

**Réseau de capteurs sans fil et sans batterie télé-alimentés par transfert
d'énergie électromagnétique radiative**
*Battery-free and wireless sensors network powered by radiative
electromagnetic wireless power transfer*

Loubet G.¹, Sidibé A.², Takacs A.³, Dragomirescu D.⁴

¹LAAS-CNRS, INSA Toulouse, Université de Toulouse, CNRS. gael.loubet@laas.fr

²LAAS-CNRS, UWINLOC, Université de Toulouse, CNRS. alassane.sidibe@laas.fr

³LAAS-CNRS, UPS, Université de Toulouse, CNRS. alexandru.takacs@laas.fr

⁴LAAS-CNRS, INSA Toulouse, Université de Toulouse, CNRS. daniela.dragomirescu@laas.fr

Mots clés : Réseaux de capteurs sans fil ; Transfert sans fil de puissance ; Transmission sans fil simultanée d'information et de puissance. / Wireless Sensors Networks (WSN); Wireless Power Transfer (WPT); Simultaneous Wireless Information and Power Transmission (SWIPT).

Résumé/Abstract

Cet article présente la conception, l'implémentation et la caractérisation d'un réseau de capteurs sans fil, sans batterie, télé-alimentés et contrôlés à distance au travers d'un système de transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée géré par des nœuds communicants jouant le rôle de passerelle. Nous démontrons pour la première fois dans ces travaux de recherche une solution de transfert sans fil simultanée d'information et de puissance en utilisant une unique antenne pour ces deux fonctions. Nous avons également obtenu la plus grande distance d'utilisation testée pour un système de ce type : 11 mètres. Le réseau de capteurs sans fil présenté a été imaginé pour une application du suivi de l'état de santé structurelle des bétons armés durant toute leur durée de vie. La solution proposée est aisément scalable à d'autres applications, notamment en milieux contraints.

This paper presents the design, the implementation and the characterization of a wireless sensors network (WSN), battery-free, and wirelessly and remotely powered and controlled through a radiative electromagnetic wireless power transfer (WPT) system tuned by communicating nodes used as gateways. This research works demonstrate for the first time the capacity to use a unique antenna for data and power transmission in a SWIPT (simultaneous wireless information and power transmission) system. We also achieve, at our best knowledge, the highest power transfer distance for a SWIPT: 11 meters. The presented wireless sensors network has been designed for the structural health monitoring (SHM) of reinforced concretes throughout their lifetime. The proposed solution can be easily scalable to other applications, especially in highly constrained environments.

1 Introduction

Grâce à la numérisation et la miniaturisation de l'électronique, les systèmes embarqués sont toujours plus performants et ubiquitaires. Ceux-ci ont permis l'essor des technologies de communication sans fil (entre humains et/ou machines), notamment pour l'Internet des Objets (IoT), ayant mené à une rapide démocratisation des réseaux de capteurs sans fil (WSN). Ces derniers peuvent être utilisés pour surveiller et/ou contrôler le monde physique, ainsi que pour connecter les mondes physique et numérique dans des systèmes qualifiés de cyber-physiques (CPS). Aujourd'hui, le principal frein au déploiement à long terme de ces réseaux de capteurs sans fil est leur autonomie énergétique. Pour outrepasser cette limitation, les solutions de récupération de l'énergie ambiante et de transfert sans fil de puissance (WPT) sont étudiées pour les alimenter [1]. De plus, en considérant à la fois la transmission de puissance et la communication sans fil au travers d'ondes électromagnétiques, les réseaux de capteurs sans fils répondent au paradigme du transfert sans fil simultané d'informations et de puissance (SWIPT) [2,3].

En parallèle, les applications de surveillance de la santé des structures (SHM) sont de plus en plus courantes, quel que soit le domaine, en particulier dans le génie civil. Celle-ci se base sur la surveillance « en continu » de l'état d'une structure afin de prévenir ses défaillances irréversibles, d'éviter son effondrement et de permettre d'éventuels

traitements préventifs. Dans cette optique, les méthodes de test non-destructif (CND) sont privilégiées car n'altérant pas la structure testée [4,5].

Dans ce contexte, le projet McBIM (*Material communicating with the Building Information Modelling* (BIM)) [6] propose une mise en œuvre du concept de matériau communicant [7] dans le cas du béton armé, en partie afin d'assurer la surveillance de la santé des structures en béton armé grâce à des méthodes de test non-destructif.

Cet article présente donc un réseau de capteurs sans fil composé de nœuds de mesure (SN) sans batterie, alimentés et contrôlés sans fil et à distance par transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée. Par la suite, l'architecture et l'implémentation des nœuds de mesure, ainsi que du réseau de capteurs sans fil et du système cyber-physique, sont présentées. Ensuite, les résultats expérimentaux obtenus à ce jour sont présentés. Avant de conclure, une analyse critique et des perspectives sont proposées.

2 Conception et implémentation d'un système cyber-physique basé sur un réseau de capteurs sans fil composé de nœuds de mesure sans batterie télé-alimentés et télécontrôlés

L'intégration d'un réseau de capteurs sans fil dans du béton armé a été décidée afin de rendre celui-ci communicant [6,8-10]. Le béton armé communicant doit être intrinsèquement capable de : (1) générer (localement) ; (2) traiter (localement et/ou à distance) ; (3) stocker (localement et/ou à distance) ; et (4) partager des données (provenant de son propre état de santé et/ou de son environnement), dans le monde physique avec d'autres éléments communicants, et dans le monde numérique avec des jumeaux numériques (tel qu'un BIM) *via* Internet. Ce, durant toute sa vie (estimée en décennies) ; et afin de maintenir à jour son modèle numérique et de rendre accessible aux différents usagers les informations actuelles et passées. Il s'agit donc bien d'un système cyber-physique.

2.1 Architecture du système cyber-physique

L'architecture du système cyber-physique conçu, implémenté et testé, est présentée en Fig. 1. Il se base sur un réseau de capteurs sans fil, composé de deux types de nœuds : les nœuds de mesure (SN) et les nœuds communicants (CN). Les nœuds communicants servent à agréger les données mesurées et envoyées par les nœuds de mesure, puis à les traiter, les stocker localement et/ou sur des serveurs distants, et les échanger localement et/ou à distance, avec d'autres nœuds communicants composant un réseau maillé *ad-hoc*, éventuellement avec d'autres éléments communicants, et avec le monde numérique et ses modèles virtuels *via* Internet. Les nœuds de mesure servent à réaliser des mesures, à formater puis envoyer sans fil les données mesurées aux nœuds communicants. Ceux-ci doivent être sans fil, sans batterie et autonomes en énergie, mais également résilients, et fiables durant toute leur durée de vie. Leur alimentation est réalisée par transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée (donc en champ lointain) par les nœuds communicants. Cette solution permet de s'affranchir de la dépendance à des sources d'énergies ambiantes (insuffisantes voir indisponibles, fluctuantes, imprévisibles et incontrôlables), d'être indépendant de l'application visée et de l'environnement de déploiement. De plus, en contrôlant leur source de puissance électromagnétique, les nœuds communicants peuvent régler la périodicité de fonctionnement des nœuds de mesure. Enfin, le nombre de nœuds dans le réseau est fonction de la structure à surveiller et des besoins en termes de mesure (dont les capteurs à utiliser, la précision spatiale recherchée, etc.).

2.2 Architecture et implémentation des nœuds de mesure

L'architecture des nœuds de mesure conçus, implémentés et testés, est présentée en Fig. 2. Comme ceux-ci sont destinés à être déployés et enterrés dans du béton armé, et donc à devenir inaccessibles, ils doivent être fiables et utilisables sur le long terme. Ils sont donc aussi simples que possible, entièrement sans fil, sans batterie, télé-alimentés et télécontrôlés. De fait, ils se composent de deux sous-systèmes : le premier pour la gestion des données et le second pour la gestion de l'alimentation.

Le sous-système de gestion des données comprend un capteur, un microcontrôleur et un émetteur-récepteur. Plusieurs capteurs dédiés à la surveillance de la santé structurelle du béton armé (selon [5]) ont déjà été implémentés [8-10] : un capteur de température basé sur des thermodiodes de l'Université de Cambridge [11] ; un capteur de température et d'humidité Texas Instruments HDC2010 ; une jauge de contrainte ; et un capteur de résistance électrique en configuration Wenner du Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC) de Toulouse [12]. Un module Murata CMWX1ZZABZ-091 est utilisé pour formater sur 4 octets et transmettre sans fil les données *via* une trame LoRaWAN de 17 octets vers le(s) nœud(s) communicant(s). Deux configurations ont été étudiées pour la communication sans fil dans la bande de fréquence ISM des 868 MHz : l'une étant la plus fiable et permettant les plus longues portées (puissance de transmission de +14 dBm et débit de 250 bps) et l'autre étant la plus économe en énergie mais présentant des portées d'au moins plusieurs dizaines de mètres depuis une poutre en béton armé (puissance de transmission de +4 dBm et débit de 5470 bps). La technologie LoRaWAN a été choisie pour sa faible consommation et sa portée (quelle que soit la configuration choisie) même en intérieur et à travers le béton armé, qui est un milieu de propagation très contraignant pour les ondes électromagnétiques.

Structure en béton armé

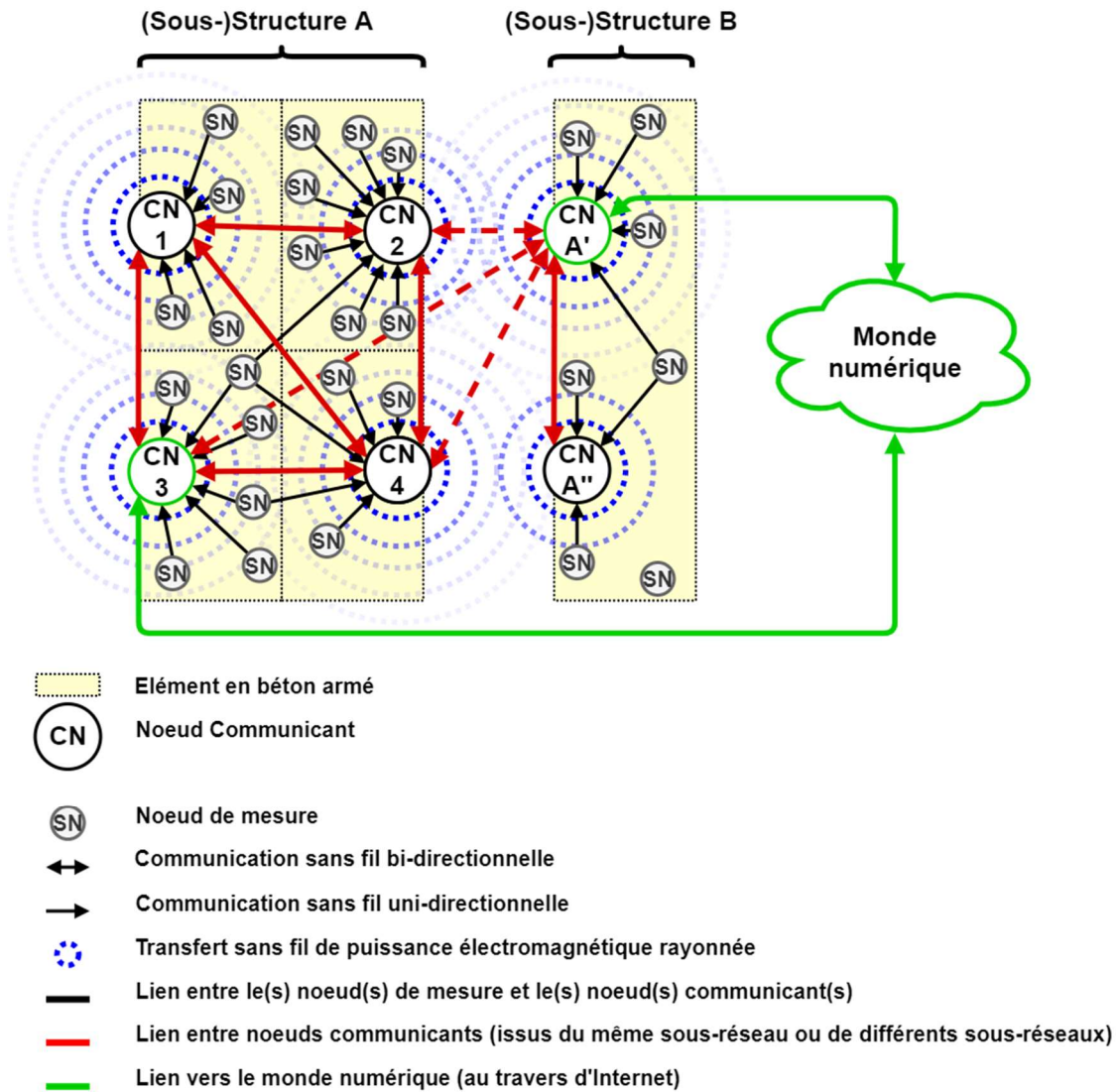


Figure 1 : Architecture du système cyber-physique.

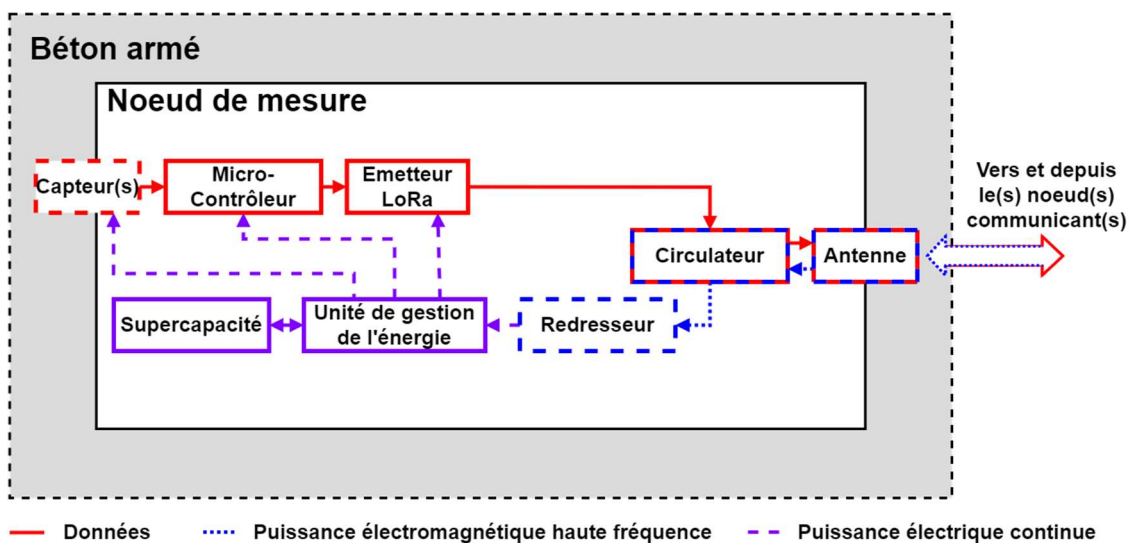


Figure 2 : Architecture du nœud de mesure générique, sans batterie, sans fil, télé-alimenté et télécontrôlé.

Le sous-système de gestion de l'alimentation comprend un redresseur radiofréquence, une unité de gestion de l'énergie (PMU) et un élément de stockage d'énergie. Pour obtenir des portées d'alimentation de plusieurs mètres, les solutions de transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée (en champ lointain) ont été privilégiées par rapport aux solutions en champ proche (capacitives et inductives). La bande ISM des 868 MHz a été choisie comme étant le meilleur compromis entre la taille de l'antenne et les pertes de propagation. Ainsi, les nœuds communicants utilisent une source de puissance électromagnétique rayonnée fournissant une onde continue de +33 dBm PIRE dans la bande ISM des 868 MHz en accord avec la réglementation [13]. En pratique, un redresseur doubleur basé sur des diodes Schottky Skyworks SMS7630 a été utilisé, ainsi qu'une unité de gestion de l'énergie Texas Instruments bq25504 et un convertisseur DC/DC buck-boost Texas Instruments TPS63031 pour fournir une tension de 3,3 V au sous-système de gestion des données chaque fois que suffisamment d'énergie stockée est disponible. L'énergie récupérée est stockée un supercondensateur Panasonic de 2,2 mF (pour la configuration la plus économique) ou AVX de 22 mF (pour la configuration la plus fiable). Une antenne dipôle quart d'onde repliée avec bras capacitifs (métalliques et orthogonaux au plan du dipôle) est employée, comme présentée en Fig. 3 [14]. Elle fonctionne dans la bande ISM des 868 MHz, est imprimée sur substrat FR4 (épaisseur : 0,8 mm et 1,6 mm ; permittivité relative : 4,4 ; et tangente de perte : 0,02) et mesure 5,6 cm x 3,2 cm x 1,0 cm. Son diagramme de rayonnement est présenté en Fig. 4. Cette antenne est presque omnidirectionnelle, a une polarisation linéaire, est utilisable entre 848 MHz et 886 MHz, a un gain mesuré de +1,54 dBi à 868 MHz et a un angle d'ouverture à -3 dB de 110 ° dans le plan E. En ajoutant un plan réflecteur métallique de 8 cm par 6 cm à 5 cm derrière, le gain augmente jusqu'à +5,00 dBi au prix d'une plus grande directivité (l'angle d'ouverture à -3 dB passe à 70 ° dans le plan E) et de l'augmentation du volume total. Cette antenne semble être un bon compromis entre taille (ou volume) et performances en rayonnement dans la bande de fréquence visée.

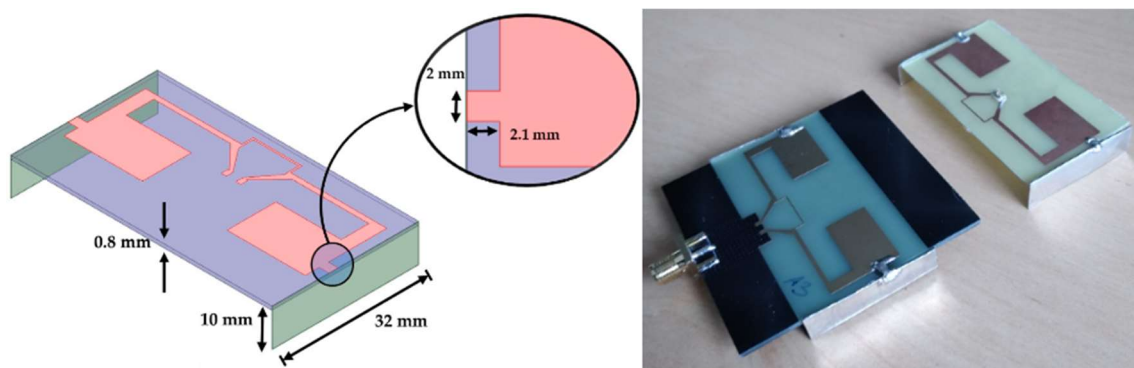


Figure 3. Schéma et photographie de l'antenne dipôle quart d'onde repliée avec bras capacitifs fonctionnant dans la bande ISM des 868 MHz et imprimée sur substrat FR4 de 1,6 mm (noir) et 0,8 mm (jaune).

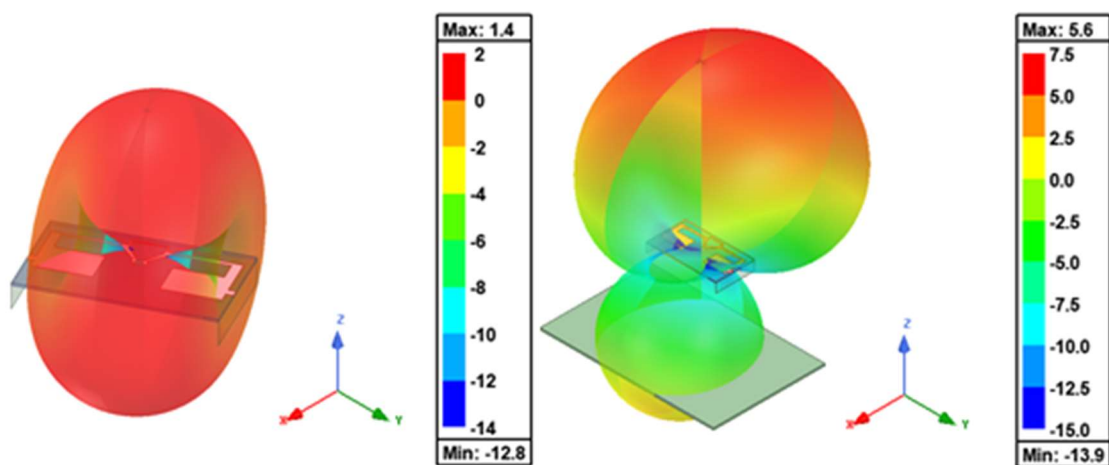


Figure 4. Diagramme de rayonnement simulé sous HFSS de l'antenne dipôle quart d'onde repliée avec bras capacitifs fonctionnant dans la bande ISM des 868 MHz sans et avec plan réflecteur métallique.

Comme une unique bande de fréquences est utilisée pour la communication sans fil et le transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée, il est possible de n'employer qu'une unique antenne associée à un circulateur radiofréquence Aerotek C11-1FFF/OPT.N présentant de faibles pertes d'insertion et des isolations élevées. Cela est possible car il n'existe qu'une liaison montante de donnée et une liaison descendante de puissance. De plus, cela permet de réduire la taille globale des nœuds de mesure. Ainsi, simultanément, la puissance électromagnétique captée par l'antenne est transmise au redresseur *via* le circulateur, ce qui forme une rectenna, et les données à émettre fournies par l'émetteur sont transmises à l'antenne *via* le circulateur. De plus, il n'y a pas de connexion significative entre le redresseur et l'émetteur, ni d'interférence entre les transferts de données et de puissance. Finalement, les exigences du paradigme du transfert sans fil simultané d'informations et de puissance sont satisfaites avec seulement un multiplexage par fonction, *id est* sans multiplexage temporel, fréquentiel ou spatial, ni fractionnement de puissance.

Les nœuds de mesure étant inaccessibles, tant sur le plan matériel que logiciel (pas d'accès physique et pas de liaison descendante de données) et que la périodicité des mesures est fonction de l'étape du cycle de vie, ceux-ci sont télécontrôlés (sans fil et à distance) par les nœuds communicants *via* la liaison descendante de puissance et grâce au réglage du système de transfert sans fil de puissance (en termes de forme d'onde, de puissance transmise et/ou de périodicité d'activation). Ainsi, la périodicité, qui est variable, n'est dictée ni par le matériel, ni le logiciel.

Enfin, la Fig. 5 présente des nœuds de mesure utilisant ou non la carte électronique comme plan réflecteur métallique, ainsi que des installations expérimentales en intérieur, notamment avec une poutre de béton armé.

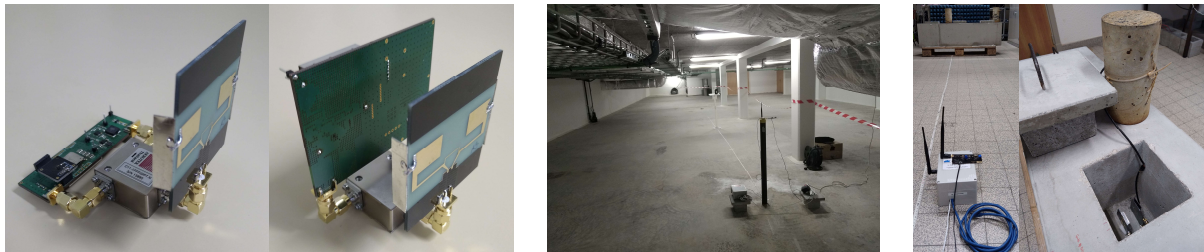


Figure 5 : Photographies de nœuds de mesure, et d'installations expérimentales du système cyber-physique en intérieur et avec des nœuds de mesures embarqués dans une poutre de béton armé.

3 Résultats expérimentaux

Plusieurs implémentations du système cyber-physique ont été réalisées comme preuves de concept en utilisant la technologie de communication sans fil LoRaWAN [8-10]. De plus, de premiers travaux utilisant la technologie de communication sans fil Bluetooth Low Energy (BLE) ont été menés [8,14]. Les nœuds de mesure peuvent mesurer divers paramètres (température, humidité relative, déformation mécanique, et résistivité électrique), puis formater et transmettre sans fil les données sur au moins plusieurs dizaines de mètres au(x) nœud(s) communicant(s).

La configuration en LoRaWAN la plus fiable nécessite de stocker 250 mJ d'énergie (soit 62,5 mJ par octet de données, ou 14,71 mJ par octet transmis, ou 1,84 mJ par bit transmis) pour réaliser un processus complet : la mesure quel que soit le capteur utilisé, et la transmission complète d'une trame LoRaWAN de 17 octets avec 4 octets de données utiles. La configuration en LoRaWAN la plus économe en énergie nécessite, elle, de stocker 21 mJ d'énergie (soit 5,25 mJ par octet de données, ou 309 mJ par octet transmis, ou 39 μ J par bit transmis), soit plus de 10 fois moins. Tandis que l'utilisation de la technologie Bluetooth Low Energy nécessite de stocker 1,2 mJ d'énergie (soit 400 μ J par octet de données, ou 63 μ J par octet transmis, ou 7,9 μ J par bit transmis), soit près de 20 fois moins, pour un processus complet : la mesure de température et d'humidité, et la transmission à +0 dBm et 1 Mbps de 4 trames d'*advertising* de 19 octets avec 3 octets de données utiles. Ces quantités d'énergie sont surestimées de +20 % par rapport aux besoins moyens, pour certifier d'un bon fonctionnement malgré la variabilité des composants et leur vieillissement.

La durée de la première charge (à partir d'un élément de stockage de l'énergie vide) et des recharges (après une autre charge complète) donne une information pertinente concernant la plus petite périodicité du fonctionnement des nœuds de mesure en fonction de la quantité de puissance électromagnétique disponible, comme présentée en Fig. 6. Dans la configuration LoRaWAN la plus fiable, les nœuds de mesure peuvent fonctionner entre -14 dBm et jusqu'à au moins +15 dBm, ce qui donne des durées de première charge comprises entre environ 34 heures et 36 minutes, et environ 1 minute et 10 secondes, et des durées de recharges comprises entre environ 14 heures et 38 minutes, et environ 33 secondes. Dans la configuration LoRaWAN la plus économe en énergie, ces durées sont respectivement comprises entre environ 17 heures et 21 minutes, et environ 30 secondes, et entre 7 heures et 59 minutes, et environ 6 secondes, pour une puissance d'entrée comprise entre -17 dBm et au moins +15 dBm. Des périodicités plus longues peuvent évidemment être obtenues en contrôlant la durée et la périodicité d'activation de la source d'énergie par le(s) nœud(s) communicant(s). En général, plus l'énergie à stocker est faible, plus la charge est rapide ; et plus la puissance d'entrée disponible est grande, plus la charge est rapide.

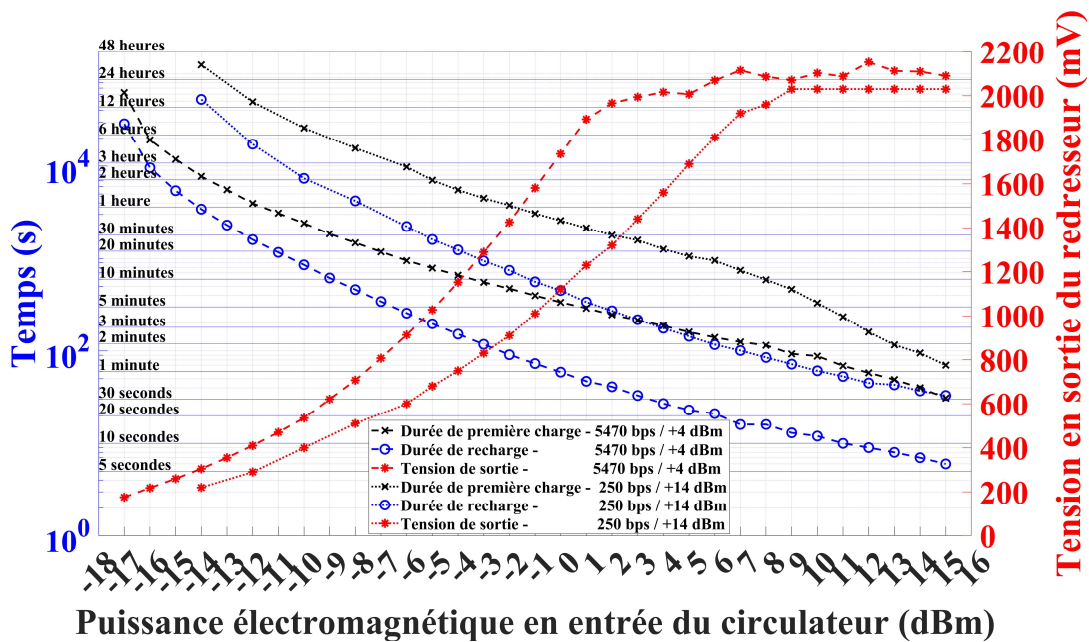


Figure 6. Durées de la première charge ('x', à gauche) et des recharges ('o', à gauche), et tension de sortie du redresseur en circuit ouvert pendant les recharges ('*', à droite) en fonction de la puissance électromagnétique appliquée au circulateur des nœuds de mesure, pour une fréquence de 868 MHz, pour deux configurations de la communication sans fil : une puissance de transmission de +4 dBm et un débit de données 5470 bps (lignes tirées), et une puissance de transmission de +14 dBm et un débit de données de 250 bps (lignes pointillées).

A partir de la puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure pour fonctionner, il est possible d'estimer une portée maximale d'utilisation. Cette puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure est fonction de la puissance nécessaire à l'unité de gestion de l'énergie pour fonctionner, mais doit également permettre de compenser les pertes du convertisseur DC/DC et de l'élément de stockage de l'énergie. Expérimentalement, cette puissance est mesurée à -14 dBm pour la configuration LoRaWAN la plus fiable et -17 dBm pour la configuration LoRaWAN la plus économe en énergie. Ainsi, en appliquant l'équation de Friis, la distance entre un nœud communicant, dont la puissance maximale PIRE autorisée est de +33 dBm dans la bande de fréquence ISM des 868 MHz [13] et un nœud de mesure, doté d'une antenne ayant un gain de +1,54 dBi, peut être estimée en fonction de la puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure. Ainsi, -17 dBm peuvent être récupérés à une distance d'environ 10,38 mètres (soit une périodicité d'environ 7 heures et 59 minutes), -14 dBm à environ 7,35 mètres (soit respectivement, une périodicité d'environ 14 heures et 38 minutes et d'environ 57 minutes pour les configurations LoRaWAN la plus fiable et la plus économe en énergie), et environ -10,6 dBm à une distance de 5 m (soit respectivement une périodicité d'environ 3 heures et d'environ 15 minutes). En utilisant un plan réflecteur métallique pour obtenir un gain de +5,00 dBi, -17 dBm peuvent être récupérés à une distance d'environ 13,78 mètres, -14 dBm à environ 10,95 mètres, et environ -7,2 dBm à une distance de 5 m (soit respectivement, une périodicité d'environ 50 minutes et d'environ 6 minutes pour les configurations LoRaWAN la plus fiable et la plus économe en énergie). Il est à noter qu'une puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure de -17 dBm est l'une des plus faibles trouvées dans la littérature. A notre connaissance, seul [16] fournit une unité de gestion de l'énergie qui nécessite -19 dBm dans la bande ISM des 868 MHz. Ainsi, en réduisant puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure, la portée peut être augmentée.

Aussi, le volume de déploiement d'un sous-réseau en étoile composé d'un nœud communicant et d'une multitude de nœuds de mesure est limité par la portée d'utilisation de système de transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée et non par la portée des communications sans fil. Sa portée maximale testée en intérieur, quelle que soit la direction, est de 11 mètres, soit la plus importante testée à notre connaissance. Néanmoins, il semble possible d'atteindre des portées plus importantes. En termes de déploiement, cela peut sembler suffisant pour couvrir les cas d'utilisation en intérieur (e.g. bâtiments de bureau ou d'habitation, ouvrage d'art tels des ponts ou des tunnels, etc.) : il faudrait approximativement autant de nœuds communicants que l'on trouve de points d'accès Wi-Fi dans les bâtiments de bureau. Par contre, bien que les portées de communication sans fil soient suffisantes, les déploiements en extérieur ou dans des structures de très grand volume semblent peu viables de par les portées du transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée. De même, la périodicité de mesure ciblée doit également être prise en compte : dans le béton armé, les variations sont lentes, mais ce n'est pas forcément le cas pour toutes les applications.

De plus, de nombreux tests qualitatifs ont été réalisés pour certifier le bon fonctionnement du système cyber-physique et de ses nœuds de mesure. Par exemple, un système cyber-physique composé d'un réseau maillé de 2 nœuds communicants (dont un avec une connexion à Internet) et de 4 nœuds de mesure, dont 3 situés dans des cavités d'air d'une poutre en béton armé, comme présenté en Fig. 5, a été testé avec succès. Ainsi, les nœuds communicants ont télé-alimentés et télécontrôlés les nœuds de mesure (même embarqués dans la poutre en béton armé) sur au moins 3 mètres dont au moins 15 cm de béton armé, et ont récupéré toutes les données envoyées sur au moins quelques dizaines de mètres en intérieur, pour les traiter, les stocker et les partager. La taille des pièces d'expérimentation a limité les portées testées. Ainsi, un unique nœud communicant peut facilement gérer plusieurs nœuds de mesure de manière omnidirectionnelle sur plusieurs mètres. Comme annoncé, une distance de 11 mètres en intérieur a été testée avec succès et il semble possible d'atteindre des distances plus importantes.

Un autre élément pertinent à prendre en compte pour réaliser un système durable est son efficacité énergétique, ici définie comme le rapport entre l'énergie disponible à l'entrée du nœud de mesure (*i.e.* la puissance disponible à l'entrée du nœud de mesure (récoltée par l'antenne) intégrée sur la période d'intérêt) et l'énergie requise pour un processus complet. Comme présenté en Fig. 7, l'efficacité est plutôt faible pour les premières charges : entre 2,16 % et 11,54 % pour la configuration LoRaWAN la plus économe en énergie ; et entre 4,59 % et 10,25 % pour la configuration LoRaWAN la plus fiable. L'efficacité augmente dans le cas des recharges, respectivement : entre 3,68 % et 36,71 % ; et entre 7,91 % et 39,00 %. Il est à noter que les deux configurations ne présentent pas leur pic d'efficacité pour la même puissance d'entrée. Ceux-ci sont respectivement atteints à -9 dBm et à -5 dBm pour la première charge, et à -2 dBm et à +1 dBm pour les recharges. De plus, la première configuration est plus efficace pour les puissances d'entrée les plus faibles, et la seconde pour les plus élevées. Pour augmenter l'efficacité énergétique du nœud de mesure, les durées de la première charge et des recharges doivent être minimisées. Une autre efficacité pourrait être pertinente à exprimer : elle se définit comme le rapport entre l'énergie transmise par un nœud communicant pour alimenter sans fil tous les nœuds de mesure situés dans son voisinage, et la somme des énergies consommées par chacun des nœuds de mesure pendant une période d'intérêt. Dans ce cas, plus il y a de nœuds de mesure et plus le rendement de chaque nœud de mesure est élevé, plus le rendement global est élevé.

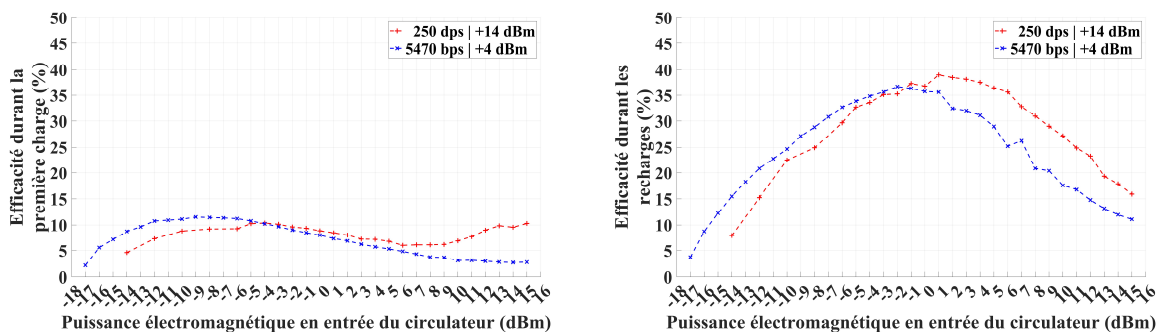


Figure 7. Efficacité énergétique des nœuds de mesure pendant la première charge et les recharges par rapport à la puissance électromagnétique appliquée à l'entrée du circulateur, pour une fréquence de 868 MHz, pour deux configurations de la communication sans fil : une puissance de transmission de +4 dBm et un débit de données 5470 bps (bleu), et une puissance de transmission de +14 dBm et un débit de données de 250 bps (rouge).

4 Discussions et perspectives

Actuellement, et à notre connaissance, il n'existe pas de système cyber-physique basé sur un réseau de capteurs sans fil composé de nœuds de mesure sans batterie, autonomes en énergie, entièrement sans fil, et destinés à être entièrement enfouis dans du béton armé pour en assurer la surveillance de son état de santé structurelle à long terme et de manière automatique. En effet, la majorité des nœuds existants ont une durée de vie limitée en raison de l'utilisation de batteries et sont généralement déployés en surface de la structure à surveiller (ou dans quelques cas, à une faible profondeur dans le béton). La solution proposée peut également être perçue comme un réseau de capteurs sans télé-alimentés et peut facilement être adaptée à d'autres applications.

L'implémentation du système cyber-physique et de ses nœuds de mesure se base uniquement sur des composants disponibles sur étagère (à l'exception de la rectenna, pour laquelle aucune solution commerciale n'est disponible). Comme les propriétés mesurées ont des variations lentes, de longues périodicités de fonctionnement sont visées, et comme la puissance disponible en entrée du nœud de mesure est bien inférieure à la puissance nécessaire pour le faire fonctionner en continu, la stratégie de "stocker puis utiliser" l'énergie avec la possibilité de démarrer à froid est employée. Aussi, comme les nœuds de mesure sont inaccessibles et déployés sur le long terme (*i.e.* plusieurs décennies), la conception prévoit le moins de composants et de complexité possible afin de limiter au maximum les points de défaillance.

Cependant, les implémentations des nœuds de mesure peuvent être améliorées, tant du point de vue matériel que logiciel. Ainsi, en réduisant la puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure (actuellement de -17 dBm) (en choisissant une unité de gestion de l'énergie fonctionnant avec moins d'énergie [16], et en limitant les pertes du convertisseur DC/DC et de l'élément de stockage de l'énergie), il est possible d'augmenter la portée d'utilisation du système de transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée (actuellement de 11 mètres en intérieur), qui est actuellement limitante pour le déploiement sur de larges volumes (les communications sans fil présentant des portées bien supérieures). Aussi, en réduisant l'énergie requise pour le fonctionnement des nœuds de mesure (en choisissant par exemple une autre technologie de communication sans fil), il est possible de réduire le temps nécessaire aux premières charges et aux recharges, quelle que soit la puissance disponible. Les capteurs peuvent également être optimisés pour être plus précis et pour consommer moins d'énergie, et d'autres capteurs peuvent être employés. De plus, l'efficacité des nœuds de mesure peut être améliorée en utilisant une rectenna plus performantes (à la fois l'antenne, le redresseur et leur assemblage). Enfin, l'efficacité globale du système de transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée peut être améliorée en concentrant la puissance transmise par le(s) nœud(s) communicant(s) sur le(s) nœud(s) de mesure avec des techniques de formation de faisceaux [17] ou de réseaux à diversité de fréquence [18], ou en employant des formes d'onde plus efficaces [19].

En fait, plusieurs compromis doivent être considérés. D'abord, entre le volume du nœud de mesure (corrélé à la taille de l'antenne, qui est étroitement liée à la longueur d'onde) que l'on veut le plus compact possible, et la portée d'utilisation (corrélée aux performances de l'antenne, dont le diagramme de rayonnement, le gain et la polarisation, mais aussi au choix de la fréquence de transmission, qui impose des réglementations et des propriétés de propagation différentes, notamment concernant les pertes) que l'on veut la plus longue possible. Ensuite, entre la consommation des nœuds de mesure et donc les temps de charge (en grande partie imposée par la technologie de communication sans fil employée), que l'on veut minimaux, et la qualité des communications sans fils (en termes de portée et de fiabilité) que l'on veut optimale.

D'autres problématiques doivent également être traitées. Notamment concernant la conception de l'antenne qui doit pouvoir fonctionner efficacement au contact direct du béton, tant pour le transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée que pour la communication sans fil [20]. L'antenne peut également être fabriquée grâce à des techniques d'impression tridimensionnelle (3D) ou à jet d'encre, ou par des techniques additives, et ce, sur divers substrats (pouvant être flexibles). Aussi, l'encapsulation des nœuds de mesure doit être considérés afin de les déployer directement dans le béton armé tels des agrégats, donc aléatoirement, (et non plus dans des cavités d'air) afin d'y effectuer des mesures fiables [21]. Des stratégies alternatives pour le déploiement des nœuds de mesure dans le béton armé peuvent être discutées. Il est possible (1) de déployer uniquement le(s) capteur(s) au cœur du béton et le reste des nœuds de mesure en surface, de sorte que les mesures soient effectuées aux endroits les plus pertinents et que les nœuds de mesure soient accessibles, donc remplaçables et modifiables ; mais aussi (2) de déployer le nœud de mesure au cœur du béton et l'antenne en surface, de sorte que les mesures soient effectuées aux endroits les plus pertinents et que les nœuds de mesure soient inaccessibles, mais que les contraintes de la propagation électromagnétique à travers le béton armé soient relâchées. Dans ces deux cas, l'utilisation de câbles entre les différentes parties peut créer des faiblesses dans le béton armé et un accès en surface est également un point d'accès pour les polluants et autres contaminants, telles que l'air et l'eau, qui peuvent induire une corrosion plus rapide.

5 Conclusion

Cet article présente un réseau de capteurs sans fil dédié à la surveillance de la santé des structures en béton armé, au travers de la mise en œuvre d'un système cyber-physique. Le réseau de capteurs sans fil se compose notamment de nœuds de mesure génériques sans batterie et sans fil, destinés à être entièrement enterrés dans du béton armé. Ils sont donc alimentés et contrôlés à distance (sur plusieurs mètres) par un système de transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée, commandé par des nœuds communicants. Ces nœuds de mesure sont, à notre connaissance, les premiers qui offrent une solution au paradigme de transfert sans fil simultanée d'information et de puissance basée sur l'utilisation d'une antenne unique. Les résultats expérimentaux montrent que la portée du transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée est d'au moins 11 mètres en intérieur, à une fréquence de 868 MHz, tandis que la portée de la communication sans fil peut atteindre des centaines de mètres grâce à la technologie LoRaWAN. Le système cyber-physique testé avec succès permet de mesurer et de partager des données depuis l'intérieur du béton armé jusqu'au monde numérique *via* Internet.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet McBIM (ANR-17-CE10-0014). Les auteurs souhaitent remercier leurs partenaires : CRAN (Nancy), LIB (Dijon), et FINAO SAS/360SmartConnect (Trans-en-Provence).

Références bibliographiques

- [1] G. Peruzzi, et A. Pozzebon, "A review of energy harvesting techniques for Low Power Wide Area Networks (LPWANs)," *Energies*, vol. 13, n° 13, p. 3433, 2020.
- [2] T.D. Ponnimbaduge Perera, D.N.K. Jayakody, S.K. Sharma, S. Chatzinotas, et J. Li, "Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts*, vol. 20, no. 1, pp. 264–302, 2018.
- [3] A. Costanzo, D. Masotti, G. Paolini, et D. Schreurs, "Evolution of SWIPT for the IoT World: Near-and Far-Field Solutions for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 22, n° 12, pp. 48-59, 2021.
- [4] D. Darwin, C.W. Dolan, et A.H. Nilson, "Design of concrete structures," 15th Ed., New York, NY, USA, McGraw-Hill Education, 2016.
- [5] S. Taheri, "A review on five key sensors for monitoring of concrete structures," *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 492-509, 2019.
- [6] W. Derigent, M. David, H. Wan, D. Dragomirescu, A. Takacs, G. Loubet, A. Roxin, R. Melet, et L. Montegut, "Materials communicating with the BIM: results of the McBIM project," 13th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), 2022, *en cours de publication*.
- [7] S. Kubler, W. Derigent, A. Thomas, et E. Rondeau, "Problem definition methodology for the "Communicating Material" paradigm," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 4, pp. 198-203, 2010.
- [8] G. Loubet, "Réseaux de capteurs sans fil autonomes pour la fabrication de matériaux communicants. Application au domaine du génie civil.," Thèse de Doctorat, INSA Toulouse, 2021.
- [9] G. Loubet, A. Takacs, et D. Dragomirescu, "Implementation of a Wireless Sensor Network Designed to be Embedded in Reinforced Concrete," 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2020, pp. 2195-2200, 2020.
- [10] G. Loubet, A. Takacs, et D. Dragomirescu, "Implementation of a Battery-Free Wireless Sensor for Cyber-Physical Systems dedicated to Structural Health Monitoring Applications," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24679-24690, 2019.
- [11] A. De Luca, V. Pathirana, S.Z. Ali, D. Dragomirescu, et F. Udrea, "Experimental, analytical and numerical investigation of non-linearity of SOI diode temperature sensors at extreme temperatures," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 222, pp. 31-38, 2015.
- [12] J. Badr, "Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons," Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2019.
- [13] European Union, "COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2017/1483 of 8 August 2017 amending Decision 2006/771/EC on harmonisation of the radio spectrum for use by short-range devices and repealing Decision 2006/804/EC," *Official Journal of the European Union*, Decision C(2017) 5464, 2017.
- [14] A. Sidibe, A. Takacs, G. Loubet, et D. Dragomirescu, "Compact Antenna in 3D Configuration for Rectenna Wireless power transfer Applications," *Sensors*, vol. 21, no. 9, p. 3193, 2021.
- [15] G. Loubet, A. Sidibe, A. Takacs, et D. Dragomirescu, "Battery-free Bluetooth Low Energy Sensing Nodes for Structural Health Monitoring of Concretes," 13th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), 2022, *en cours de publication*.
- [16] e-peas semiconductors - AEM30940 - datasheet. Disponible en ligne : <https://e-peas.com/wp-content/uploads/2021/03/e-peas-AEM30940-datasheet-RF-Vibration-energy-harvesting.pdf> (accédé le 9 février 2022).
- [17] D. Belo, D.C. Ribeiro, P. Pinho, et N.B. Carvalho, "A selective, tracking, and power adaptive far-field wireless power transfer system. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*," vol. 67, no. 9, pp. 3856-3866, 2019.
- [18] E. Fazzini, A. Costanzo, et D. Masotti, "Range Selective Power Focusing with Time-controlled Bi-dimensional Frequency Diverse Arrays," *IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, pp. 1-4, 2021.
- [19] A. Boaventura, D. Belo, R. Fernandes, A. Collado, A. Georgiadis, et N.B. Carvalho, "Boosting the efficiency: Unconventional waveform design for efficient wireless power transfer," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 87-96, 2015.
- [20] E. Fraile-Garcia, J. Ferreiro-Cabello, E.M. de Pison Ascacibar, J.F. Cenicerros, et A.V.P. Espinoza, "Implementing a technically and economically viable system for recording data inside concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 157, pp. 860-872, 2017.
- [21] G. Castorina, L. Di Donato, A.F. Morabito, T. Isernia, G. et Sorbello, "Analysis and design of a concrete embedded antenna for wireless monitoring applications [antenna applications corner]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 58, no. 6, pp. 76-93, 2016.