



FONDATION D'ENTREPRISE

FEREC

Morpho-Predict

Fondation d'entreprise FEREC

Appel à projets 2018

Des innovations numériques pour la conception, la construction, l'évaluation et la maintenance des infrastructures

MORPHOSENSE



Cerema

Mikael CARMONA / Amine IHAMOUTEN

MORPHOSENSE / CEREMA (ENDSUM)

Décembre 2019

Version finale

Sommaire

1	Résumé	3
2	Contexte et objectifs du projet	4
3	Description des travaux menés	6
4	Utilisation de l'aide de la Ferec dans le projet	7
5	Résultats acquis	8
6	Impact	12
6.1	Appports et retombées pour la collectivité.....	12
6.2	Mise en évidence du caractère collaboratif et d'intérêt général.....	12
6.3	Publications et autres éléments de communication auxquels le projet et ses résultats ont donné lieu.....	12
7	Perspectives ouvertes par le projet notamment en matière de recherche collaborative 13	
8	Références	14
9	Glossaire	15
10	Annexe : Description du système NEURON	16
11	Annexe : Description du système RSF	17

1 Résumé

Ce document est le rapport de synthèse du projet Morpho-Predict porté par Morphosense et le Cerema et subventionné par la FEREC. Cette version finale intègre les commentaires du comité de lecture qui ont été transmis le 02 décembre 2019.

Le projet Morpho-Predict s'inscrit dans une démarche plus générale initiée par les deux partenaires sur le développement d'une technologie et méthodologie dite « hybride » pour améliorer vers une innovation de rupture la maintenance prédictive des infrastructures. L'approche hybride est dite multi-physiques (considérations des phénoménologies mécanique statique, mécanique dynamique, magnétique et électro-magnétique) et se projette jusqu'au développement industriel du produit associé.

Cette innovation de rupture a été supportée par la FEREC et plus récemment par l'ANR à travers une subvention du programme LabCom de 300 k€. Ceci a accéléré le développement des travaux techniques mais également la visibilité de Morphosense et du Cerema auprès des collectivités locales et conseils départementaux. Les gains FEREC et ANR ont donc propulsé l'innovation portée par le Cerema et Morphosense au premier plan, ce qui favorise le bon déroulement de la roadmap attachée à cette initiative.

Ce présent rapport suit la trame proposée par la FEREC avec un rappel du contexte du projet, son organisation, ses résultats et ses perspectives. En complément de ce livrable, une présentation générale du projet aura lieu le 26 septembre 2019 à la FNTP et un poster sera édité pour favoriser la communication autour du projet.

2 Contexte et objectifs du projet

Le suivi de l'état de santé des infrastructures est un fort enjeu pour les gestionnaires d'infrastructures quelles soient pour le transport (ponts, tunnels), l'énergie (barrages), le bâtiment, entre autres. Les analyses de marché sur ce sujet mondial s'accordent sur la statistique suivante : 10% des structures d'un maître d'ouvrage est dans un état identifié critique et 1% dans un état très critique. Quantitativement, cela impliquerait 15 000 infrastructures très critiques dans le monde dont 500 en France.

La criticité d'un parc d'ouvrage augmente naturellement avec le temps mais est accélérée par l'absence de méthodes prédictives « efficaces ». Il faut comprendre le terme « efficace » au sens de l'équation économique que doit résoudre au quotidien les gestionnaires. A ce jour, les expertises programmées mènent à une détection tardive des pathologies qui entraînent une situation d'urgence avec des coûts de diagnostic et de réparation élevés.

Une méthode prédictive dite efficace mène à un gain de 4 à 10 par rapport à des méthodes curatives. Ce gain a été démontré à toutes les échelles dans divers rapports : des collectivités locales aux ministères en charge d'infrastructures que ce soit en France, aux Etats-Unis, au Canada, au Japon, entre autres.

La difficulté d'arriver à une méthode prédictive efficace provient de la limite des méthodes actuelles qui ne s'intéressent pas aux phénoménologies complexes qui traduisent les signes précurseurs des pathologies de l'infrastructure. Pour répondre au besoin des gestionnaires de suivi de l'évolution de la durée de vie/état de santé des infrastructures, l'état de l'art technique et technologiques montrent que seules les approches d'évaluation non destructives multi-techniques/technologiques et multi-physiques pourront le lever le verrou de la prédictibilité avec une représentativité globale de la structure. L'objectif est de définir un nouvel indicateur de performance et/ou de durabilité intrinsèque aux pathologies structurelles (*i.e* corrosion).

Le projet Morpho-Predict soutenu par la FEREC et l'ANR (à travers le LabCom OHMIGOD) s'attache à la définition et la mesure d'un nouvel indicateur de durabilité au regard de la corrosion qui est la pathologie majeure des ouvrages d'art. Les différentes études de marché et état de l'art sont formelles sur l'absence de solution existantes et cela traduit le caractère novateur et complexe de l'approche initiée par Morphosense et le Cerema.

La démarche consiste à étudier l'approche multi-physiques fusionnant les physiques suivantes :

- Ondes électromagnétiques (EM) dans la gamme des hyper-fréquences pour l'étude du comportement diélectrique en propagation proche surface des structures en béton (GPR, RSF, ...) pour en déduire un indicateur relatif à la teneur en eau qui est un acteur majeur dans le mécanisme de transfert des agents pathogènes (*i.e* ions chlorure) ;
- Champ magnétique pour la détection des fronts de corrosion dans le béton d'enrobage et l'évaluation de sa vitesse à partir d'une technique en cours de dépôt de brevet par le Cerema ;
- Géométrie : suivi de l'évolution de la géométrie de l'ouvrage qui signe sa réponse aux charges statiques/quasi-statiques ainsi que le gonflement lié à certaines pathologies du béton ;
- Ondes mécaniques : propagation des ondes mécaniques qui signent les caractéristiques modales mais également locales du béton.

On trouvera dans la section **Référence** une bibliographie sur les techniques basées sur les ondes EM et le champ magnétique. La solution NEURON, qui intervient dans la caractérisation géométrique et par ondes mécaniques est brièvement présentée en **Annexe**.

Prises indépendamment et malgré des maturités technologiques différentes, ces techniques ont déjà fait leur preuve. L'objectif du programme de recherche lié de manière générale au LabCom est de fusionner ces technologies et les équations qui décrivent les phénomènes qu'elles mesurent. Cette modélisation multi-physiques est un premier challenge qui amorcera l'étape suivante d'inversion du modèle multi-physiques pour remonter à l'indicateur de durabilité. La faisabilité de cette approche entrainera le développement de l'interopérabilité de ces technologies pour associer à l'algorithme d'inversion et restitution de l'indicateur une technologie – dit système hybride – qui soit fiable et aisément déployable sur les infrastructures pour faire un outil scalable et qui s'impose comme référence dans marché international du suivi des infrastructures.

Le projet Morpho-Predict est le prologue de l'approche décrite dans le paragraphe ci-dessus. Il consiste à établir un cahier des charges préliminaire des composants du système hybride et à mener une campagne expérimentale préliminaire pour se familiariser avec l'hybridation des différentes technologies/phénoménologie visées par le projet.

3 Description des travaux menés

Les travaux menés dans le cadre du projet se distinguent selon trois tâches :

1. Etat de l'art pour consolider le positionnement novateur et pertinent de l'approche hybride.

Par essence, le Cerema a un positionnement privilégié sur la connaissance des besoins des gestionnaires d'infrastructures et l'avancée des connaissances dans le domaine de la maintenance prédictive faisant appel à des techniques non destructives. Dans la phase de montage du LabCom OHMIGOD, l'équipe ENDSUM du Cerema a sollicité la majorité des unités opérationnelles au contact des collectivités locales sur l'intérêt de l'approche hybride. Le montage a également nécessité la labellisation par des pôles compétents pour évaluer la pertinence de la solution proposée au regard de l'état de l'art.

En parallèle de la validation du besoin et du caractère novateur de l'approche hybride, Morphosense et le Cerema ont validé l'absence d'état de l'art technique, technologique et méthodologique sur l'approche multi-physiques EM/Mécanique pour améliorer les méthodes d'évaluation non destructives actuelles relatives à la corrosion. Cet état de l'art s'appuie sur les expertises et expériences de Morphosense et du CEREMA acquises bien avant le projet.

En conclusion, cette première tâche du projet Morpho-Predict a consolidé, comme attendu, le positionnement de l'approche hybride tant au niveau du besoin que de la technique.

2. Campagne expérimentale préliminaire et formalisation des résultats

Dans sa roadmap, ENDSUM (Cerema) à élaborer avec l'IFSTTAR une campagne expérimentale unique au monde qui consiste à se munir de 137 corps d'épreuves en béton contrôlés (dont 30 dalles) en termes de géométrie, formulation, teneur en eau, teneur en chlorures, entre autres. Contrairement aux expériences passées et/ou connues de la littérature, le nombre élevé de corps d'épreuve ainsi calibrées permet de faire des statistiques exhaustives sur les études menées sur les bétons : sensibilité des méthodes EM et mécanique à la teneur en eau, à la présence d'ions chlorure, idem pour la détection et le suivi de la corrosion par méthode magnétique.

Concernant le projet Morpho-Predict, la campagne expérimentale s'est appuyée sur les dalles pour valider les premiers préceptes de la méthode hybride sur des essais singuliers. En plus des résultats attendus, la prise en main des 3 technologies concernées par l'approche hybride a mené à des résultats non prévus et positifs pour le développement futur de la technologie hybride.

Les résultats sont formalisés dans la section 5 de ce rapport.

3. Formalisation des conclusions sur l'état de l'art et la campagne expérimentale.

La dernière tâche du projet est la formalisation des résultats qui s'établit selon trois supports : ce présent rapport, la présentation orale prévue pour le 26 09 2019 et un poster de présentation.

4 Utilisation de l'aide de la Ferec dans le projet

Avant de décrire formellement l'aide de la FEREC, il est important de préciser que l'approche hybride Morphosense/Cerema a également été primée par l'ANR à travers le gain d'un LabCom (OHMIGOD, 300 k€) dont le démarrage officiel est septembre 2019. A ce titre, l'aide de la FEREC a pu réellement être utilisée comme amorce aux travaux du LabCom, c'est – pour rappel – ainsi que le projet Morpho-Predict avait été construit.

Concrètement, l'aide de la FEREC dans le projet a été utilisée comme suit :

- Contribution au financement de la stagiaire Sima KADKHODAZADEH (rémunération et matériel de travail) dont le sujet est l'étude des phénomènes magnétiques provoqués par la corrosion au sein du matériau béton.
- Contribution à la formulation, la fabrication et la caractérisation des corps d'épreuves conditionnées qui représentent un jeu de bétons unique au monde pour la caractérisation et l'évaluation de diverses méthodes d'évaluations non destructives.
- Mobilisation des moyens d'essais de Morphosense (NEURON) et du Cerema (RSF, Centrale Inertielle, Analyseur de réseau, Chambre Anéchoïde, centrale à béton, banc gammadensimétrique, matériel de caractérisation chimique et mécanique, ...) lors de la campagne d'essais.
- Mise à disposition des experts de Morphosense et du Cerema attachés aux études de modélisation et d'expérimentation.

Le budget associé au projet dont l'aide de la FEREC a permis de le mener à bien.

5 Résultats acquis

La section précédente a rappelé les tâches principales du projet Morpho-Predict. Les résultats de la tâche relative à l'état de l'art ont déjà été commentée dans la section 4. Cette section se focalise sur les résultats techniques de la campagne expérimentale.

Pour rappel, la campagne expérimentale du projet Morpho-Predict s'intègre dans une campagne expérimentale bien plus large, initiée par le Cerema. Cette campagne initiale a pour vocation de disposer d'un grand nombre de dalles calibrées pour aller au-delà de la déduction de tendances et obtenir des résultats qui dépassent l'état de l'art.

Relativement à Morpho-Predict, la campagne expérimentale s'est intéressée à l'étude de sensibilité des 3 technologies concernées par la solution hybride à différentes topologies de dalles (formulation, teneur en eau, teneur en chlorures, épaisseur) et de valider également le principe de détection de corrosion par méthode magnétique. Par chaque technologie, les résultats sont les suivants :

Détection de corrosion par méthode magnétique. L'objectif de cet essai est d'évaluer l'effet du type de béton et de l'épaisseur du béton sur le champ magnétique émis par le capteur magnétique noyé dans l'enrobage en béton (Figure 1).



Figure 1. Configuration expérimentale avec un nœud de mesure NEURON (image de gauche) en mode interrogateur magnétique en surface couplé à 2 dalles en béton calibrées avant le positionnement du capteur magnétique (image de droite).

Les premiers essais ont tout de suite revalidé ce qui avait démontré lors du dépôt de brevet sur la solution : la sensibilité de la technologie magnétique (non détaillée dans ce cadre pour des raisons de confidentialité antérieure au présent projet) à la nature de la corrosion (Figure 2). Les essais ont également montré l'insensibilité des lignes de champ magnétique aux états physiques et hydriques de l'enrobage en béton ce qui est un vrai atout pour le monitoring d'une masse ferromagnétique noyée dans le béton sans interférence avec l'état du milieu de couplage. Une multitude d'essais ont été menés pour approfondir la caractérisation de la détection en fonction des paramètres influents : distance capteur/interrogateur en surface, polarisation magnétique, alignement capteur/interrogateur en surface, répétabilité et sensibilité aux changements des états physiques et hydriques (formulation, teneur en eau, ...). A ce jour, les résultats ne sont pas encore synthétisés mais ils témoignent de la faisabilité et de la robustesse de l'approche. A ce point positif s'ajoute que l'interrogateur magnétique utilisé est déjà intégré dans la solution NEURON de Morphosense. Ceci implique que l'approche d'auscultation depuis la surface d'une structure en béton décrite sur la figure ci-dessus (à gauche) est technologiquement accessible dans un temps très court. Les étapes qui suivent ces résultats, sont hors du projet Morpho-Predict, et concernent l'intégration des capteurs magnétiques du Cerema dans les structures en béton.

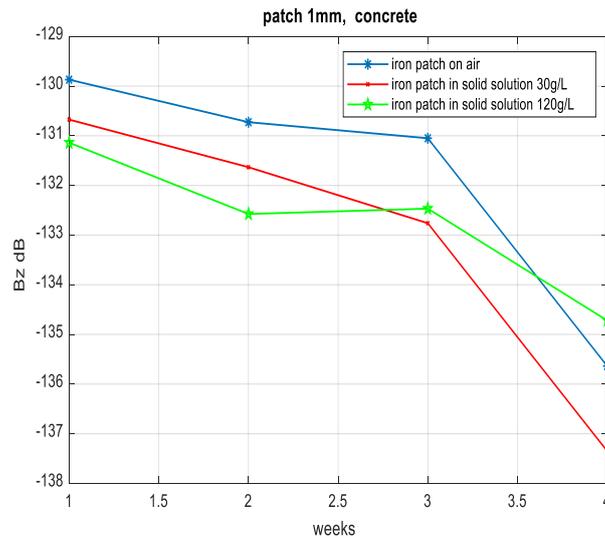


Figure 2. Exemple d'évolution de l'observable ND magnétique en fonction de l'état et du temps de corrosion.

Radar à Sauts de Fréquence

Cette étude a permis d'adapter la technique de caractérisation de milieux multi-couches par inversion de formes d'onde (FWFI) de mesures radar à sauts de fréquence, aux corps d'épreuves en béton contrôlés à différents états physiques et hydriques.

Dans un premier temps, le modèle direct analytique, utilisant une fonction de Green, a été paramétré pour modéliser la propagation des ondes radar dans des milieux fortement dispersifs et non dispersif, en les caractérisant électromagnétiquement par le modèle de Jonscher 4-paramètres. L'inversion FWFI, mise au point, utilise un algorithme génétique pour remonter à la solution en évitant les problèmes de minima locaux. Modèles direct et inverse ont été validés numériquement à l'aide du logiciel HFSS.

Une étape intermédiaire de caractérisation EM des bétons à divers degrés de saturation a été réalisée sur plusieurs centaines d'échantillons via la cellule coaxiale EM (50 MHz – 2 GHz). Une méthode d'apprentissage par régression statistique est en cours d'initiation pour relier la permittivité complexe du béton à une estimation fiable de son degré de saturation.

Pour l'inversion de mesures expérimentales, une étape de calibration préalable a permis de comparer les coefficients de réflexion mesurés aux fonctions de Green modélisées via le modèle direct. Des mesures, réalisées sur des dalles de béton à taux de saturation contrôlé en mono- bi- et tri-couches, ont montré le potentiel de la technique (Figures 3 & 4).

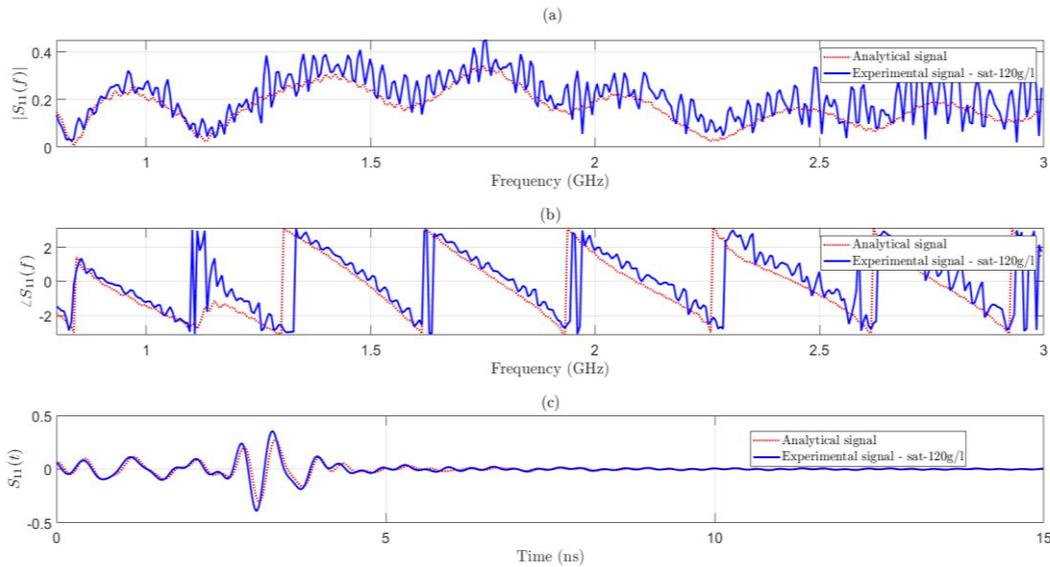


Figure 3. Exemple de résultats d'inversion par la FWFI des données RSF sur la bande (800MHz - 3 GHz).

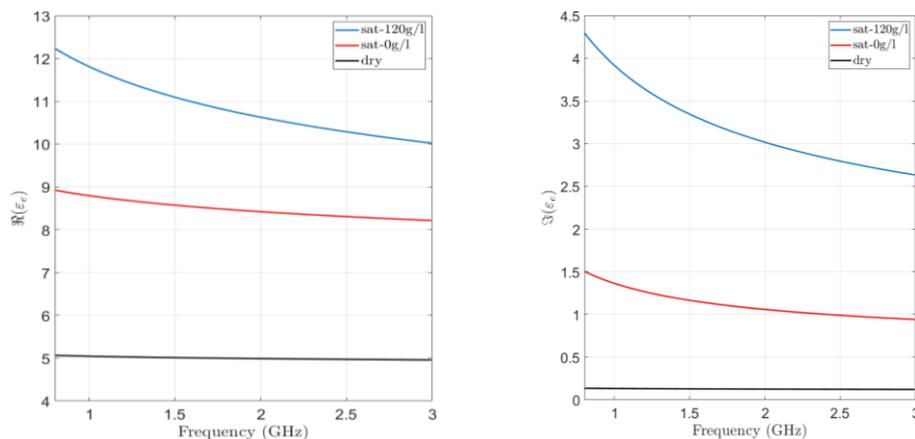


Figure 4. Exemple de résultats d'estimation de la variation fréquentielle de la permittivité complexe pour un même béton à différentes teneurs en eau et en chlorures.

ns

Par essence, les méthodes de caractérisation des structures par l'analyse modale sont réputées peu sensibles à la teneur en eau dans le béton. Ce sont des méthodes dites globales, qui traduisent la raideur globale de l'ouvrage et non pas son comportement chimique ou local. La littérature confirme qu'il faut monter à des fréquences ultrasoniques pour faire apparaître des corrélations entre des variations de fonction de Green mécaniques et des variations chimiques ou de formulation. Le programme de travail du LabCom OHMIGOD a prévu une campagne expérimentale pour mettre en lumière le niveau de sensibilité des méthodes mécaniques (statique et dynamique) en considérant des dalles de dimensions plus élevées et qui seront testées en fatigue jusqu'à la rupture. Dans ce contexte, l'apport des ondes mécaniques pourra être mieux évalué et notamment pour caractériser les fréquences à considérer pour envisager une hybridation des modèles EM/Mécanique et aboutir à un indicateur de performance innovant.

Des mesures au marteau d'impact ont été réalisées sur trois types de dalles différentes, même béton mais à différents états hydrique (sec et saturé) et physique (0, 30 et 120 g/l de chlorures pour une épaisseur et une formulation constante). Le spectre suivant les trois axes permet de caractériser les

premières fréquences de résonance de ces structures comme le montre la Figure 5. Comme mentionné ci-dessus, la fréquence de résonance n'est pas sensible aux niveaux de saturation en eau des dalles.

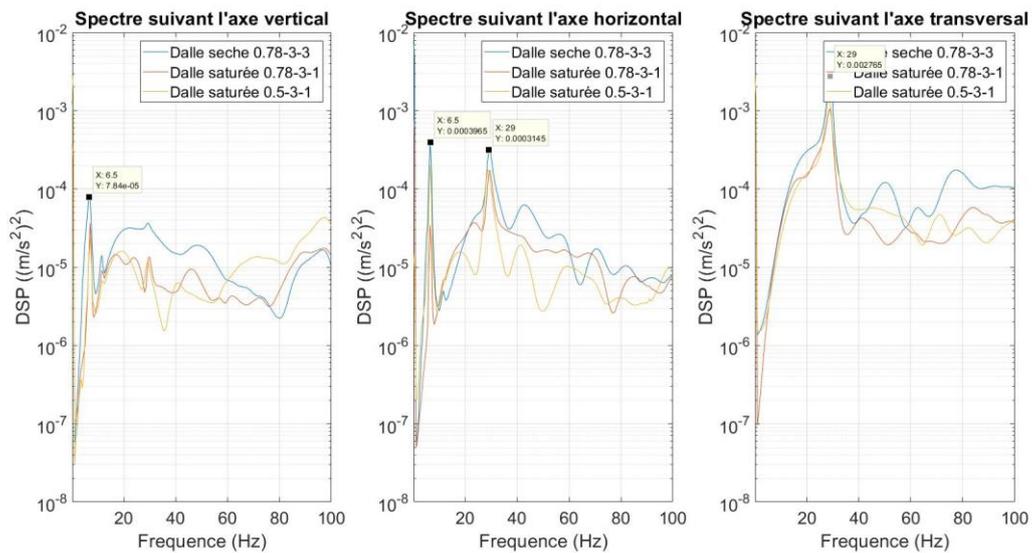


Figure 5. Spectre suivant les trois axes mesurés sur trois dalles auscultées.

6 Impact

6.1 Apports et retombées pour la collectivité

Il n'est pas simple à ce jour de quantifier les retombées du projet Morpho-Predict pour une collectivité. En revanche, la visibilité offerte par la FEREC et l'ANR ont favorisé de nombreux échanges avec les collectivités (notamment aux Salon des Maires d'Ile de France, entre bien d'autres exemples) qui sont curieux de connaître les avancées et les innovations portées par le projet. Par conséquent, à ce stade, les apports et les retombées sont de porter à leur connaissance les techniques qui sont en cours de développement et qui auront vocation à faciliter leur gestion économique et technique de leur parc d'infrastructures.

6.2 Mise en évidence du caractère collaboratif et d'intérêt général

Par essence, toute contribution à la résolution des problématiques de maintenance prédictive des infrastructures publics sont d'intérêt général. Les intérêts sont liés à la sécurité ainsi qu'à la gestion générale des budgets publics sur la construction, la surveillance et la maintenance d'infrastructure.

Sur le point « collaboratif », l'approche hybride nécessite de collaborer avec l'ensemble de l'écosystème du génie civil lié aux infrastructures : gestionnaires d'infrastructures (qui portent le besoin et qui sont propriétaires des ouvrages ciblés), sociétés d'ingénieries qui seront critiques sur l'indicateur de durabilité et son exploitation, et les sociétés d'instrumentation qui déploieront la solution et qui seront critiques sur l'usage et sur les améliorations à apporter.

6.3 Publications et autres éléments de communication auxquels le projet et ses résultats ont donné lieu

Morphosense et le Cerema ont communiqué à maintes reprises sur la collaboration autour de l'approche hybride, voici quelques évènements (liste non exhaustive) : biennal 2019 du Cerema, Salon des maires d'Ile de France (avril 2019), Biennal des territoires 2019, présentation ANR juillet 2019.

Grâce au gain du LabCom OHMIGOD de l'ANR, les travaux issus de Morpho-Predict (FEREC) pourront bénéficier du temps des doctorants prévus sur le projet ANR pour être consolidés puis publiés dans une revue à comité de lecture internationale.

7 Perspectives ouvertes par le projet notamment en matière de recherche collaborative

Il a été rappelé de nombreuses fois dans ce rapport que l'initiative Morphosense/Cerema sur le développement d'un outil hybride, subventionné par la FEREC et désormais soutenu par l'ANR à travers un LabCom de 300 k€. Par essence, ce LabCom est une perspective ouverte de recherche collaborative autour des travaux initiés dans le cadre de la FEREC.

D'autre part, grâce à la visibilité offerte par la FEREC et l'ANR, Morphosense et le CEREMA ont été contactés par des collectivités locales curieuses et offreuseuses de leur service pour faciliter et tester le développement de la solution hybride. Ces initiatives, qui viennent directement des collectivités locales, sont le foyer de futures collaborations avec les collectivités et leurs partenaires.

8 Références

Amine Ihamouten, Frédéric Bosc, Borui Guan, Cédric Le Bastard, Cyrille Fauchard, et al.. Full-waveform inversion using a stepped-frequency GPR to characterize the tack coat in hot-mix asphalt (HMA) layers of flexible pavements. *NDT & E International*, 2018, 95, pp.17 - 25.

Borui Guan, Amine Ihamouten, Xavier Dérobert, David Guilbert, Sébastien Lambot, et al.. Near-Field Full-Waveform Inversion of Ground-Penetrating Radar Data to Monitor the Water Front in Limestone. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, IEEE, 2017, 10 (10), pp.4328 - 4336.

Xiaoting Xiao, Amine Ihamouten, Géraldine Villain, Xavier Dérobert. Use of electromagnetic two-layer wave-guided propagation in the GPR frequency range to characterize water transfer in concrete. *NDT & E International*, 2017, 86, pp.164 - 174.

Géraldine Villain, Amine Ihamouten, Xavier Dérobert. Determination of concrete water content by coupling electromagnetic methods: cylindrical transition line with capacitive probes. *NDT & E International*, 2017, 88, pp.59 - 70.

Amine Ihamouten, Cédric Le Bastard, Xavier Derobert, Frédéric Bosc, Géraldine Villain. Using machine learning algorithms to link volumetric water content to complex dielectric permittivity in a wide (33-2000 MHz) frequency band for hydraulic concretes. *Near Surface Geophysics*, European Association of Geoscientists and Engineers (EAGE), 2016, 14 (6), pp.527-536.

[DSO2018004459] Déclaration d'invention et eProcédures INPI : Système radar pour l'imagerie hydrique 3D : estimation des gradients de teneur en eau dans les murs du bâti existant par méthode non destructive.

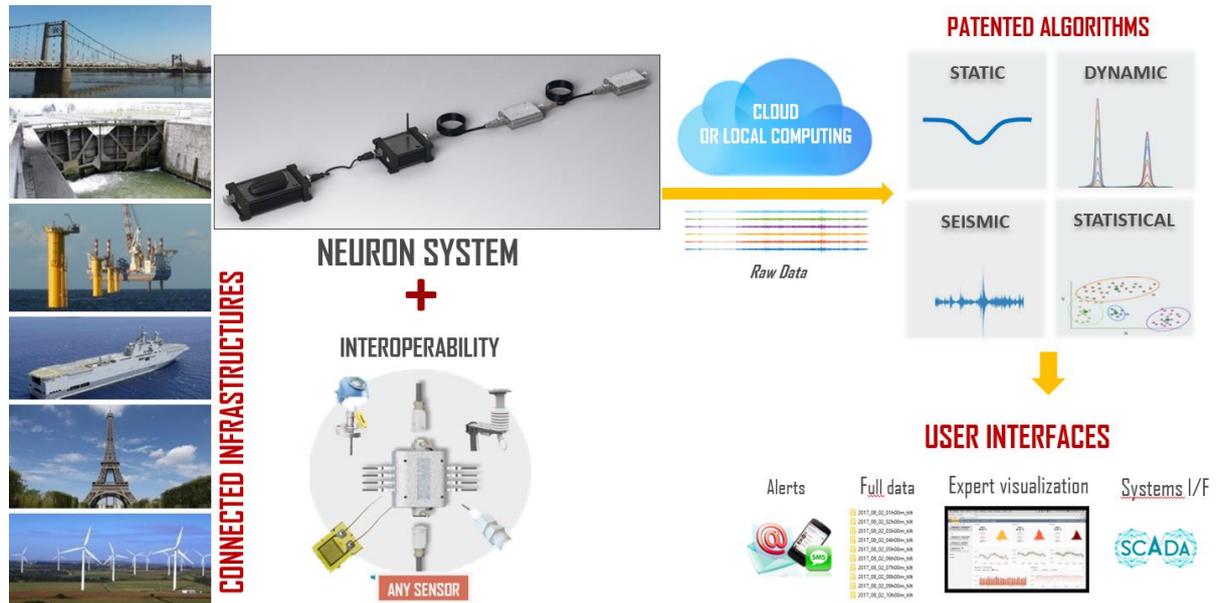
[IDDN : FR.001.000.RP.2017.10800] Simple deposit request of a work to the Agency for the Protection of Programs (French APP): A tool for diameter estimating of metal cylindrical objects using radar techniques.

" Guidelines for flexible pavements investigation with Ground Penetrating Radar", COST action TU1208 (finalization).

9 Glossaire

ANR	Agence Nationale pour la Recherche
EM	ElectroMagnétique
FEREC	Fondation d'Entreprise « Fondation d'entreprise recherche collective pour la construction et les infrastructures »
GPR	Ground Penetrating Radar
LabCom	Laboratoire Commun
OHMIGOD	Laboratoire Commun O utils H ybrides pour le M onitoring et l'évaluation non destructive des I nfrastructures : G estion O ptimisée de leur D urabilité
NEURON	Produit commercialisée par la société Morphosense
RSF	Radar à Saut de Fréquences

10 Annexe : Description du système NEURON



Schématisation de la solution NEURON de Morphosense. Ce produit est composé de nœuds de mesure chacun composé d'un accéléromètre 3 axes de pointe (résolution de 0.1 mm par mètre), d'un magnétomètre 3 axes et d'un capteur de température. Les données sont centralisées par un nœud maître et envoyées par une passerelle sur un serveur par un protocole filaire (Ethernet) ou sans-fil (3G ou Wifi) en fonction des configurations réseaux disponibles sur le site à instrumenter.

11 Annexe : Description du système RSF

Le radar à sauts de fréquence (RSF) est une technologie de radar à pénétration dans le sol (GPR – Ground Penetrating Radar) qui opère dans le domaine fréquentiel contrairement au GPR impulsif, plus fréquemment commercialisé et utilisé par les opérateurs, qui lui opère dans le domaine temporel. Un RSF en configuration mono-statique est constitué d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) et d'une antenne dont la topologie et les caractéristiques d'adaptation dépendent de l'application et du milieu ausculté (fig. 1). En configuration mono-statique des antennes, le VNA mesure le coefficient de réflexion complexe S_{11} du milieu de couplage à chaque fréquence de la bande étudiée. Le VNA produit ainsi des impulsions électromagnétiques très étroites (impulsions quasi-diskrètes) à des intervalles de fréquence donnés, comme illustré sur la figure 2, pour former une impulsion magnétique à ultra large bande donnant lieu à des Bscans à hautes résolutions avec des bandes passantes qui peuvent varier de 1 MHz à 20 GHz voire plus en fonction du type de VNA et de l'antenne utilisés. La largeur de bande opérationnelle maximale et ses limites supérieure et inférieure sont déterminées par la capacité maximale de la bande passante du VNA et de la topologie de l'antenne.

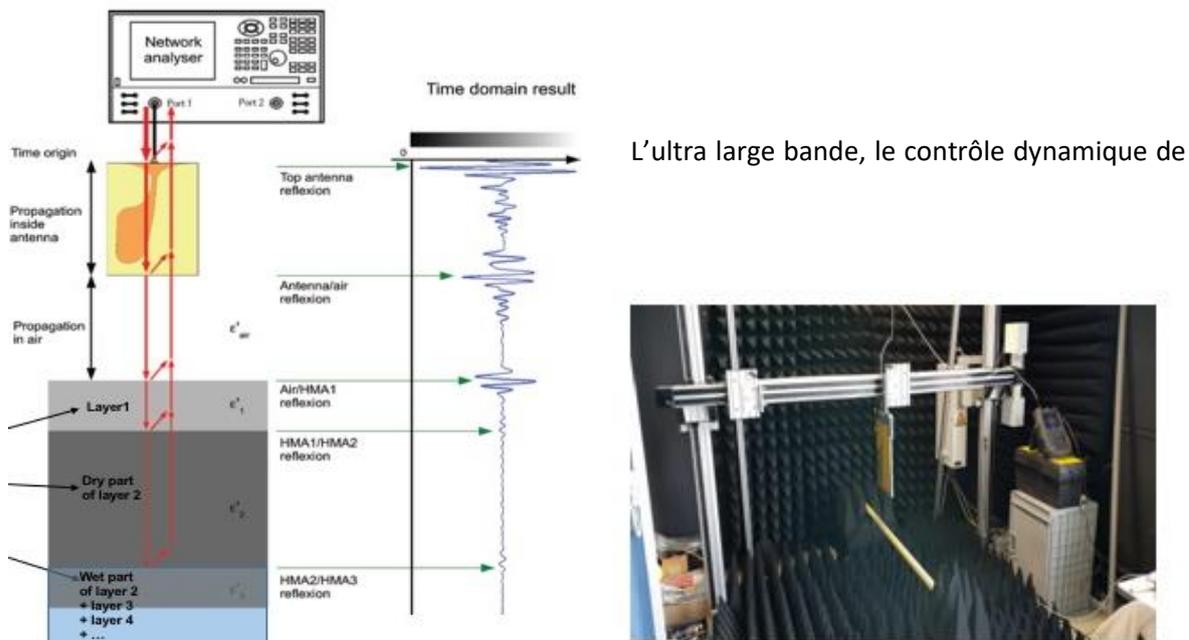


Figure 6. Schéma de principe du RSF (gauche) et exemple d'image du banc RSF de l'équipe ENDSUM du Cerema (droite).

la bande passante et la mesure à haute vitesse sont les principaux attraits pour l'adoption du RSF dans les applications GPR dans le milieu du génie civil et de la géophysique de subsurface.

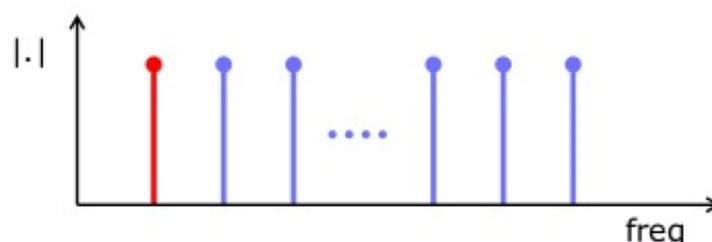


Figure 7. Illustration des impulsions discrètes d'un RSF dans le domaine fréquentiel.

Le coefficient de réflexion S_{11} est intrinsèquement lié à la topologie de l'antenne et aux caractéristiques diélectriques du milieu de couplage ausculté. Ainsi, le S_{11} complexe mesuré dans le domaine fréquentiel est transposé dans le domaine temporel par l'utilisation de transformées de Fourier inverses permettant ainsi l'obtention des A-scans puis des B-scans. Pour certaines techniques de traitement des signaux radar, le traitement ne nécessite pas une telle transformation puisque les signaux complexes sont inversés directement dans le domaine spectral (*i.e.* inversion de formes d'ondes EM).

Dans des applications impliquant des mesures à grand rendement, les paramètres du VNA sont soigneusement choisis pour optimiser la vitesse de mesure en fonction des profondeurs et des volumes auscultés. Par conséquent, ces paramètres de performance dépendent fortement de la largeur de bande fréquentielle étudiée, du nombre de points fréquentiels balayés, de la largeur de l'IFB (intermediate frequency filter bandwidth) de l'impulsion discrète, de la plage de résolution maximale nécessaire pour les A-scans, etc.

$$f_n = f_0 + n\Delta f \quad (1)$$

f_n est la fréquence maximum (Hz), f_0 est la fréquence minimum (Hz), n est le nombre de points fréquentiels, Δf est pas fréquentiel entre deux impulsions fréquentielles discrètes adjacentes et $f_n - f_0$ est la largeur de bande étudiée.

$$T_a = 1/\Delta f \quad (2)$$

T_a est la résolution temporelle des AScans (s) (*cf.* signal temporel fig. 1).

$$D_s = T_a c / 2\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \quad (3)$$

D_s est la résolution spatiale maximum nécessaire (m), c est la célérité dans le vide (m/s), ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du milieu ausculté et μ_r est la perméabilité magnétique relative du milieu ausculté.

Dans la pratique, l'affichage des mesures RSF consiste généralement en un ensemble de signaux temporels réfléchis (A-scans) empilés dans une image en coupe temps-distance (B-scans fig. 3), et donnant des informations sur le temps de parcours des ondes dans le milieu ausculté.

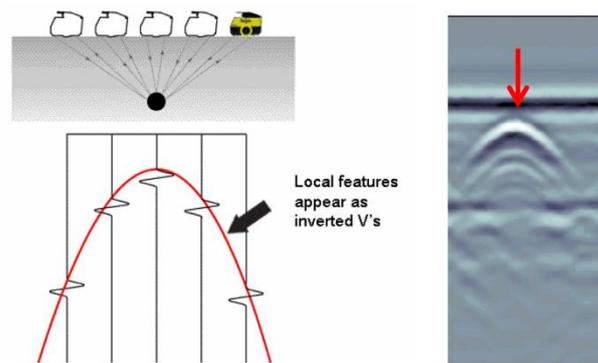


Figure 8. Exemple de reconstitution d'une image radar à partir de signaux temporels.

Les B-scans sont souvent complexes et nécessitent une interprétation experte et un traitement du signal avancé pour extraire les caractéristiques physiques et géométriques des milieux auscultés. Une interprétation directe des données RSF nécessite une bonne expertise de l'opérateur, avec la compréhension des caractéristiques du B-scan (échos, hyperboles de réflexion, inversion de polarisation des signaux, ...), couplée à une très bonne connaissance de la structure auscultée avec un nombre important d'informations *a priori*. Généralement, ces données sont post-traitées par une combinaison d'étapes de traitement du signal manuel et automatisé avec, dans le cas de notre projet, des approches inverses impliquant des modèles directs physiques analytiques et/ou numériques.