celle-ci, des calibrations de sonde seront d'abord effectuées en laboratoire au moyen de liquides de référence (i.e. dont le spectre diélectrique est parfaitement connu) [R22]. Elles seront suivies d'une étude sur un échantillon de bentonite à échelle réduite répondant aux spécificités données par l'ANDRA et réalisé grâce à l'expertise du CEA (LECBA). L'étude consistera en un suivi, via la mesure du spectre diélectrique, au moyen d'un banc d'instrumentation large bande développé au SATIE, de l'évolution dans le temps (sur 2 mois) de la bentonite. Une cellule spécifique sera conçue et réalisée. Elle permettra l'intégration du capteur, la construction d'un échantillon représentatif et son hydratation, ainsi qu'un suivi hydromécanique : pression de gonflement, degré de saturation.

Validation de la méthode : Enfin, sur la base de ces mesures, la méthode de caractérisation de matériaux proposée sera validée au travers d'une étude de sensibilité aux phénomènes hydromécaniques sur une large bande. L'expertise du LMT en matière d'analyse du comportement de milieux hétérogènes sera ici déterminante [R6].

Les résultats directement attendus de ce projet sont ceux de la faisabilité d'une sonde innovante pour la spectroscopie RF large bande de matériaux hétérogènes, alternative potentielle aux traditionnelles méthodes temporelles (TDR). Le concept de cette sonde spécifiquement dimensionnée pour la caractérisation de bentonites ayant le potentiel d'être étendu à celle d'autres milieux, notamment les sols et les bétons.

Et si, comme nous l'imaginons, la méthode de caractérisation proposée s'avère concluante, i.e. suffisamment sensible aux phénomènes hydromécaniques considérés, le développement de modèles multi-physiques (électromagnétiques/hydromécaniques) pour l'estimation des paramètres structuraux de matériaux pourra être envisagé sur la base de campagnes de mesures à moyen terme (s'étendant de plusieurs mois à une année). Une perspective à plus long terme étant l'implantation de sondes in situ à l'échelle industrielle pour le monitoring des ouvrages (sites de stockage géologique de déchets radioactifs (projet Cigéo). La méthodologie de caractérisation, de modélisation et de monitoring développée pour les bentonites ayant, là encore, le potentiel d'être étendue à d'autres matériaux (sols et bétons) et sites industriels (ouvrages d'art).

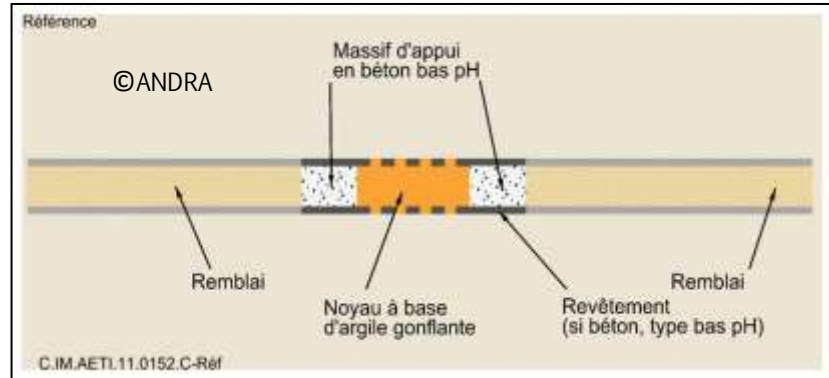
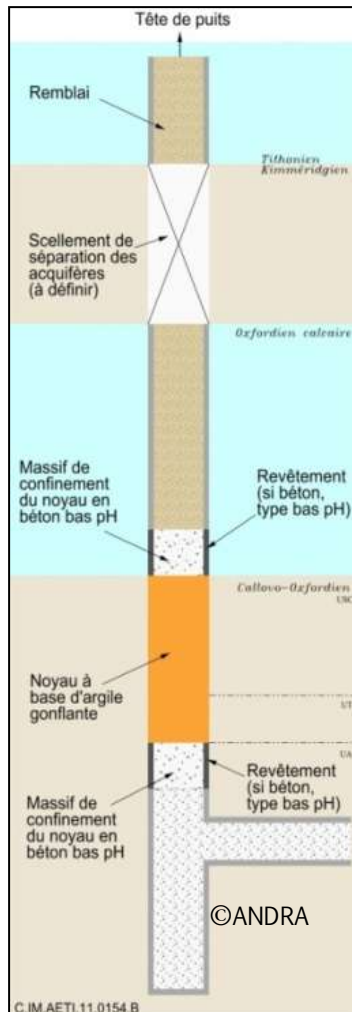


Figure 1.a (ci-dessus) : Schéma d'une galerie de site de stockage géologique de déchets radioactifs.

Figure 1.b (à gauche) : Schéma d'un puits de site de stockage géologique de déchets radioactifs.



Figure 2 : Illustration du caractère hétérogène et évolutif de la bentonite : assemblage granulaire sec de pellets initial (billes fortement compactées de diamètre 32 mm, et de concassé de pellets de granulométrie comprise entre 0 et 2,5 mm dans les proportions 70/30 : photographie de gauche) ; bentonite après hydratation (photographie de droite).

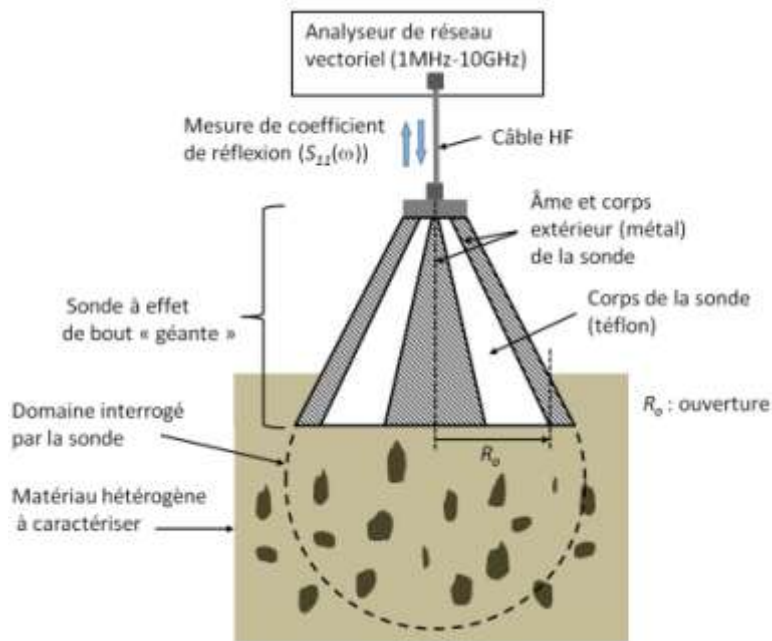


Figure 3 : Schéma de principe d'une sonde à effet de bout géante (vue en coupe) pour la mesure large bande de spectre diélectrique par réflectométrie.

#### Références

[R1] <http://www.Cigéo.com/>

[R2] Buschaert, S., Lesoille-Delepine, S., Bertrand, J., and Landais, P., "Andra's geologic repository monitoring strategy", Proc. of the 5th Clays in Natural and Engineered Barriers for Radiocative Waste Confinement, Montpellier (2012)

[R3] <http://www.modern-fp7.eu/>

[R4] Bore, T., Placko, D., Taillade, F. and Sabouroux P. (2013), Electromagnetic characterization of grouting materials of bridge post tensioned ducts for NDT using capacitive probe, NDT & E International, Volume 60, Pages 110-120.

[R5] Gens Solé, A., Vállejan, B., Sánchez, M., Imbert, C., Villar, M. V., & Van Geetl, M. (2011). Hydromechanical behaviour of a heterogeneous compacted soil: experimental observations and modelling.

[R6] Zreiki, J.; Bouchelaghem, F.; Chaouche, M. (2010), Early-age behaviour of concrete in massive structures, experimentation and modelling. NUCLEAR ENGINEERING AND DESIGN Volume: 240 Issue: 10 Pages: 2643-2654.

[R7] Rutqvist, J., Feng, X. T., Hudson, J., Jing, L., Kobayashi, A., Koyama, T. & Yamamoto, Y. (2006). Multiple-code benchmark simulation study of coupled THMC processes in the excavation disturbed zone associated with geological nuclear waste repositories. Lawrence Berkeley National Laboratory.

[R8] Kupfer, K., Trinks, E., Wagner, N., & Hübner, C. (2007). TDR measurements and simulations in high lossy bentonite materials. Measurement Science and Technology, 18(4), 1118.

[R9] Kremer, F. (2003). Broadband dielectric spectroscopy, Berlin: Springer.

[R10] Königer, F., Emmerich, K., Kemper, G., Gruner, M., Gaßner, W., Nüesch, R., & Schuhmann, R. (2008). Moisture spreading in a multi-layer hydraulic sealing system (HTV-1). Engineering Geology, 98(1), 41-49.

[R11] Asami, K. (2002). Characterization of heterogeneous systems by dielectric spectroscopy. Progress in Polymer Science, 27(8), 1617-1659.

[R12] Lesmes, D. P., & Morgan, F. D. (2001). Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978-2012), 106(B7), 13329-13346.

[R13] Jonscher, A. K. (1999). Dielectric relaxation in solids. Journal of Physics D: Applied Physics, 32(14).

[R14] Wagner, N., T. Bore, J.-C. Robinet, D. Coelho, F. Taillade, and S. Delepine-Lesoille (2013), Dielectric relaxation behavior of Callovo-Oxfordian clay rock: A hydraulic-mechanical-electromagnetic coupling approach, J. Geophys. Res. Solid Earth, Volume 118; Issue 9, Pages 4729 - 4774.

- [R15] Van Geet, M., Maes, N., Aertsens, M., Volckaert, G., Imbert, C., Billaud, P. & Mingarro, M. (2005). RESEAL II. A large scale in situ demonstration test for repository sealing. Final report on laboratory tests (WP1), in the 5th EURATOM framework programme, key action nuclear fission.
- [R16] Grant, J. P., Clarke, R. N., Symm, G. T., & Spyrou, N. M. (1989). A critical study of the open-ended coaxial line sensor technique for RF and microwave complex permittivity measurements. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 22(9), 757.
- [R17] T. Marsland and S. Evans, "Dielectric measurements with an open-ended coaxial probe," *IEEE Proc. Microw., Antennas Propag.*, vol. 134, no. 4, pp. 341–349, Aug. 1987.
- [R18] 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.
- [R19] Meaney, P. M., Gregory, A. P., Epstein, N. R., & Paulsen, K. D. (2014). Microwave open-ended coaxial dielectric probe: interpretation of the sensing volume re-visited. *BMC medical physics*, 14(1), 3.
- [R20] 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.
- [R21] Vourc'h, E., Joubert, P.-Y., Cima, L., (2009), "Analytical and numerical analyses of a current sensor using non linear effects in a flexible magnetic transducer", *Progress In Electromagnetics Research Journal, PIER* 99, 323-338.
- [R22] Kaatz, U., (2007), Reference liquids for the calibration of dielectric sensors and measurement instruments, *Meas. Sci. Technol.*, 18(4), 967-976