2. Les allocations doctorales

2.1. DADIM-PdL_

Titre : **Diagnostic Autonome et à Distance des Infrastructures Maritimes en région Pays de la Loire**

Porteur du projet : Mohamed LATRACH
Laboratoire : ESEO-Angers, Equipe RF-EMC, IETR UMR CNRS 6164
Laboratoire associé : CEREMA, Université Gustave Eiffel, campus de Nantes

Doctorant : Théo RICHARD / MathSTIC de l'Université Bretagne Loire
Encadrant : X. DEROBERT (Université Gustave Eiffel), M. LATRACH (ESEO-IETR) & A. IHAMOUTEN (CEREMA) avec la participation de C. BORDERON (Université de Nantes)

Mots clés : Capteur sans puce, Capteur de corrosion, Capteur sans fil enfoui, SHM, CND, Sans contact, Infrastructures maritimes, Matériau dispersif, Béton.

Verrous scientifiques ou technologiques levés :
Réalisation d'un capteur sans puce et à coût, taille, poids les plus bas.
Réduction des effets, des propriétés intrinsèques du milieu en béton, pouvant altérer le fonctionnement de l'élément rayonnant du capteur.
Design et dimensionnement d'une charge réactive constituante la partie sensible, aux ions chlorures, du capteur.
Validation d'une structure de capteur sans puce électronique qui permettrait de renseigner, par réflexion du signal incident, sur le niveau d'infiltration ou non des ions de chlorure dans les bétons des infrastructures maritimes facilement accessibles ou non.
Une telle structure et la méthodologie développées peuvent répondre aux attentes d'un grand nombre d'applications dans d'autres domaines tels que les domaines industriel, agricole, militaire et autres.

Etat : La durée du projet a été fixée du 01 novembre 2015 au 31 octobre 201**9.**
La thèse a débuté mi-décembre 2015 et sera soutenue le 25 novembre 2020.

2.1.1. Résumé du projet

Pour une stratégie de gestion durable des infrastructures maritimes en construction ou existantes, la maîtrise des mécanismes de dégradation des bétons armés, sous l'effet de la corrosion des aciers en présence d'agents agressifs tels que les ions de chlorure (Figure 1 et Figure 2 ci-dessous) est indispensable pour une maintenance préventive des ouvrages.

Figure 1. DADIM-PdL : Effet de la corrosion[1]

[1] A NACE International White Paper, "Corrosion Control Plan for Bridges", November 2012

Figure 2– DADIM : Photo d'une structure maritime en béton dégradée par les chlorures[2]

Le projet "Diagnostic Autonome et à Distance des Infrastructures Maritimes en région Pays-de-Loire", (DADIM-PdL) aura donc pour objectif primaire d'utiliser des matériaux conventionnels pour la conception innovante d'un outil de suivi et de surveillance non destructif, ne nécessitant aucune alimentation en continu (sans batterie intégrée ni utilisation d'autres moyens), configuré pour une activation et une lecture des données à distance (Figure 3). Une importance sera donnée à la réduction de coût et à la miniaturisation du dispositif (outil) qui, après validation sur des structures contrôlées en laboratoire, permettra de suivre les fronts de pénétration des chlorures dans les ouvrages.

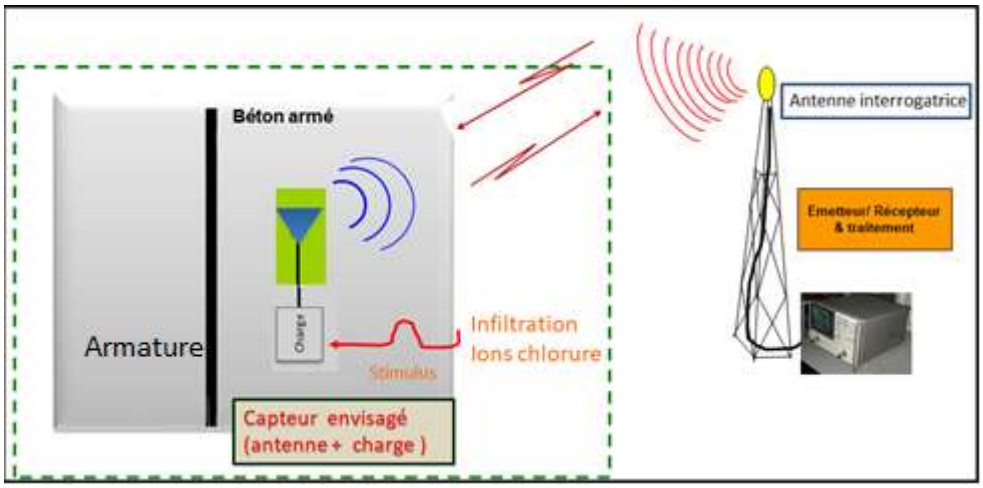

Figure 3. ADIM-PdL : Principe du fonctionnement du dispositif à développer

Par ailleurs, ce projet multidisciplinaire se situe à l'interface entre les spécialités "physique du solide / sciences des matériaux" et "électronique / hyperfréquences". Il est proposé par l'ESEO-IETR d'Angers (pour les aspects de conception/simulation/tests de la topologie de capteurs à fonctionnement en mode réflecteur ainsi que pour l'analyse et l'étude de la propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux séparant le capteur enfoui dans le béton, de l'antenne interrogatrice externe) en étroite collaboration avec l'IETR de Nantes (pour la partie matériaux) et le CEREMA d'Angers/ Université Gustave Eiffel, campus de Nantes (pour l'aspect de la détection, sensibilité aux chlorures, réalisation des échantillons en béton et validation expérimentale).

La détection autonome et la transmission sans fil permettent l'emploi du système dans nombre d'environnements différents, incluant ceux difficilement accessibles.

Les travaux de thèse constituent l'essentiel des travaux menés dans le cadre de ce projet.

[2] W.H; Hartt, Corrosion vol. 70, pp 156-165, Aug 2013

2.1.2. Résultats du projet

2.1.2.1. Résumé des travaux de thèse

L'évolution naturelle du béton hydraulique ainsi que l'effet généré par des agents pathogènes (i.e. ions chlorure) ont un impact direct sur la durabilité des structures en béton armé. Le sujet de thèse avait pour objectif de mettre en œuvre une nouvelle approche SHM des ouvrages d'arts. Cette approche repose sur le développement d'un capteur passif, autonome et à faible coût, intégré directement dans l'enrobage en béton des ouvrages et communicant sans fil avec des interrogateurs externes. Cette solution technologique vise à établir un processus de maintenance prédictive à partir du suivi des fronts de pénétration des chlorures afin d'éviter la corrosion des armatures. Une phase préliminaire de l'étude a permis de définir, en se basant : sur la littérature, les travaux développés par le CEREMA et l'université Gustave Eiffel, campus de Nantes et les moyens de calcul, la bande de fréquences pouvant engendrer un fonctionnement optimal de système (Interrogateur/ capteur enfoui dans le béton). La suite de l'étude a permis, en se basant sur les simulations numériques et les expérimentations, de choisir et d'optimiser la topologie du capteur (antenne + charge). L'antenne doit être insensible au béton et la charge doit être sensible à l'infiltration des chlorures dans la structure d'ouvrage.

Les premiers prototypes d'antennes noyées insensibles, aux changements d'états diélectriques des bétons sains et dégradés, ont pu être optimisés numériquement, simulés, réalisés et testés expérimentalement (Figure 4 et Figure 5).

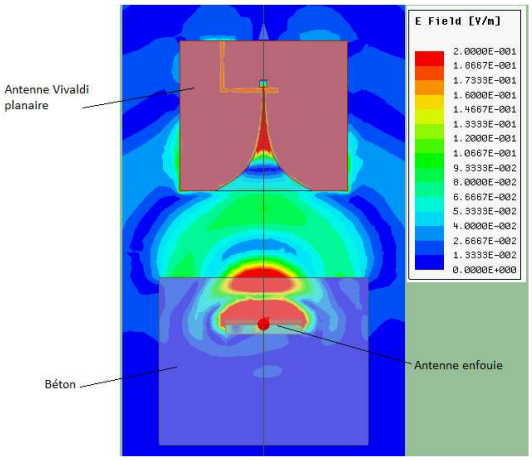

Figure 4. DADIM-PdL : Simulation du champ électrique rayonné, à f= 1,55 GHz, par l'antenne enfouie dans un volume en béton

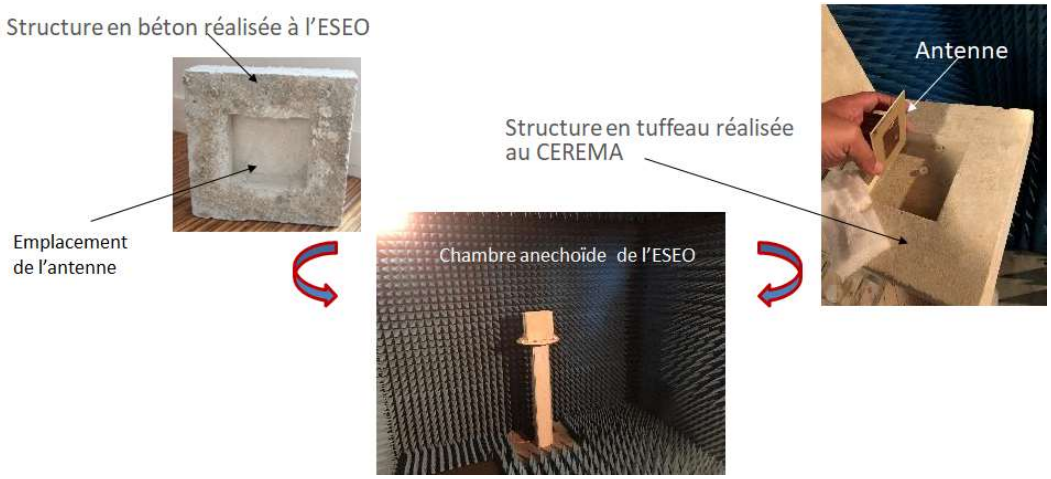

Figure 5. DADIM-PdL : Etude expérimentale de l'antenne en présence du tuffeau et du béton

Ces antennes ont été ensuite couplées à des charges en périphérie de leurs surfaces rayonnantes. Ces charges sont quant à elles sensibles et dégradables en présence des ions chlorures. L'association de ces deux éléments définit l'architecture du capteur passif et autonome (Figure 9)

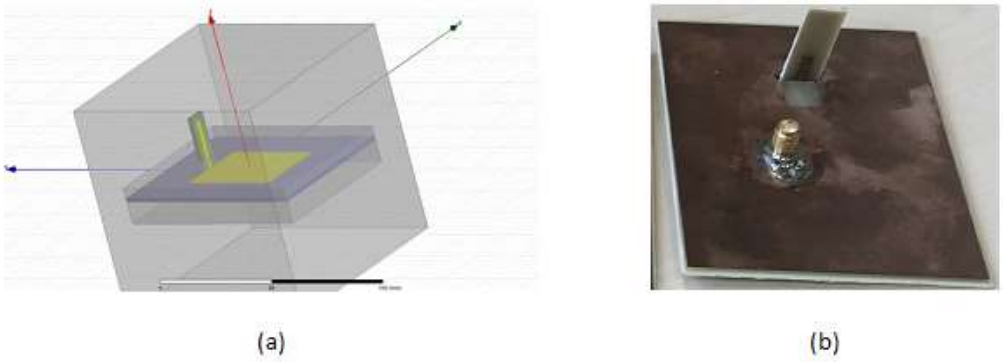

Figure 6. DADIM-PdL : Structure de capteur : (a) Modélisation sous HFSS, du capteur avec la charge en avant, en présence du béton, (b) photo du capteur avec la charge en arrière

Le principe de fonctionnement du capteur est relié à la corrosion de la partie conductrice, de la charge, en contact direct avec le milieu à surveiller et donc les chlorures en présence. Cette dégradation induit une modification de la fréquence de résonance du capteur qui fait office d'indicateur de dégradation de l'enrobage en béton. Grâce à la réflexion des ondes EM émises depuis une antenne en surface de la structure, il est possible de récupérer l'information relative à l'état de corrosion de la charge. Cela définit ainsi le principe de la solution technologique, sans alimentation et sans électronique intégrée, proposée. Enfin, de larges campagnes expérimentales, sur des nombreux corps d'épreuves en béton contrôlés en laboratoire et représentatifs du parc d'ouvrages régional (Figure 7), ont permis, moyennant un traitement numérique approprié (Figure 8a), l'extraction des fréquences de fonctionnement correspondants aux capteurs réalisés (Figure 8b) et de valider, par conséquent, l'approche proposé et mis au point.

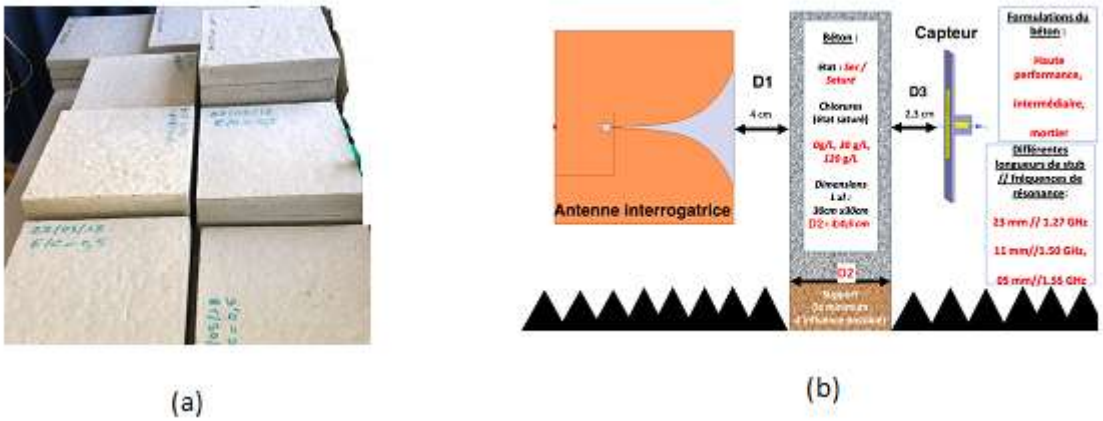

Figure 7. DADIM-PdL : Etudes expérimentales sur des échantillons en béton représentatifs de parc d'ouvrage régional : (a) Echantillons réalisés, (b) Schéma du montage expérimental

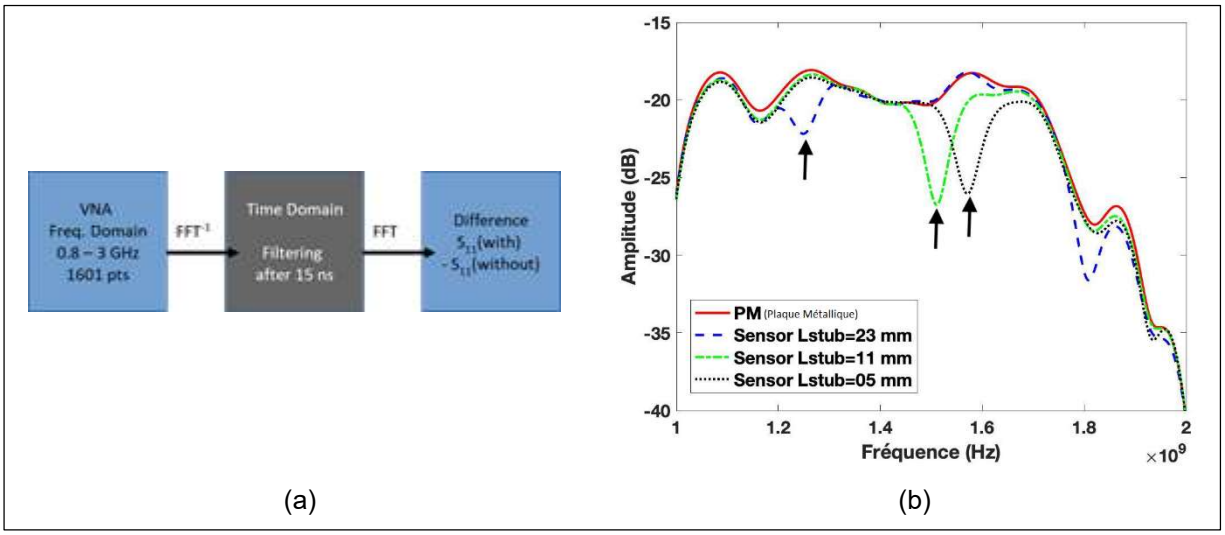

Figure 8. DADIM-PdL : DADIM-PdL : Extraction des fréquences de fonctionnement de trois capteurs :

(a) Procédure d'étalonnage et de traitement du signal, (b) cas d'un échantillon en béton sec, d'épaisseur 5 cm et du rapport Eau/Ciment égal à 0,5

2.1.2.2. Publications

Les travaux menés, dans le cadre de ce projet, ont donné lieu à 2 publications en conférence internationale :

Théo RICHARD, Mohamed LATRACH, Amine IHAMOUTEN, Caroline BORDERON, Hartmut W. GUNDEL and Xavier DEROBERT, "Design of an UHF Antenna Insensitive to the Concrete Dielectric Characteristics", ENDE 2017, 6-8 september, Sacly, France.
Article publié également dans la revue IosPress en accès libre : http://ebooks.iospress.nl/ISBN/978-1-61499-836-5

Théo RICHARD, David GUILBERT, Amine IHAMOUTEN, Hartmut W. GUNDEL, Caroline BORDERON, Mohamed LATRACH and Xavier DEROBERT, "Structural health monitoring of civil engineering structures using GPR detection of patch antenna resonance frequency changes", 10th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, September 8-12, 2019, The Hague, Netherlands.

2.1.2.3. Dissémination

Le projet a été présenté dans des journées scientifiques et conférences :

Mohamed LATRACH, "Capteurs Électromagnétique Noyés Dans Le Béton" - Journée scientifique : " Évaluation non destructive dans le génie civil de l'énergie", organisé par le GERi END et l'AR SHM-END de l'Ifsttar, le 30 novembre 2017 à l'Ifsttar, site de Nantes.

Mohamed LATRACH, Théo RICHARD, Amine IHAMOUTEN, Xavier DEROBERT, "Caractérisation d'une Antenne Enfouie dans une Structure En Béton"- Ansys, Innovation Conference, 5-6 décembre 2017, Paris.

Théo Richard, "Choix et étude d'une antenne insensible à la présence de matériaux dans son environnement proche" - Journée des doctorants 2017 – ED MathSTIC (ex STIM), Université de Nantes

M. LATRACH, "Diagnostic Autonome et à Distance des Infrastructures Maritimes En région Pays-de-Loire" – Journée scientifique de Wise, 05 juillet 2018, Nantes.

Mohamed LATRACH, Théo RICHARD, Xavier DEROBERT, Amine IHAMOUTEN, H.W. GUNDEL, "Capteur sans puce électronique pour détecter l'infiltration de chlorure dans le béton », Journée scientifique du GIS ECND-PdL, 7 novembre 2019 à Centrale Nantes.

M. LATRACH, "Smart Sensors & Case study: DADIM-PdL project", Keynote speaker - The 3rd ICCWCS, April 24-25, 2019, Kénitra, MOROCCO.

Des présentations ont été faites également auprès des équipes/ laboratoires de recherche Françaises, Québécoises et autres.

2.1.2.4. Equipement et ressourcement

La subvention acquise a permis :

- De financer le salaire du doctorant Théo RICHARD ;
- Le financement d'un stagiaire, Mohamed IKHLEF, dans le cadre de son stage de Master2-CISE, Université de Nantes. Le sujet de stage portait sur les " Techniques de récupération d'un signal réfléchi par un capteur passif enfoui" et a eu lieu du 01/04/2018 au 15/09/2018 ;
- Achat de consommables (substrats, connecteurs, etc.), de matériaux et accessoires de construction ;
- La participation à des conférences ;
- Et les frais des déplacements.