



HAL
open science

**Réseau de capteurs sans fil et sans batterie
télé-alimentés par transfert de puissance
électromagnétique rayonnée destiné au suivi de l'état de
santé structurelle des bétons armés**

Gael Loubet, Alassane Sidibe, Alexandru Takacs, Daniela Dragomirescu

► **To cite this version:**

Gael Loubet, Alassane Sidibe, Alexandru Takacs, Daniela Dragomirescu. Réseau de capteurs sans fil et sans batterie télé-alimentés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée destiné au suivi de l'état de santé structurelle des bétons armés. 22ème Journées Nationales Microondes (JNM 2022), Jun 2022, Limoges, France. hal-03648908

HAL Id: hal-03648908

<https://laas.hal.science/hal-03648908>

Submitted on 22 Apr 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Réseau de capteurs sans fil et sans batterie télé-alimentés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée destiné au suivi de l'état de santé structurelle des bétons armés

G. Loubet^{1,2}, A. Sidibe^{1,3}, A. Takacs^{1,4}, D. Dragomirescu^{1,2}

¹ LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS ; 7, Avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse.

² INSA Toulouse, Université de Toulouse, CNRS ; 135, Avenue de Rangueil, 31400 Toulouse.

³ UWINLOC ; 9, Rue Humbert Tomatis, 31200 Toulouse.

⁴ UPS, Université de Toulouse, CNRS ; 118, Route de Narbonne, 31400 Toulouse.

gael.loubet@laas.fr

Résumé – Cet article présente un réseau de capteurs sans fil dédié au suivi de l'état de santé structurelle des bétons armés durant toute leur durée de vie (i.e. plusieurs décennies). Deux types de nœuds composent ce réseau de capteurs sans fil. Les nœuds de mesure qui mesurent différents paramètres du béton armé (e.g. température, humidité relative, déformation mécanique, résistivité électrique, etc.), communiquent ces données sans fil (sur au moins plusieurs dizaines de mètres depuis une poutre en béton armé) et sont télé-alimentés et télécontrôlés à distance (sur une dizaine de mètres, quelle que soit la direction) au travers d'un système de transfert de puissance électromagnétique rayonnée provenant de nœuds communicants. Ceux-ci sont destinés, entre autres, à connecter les mondes physique et numérique.

1. Introduction

Avec l'essor des technologies de communication sans fil, notamment entre machines (M2M), et le paradigme de l'Internet des Objets (IoT), les réseaux de capteurs sans fil (WSN) se sont rapidement démocratisés. Ces derniers servent notamment de base au déploiement de systèmes cyber-physiques (CPS), capables à la fois de surveiller et contrôler le monde physique, et de le connecter au monde numérique et à des jumeaux numériques (*digital twins*), tel un *Building Information Modelling* (BIM). Ces systèmes sont particulièrement adaptés aux applications de suivi de l'état de santé des structures (SHM), et ce dans divers domaines, dont en particulier le génie civil.

Aujourd'hui, le principal frein au déploiement de ces réseaux de capteurs sans fil est leur autonomie énergétique, assurées essentiellement par l'utilisation de batteries. Pour outrepasser cette limitation, les solutions de récupération de l'énergie ambiante et de transfert de puissance sans fil (WPT) sont investiguées [1].

Cet article présente la conception et l'implémentation d'un réseau de capteurs sans fil, dont les nœuds de mesure sont télé-alimentés et télécontrôlés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée, et qui est dédié au suivi de l'état de santé structurelle des bétons armés.

2. Conception et implémentation d'un système cyber-physique dédié au suivi de l'état de santé structurelle des bétons

Le système cyber-physique réalisé se base sur un réseau de capteurs sans fil embarqué, et en partie enfoui, dans du béton armé [2]. L'architecture globale du système est présentée en Fig. 1. Celle-ci se base sur deux types de nœuds : les nœuds communicants (CN) et les nœuds de mesure (SN) ; dont le nombre respectif est fonction de la structure à surveiller et des besoins en termes de mesure, notamment de précision spatiale.

Les nœuds communicants, accessibles en surface et alimentés, servent : (1) à récupérer toutes les données mesurées et transmises par les nœuds de mesure ; (2) puis à les traiter localement et/ou à distance ; (3) à les stocker localement et/ou à distance ; (4) ainsi qu'à les échanger localement et/ou à distance, (i) au sein d'un réseau maillé *ad-hoc* de nœuds communicants, (ii) avec le monde numérique *via* Internet pour construire un(des) modèle(s) virtuel(s), ou encore (iii) avec les utilisateurs. Enfin, (5) ils assurent l'alimentation sans fil et à distance des nœuds de mesure par transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée (en champ lointain), ainsi que le contrôle de leur périodicité de fonctionnement *via* le réglage de leur source de puissance en termes de forme d'onde, de puissance transmise, ou de temps d'activation. A date, les nœuds communicants sont composés d'une passerelle LoRa (basée sur un micro-ordinateur Raspberry Pi et un concentrateur LoRaWAN IMST iC880A embarquant un transmetteur Semtech SX1301) connectée à Internet (*via* un réseau Wi-Fi, Ethernet ou cellulaire) et d'une source de puissance électromagnétique rayonnée (conçue par nos soins) fournissant une onde continue de +33 dBm PIRE en accord avec la réglementation [3], toutes deux localisées au même endroit et fonctionnant dans la bande de fréquence Industrielle, Scientifique et Médicale (ISM) des 868 MHz. Le transfert de puissance électromagnétique rayonnée permet de s'affranchir de la dépendance aux sources d'énergies ambiantes (insuffisantes voire indisponibles, fluctuantes, imprévisibles et incontrôlables), d'être indépendant de l'application et de l'environnement de déploiement visés, mais également d'obtenir des portées d'utilisations de plusieurs mètres dans toutes les directions, même depuis l'intérieur du béton armé.

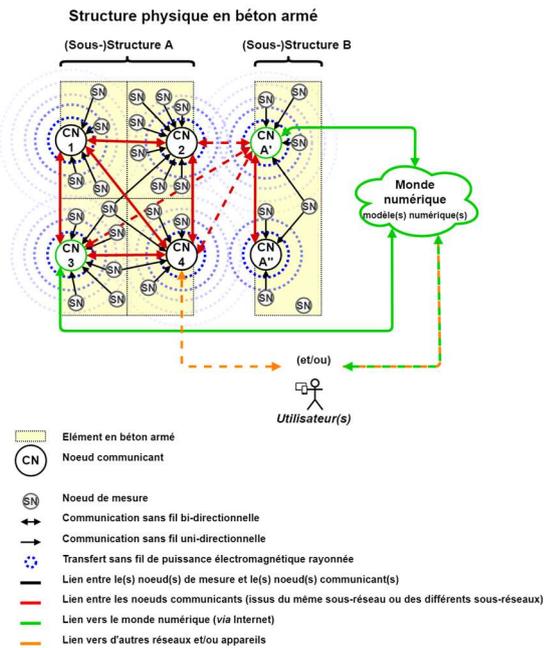


Figure 1. Architecture du système cyber-physique proposé et implémenté.

Les nœuds de mesure, présentés en Fig. 2, sont entièrement enfouis dans le béton armé, donc inaccessibles, et servent : (1) à mesurer les propriétés internes de celui-ci et/ou de son environnement ; (2) à formater ; puis (3) à transmettre ces données aux nœuds communicants à l'aide de communications sans fil fiables et fonctionnelles au travers du béton armé, un médium de propagation des ondes électromagnétiques dispersif, inhomogène, évolutif et très contraignant [4]. En effet, ses propriétés diélectriques évoluent au cours du temps et sont fortement liées à la fréquence des ondes, à sa composition (fortement hétérogène), et à sa concentration en eau. En raison de la grande variété des bétons, il n'existe pas de valeurs génériques pour ces propriétés diélectriques, mais d'après les résultats de mesure publiés la constante diélectrique est généralement comprise entre 4 et 20 et la tangente de perte entre 0,1 et 0,3. Dans le cas des bétons armés, il est à ajouter la présence de structures métalliques de taille et motif variables, pouvant se comporter comme des écrans, voire des cages, de Faraday. Ainsi, les nœuds de mesure doivent être entièrement sans fil, autonomes en énergie, démarrables à froid et sans batterie, reconfigurables, résilients et fiables durant toute leur durée de vie, estimée proche de celle du béton armé (*i.e.* plusieurs décennies). Leur alimentation en énergie et leur contrôle est réalisée par le transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée commandé par le(s) nœud(s) communicant(s).

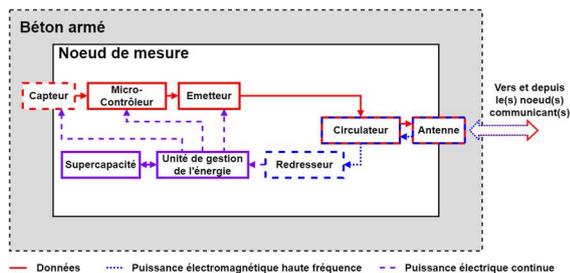


Figure 2. Architecture du nœud de mesure sans batterie, sans fil, télé-alimenté et télécontrôlé, n'employant qu'une unique antenne.

Les nœuds de mesure se composent donc 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. Plusieurs capteurs dédiés à la surveillance de la santé structurelle du béton armé ont été implémentés, dont : des capteurs de température ; des capteurs de température et d'humidité relative ; une jauge de contrainte ; et un capteur de résistivité électrique [2]. Un module Murata CMWX1ZZABZ-091 est utilisé pour formater sur 4 octets et transmettre sans fil dans la bande de fréquence ISM des 868 MHz les données *via* une trame LoRaWAN de 17 octets vers le(s) nœud(s) communicant(s). La configuration LoRaWAN la plus fiable et permettant les plus longues portées est employée. Elle se base sur des transmissions d'une puissance de +14 dBm au débit de 250 bps.

Le sous-système de gestion de l'énergie comprend un redresseur radiofréquence, une unité de gestion de l'énergie (PMU) et un élément de stockage d'énergie. Un redresseur doubleur basé sur des diodes Schottky Skyworks SMS7630 est employé, ainsi qu'une unité de gestion de l'énergie Texas Instruments bq25504 associée à un convertisseur DC/DC Texas Instruments TPS63031 pour alimenter à 3,3 V le sous-système de gestion des données chaque fois que suffisamment d'énergie est disponible dans un supercondensateur AVX de 22 mF.

Du fait qu'une unique bande de fréquence est utilisée simultanément pour la communication sans fil (liaison montante de données) et le transfert sans fil de puissance électromagnétique rayonnée (liaison descendante de puissance), une unique antenne et un circulateur Aerotek C11-1FFF/OPT.N (ayant de faibles pertes d'insertion et des isolations élevées) sont employés. De fait, et simultanément, la puissance électromagnétique captée par l'antenne est transmise au redresseur -ce qui forme une rectenna- et la trame à émettre fournie par l'émetteur est transmise à l'antenne, tout cela *via* le circulateur. Il est à noter l'absence de connexion significative entre le redresseur et l'émetteur, et d'interférence entre les transferts de données et de puissance. Ainsi, le paradigme du transfert sans fil simultané d'informations et de puissance est vérifié sans multiplexage temporel, fréquentiel ou spatial, ni fractionnement de puissance [5].

L'unique antenne est un dipôle quart d'onde repliée avec bras capacitifs (métalliques et orthogonaux au plan du dipôle), présentée en Fig. 3 [6]. Elle fonctionne dans la bande ISM des 868 MHz (entre 848 MHz et 886 MHz), est imprimée sur FR4 (épaisseur : 1,6 mm ; permittivité relative : 4,4 ; tangente de perte : 0,02) et mesure 5,6 cm x 3,2 cm x 1,0 cm. Elle est quasi omnidirectionnelle, a une polarisation linéaire, 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 utilisant la carte électronique comme plan métallique réflecteur de 8 cm par 6 cm placé à 5 cm derrière, le gain augmente jusqu'à +5,00 dBi au prix d'une plus grande directivité (angle d'ouverture : 70 °) et de l'augmentation du volume. Cette antenne semble un bon compromis entre taille et performances en rayonnement à la fréquence visée.

Etant totalement inaccessibles (tant sur le plan matériel avec aucun accès physique, que logiciel avec aucune liaison descendante de données) et leur périodicité de mesures variant au cours du temps, les nœuds de mesure sont néanmoins reconfigurables et télécontrôlés (sans fil et à distance) par les nœuds communicants *via* le contrôle de la liaison descendante de puissance.

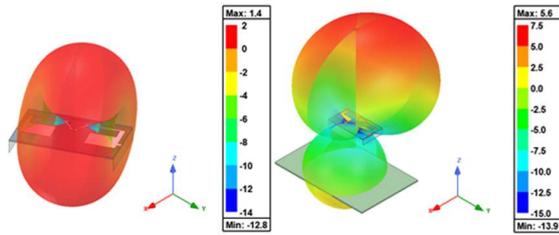


Figure 3. Diagramme de rayonnement simulé (HFSS) de l'antenne dipôle quart d'onde repliée avec bras capacitifs à 868 MHz, sans et avec plan réflecteur métallique.

3. Résultats expérimentaux

Plusieurs implémentations complètes du système cyber-physique ciblé ont été réalisées comme preuves de concept et sont détaillées dans [2].

Ainsi, les nœuds de mesure peuvent mesurer des paramètres propres aux bétons armés (et/ou à leur environnement) pour assurer le suivi de leur santé structurelle durant toute leur vie : la température, l'humidité relative, la déformation mécanique *via* les contraintes mécaniques, et la résistivité électrique qui permet d'estimer le taux de corrosion ; puis formater ces données sur 4 octets, afin de les transmettre sans fil dans des trames LoRaWAN de 17 octets à une puissance de +14 dBm et à un débit de 250 bps sur au moins plusieurs dizaines de mètres (et jusqu'à plusieurs kilomètres) aux nœuds communicants, même s'ils sont embarqués dans une poutre en béton armé comme présenté en Fig. 4. Des travaux usant de la technologie de communication sans fil Bluetooth Low Energy (BLE) ont permis de formater les mesures sur 3 octets, afin de les transmettre sans perte dans 4 trames d'*advertising* de 19 octets envoyées sur 3 canaux à une puissance de +0 dBm et à un débit de 1 Mbps sur au moins une dizaine de mètres depuis une poutre en béton armé.

Les capteurs implémentés ayant une consommation d'énergie approximativement équivalente, l'énergie nécessaire au fonctionnement des nœuds de mesure dépend fortement de la technologie de communication choisie, ainsi que de sa configuration. Ainsi, 250 mJ (soit 62,5 mJ par octet de données, ou 14,71 mJ par octet transmis, ou 1,84 mJ par bit transmis) sont stockés pour le nœud de mesure LoRaWAN décrit. En limitant sa puissance d'émission à +4 dBm, seuls 127 mJ sont nécessaires, soit deux fois moins. Pour la solution

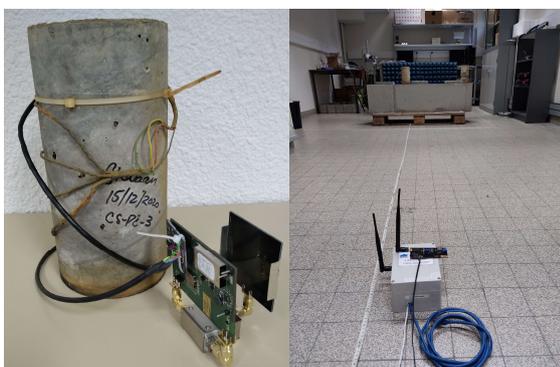


Figure 4. Photographies d'un prototype de nœud de mesure avec un capteur de résistivité, et d'une installation expérimentale avec des nœuds de mesure embarqués dans une poutre de béton armé.

BLE, 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) sont stockés, soit près de 200 fois moins. Les quantités d'énergie stockée sont surestimées de +20 % par rapport aux besoins moyens pour un processus complet afin de certifier le bon fonctionnement malgré la variabilité des composants et leur vieillissement.

La Fig. 5 montre le temps nécessaire pour une première charge (à partir d'un supercondensateur vide) et des recharges (après une autre charge complète) en fonction de l'énergie électromagnétique fournie par le(s) nœud(s) communicant(s) et disponible en entrée du circulateur d'un nœud de mesure stockant 250 mJ. Cela donne une information pertinente concernant la plus petite périodicité du fonctionnement des nœuds de mesure. Ceux-ci fonctionnent dès -14 dBm et au moins jusqu'à +15 dBm, et ont une période de fonctionnement comprise respectivement entre environ 14 heures et 38 minutes, et environ 33 secondes. Des périodicités plus longues peuvent être obtenues en contrôlant la durée et la périodicité d'activation de la source d'énergie par le(s) nœud(s) communicant(s). Généralement, plus l'énergie à stocker est faible et plus la puissance disponible est grande, plus la charge est rapide.

La portée d'utilisation pour le transfert sans fil simultané d'information et de puissance est actuellement limitée par le transfert de puissance et non par la communication sans fil. A partir de la puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure pour fonctionner (fonction de la puissance nécessaire à l'unité de gestion de l'énergie pour fonctionner, mais également des pertes du convertisseur DC/DC et du supercondensateur), il est possible d'estimer sa portée maximale d'utilisation. Expérimentalement, cette puissance est de -14 dBm. En appliquant l'équation de Friis, la distance entre une source de puissance (*i.e.* un nœud communicant émettant +33 dBm PIRE à 868 MHz) et un nœud de mesure équipé d'une antenne de +1,54 dBi de gain et nécessitant -14 dBm, peut être estimée à environ 7,35 mètres. En utilisant un plan réflecteur métallique pour obtenir un gain de +5,00 dBi, -14 dBm peuvent être récupérés à une distance d'environ 10,95 mètres. Aussi, la portée maximale testée avec succès est de 11 mètres en intérieur quelle que soit la direction, la plus importante à la connaissance des auteurs, et il semble possible d'atteindre des distances plus importantes [7]. Aussi, en réduisant puissance minimale requise en entrée des nœuds de mesure et en augmentant le gain de l'antenne, cette portée peut être augmentée.

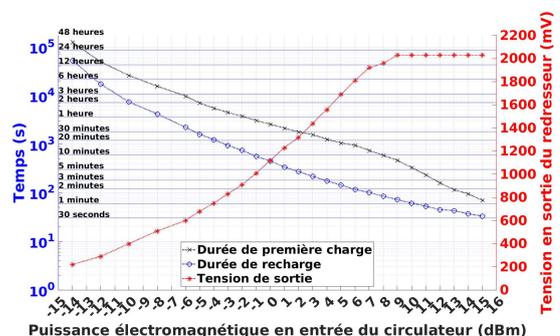


Figure 5. Durées des premières charges et recharges, et tension en sortie du redresseur en circuit ouvert pendant les recharges en fonction de la puissance électromagnétique appliquée au circulateur des nœuds de mesure, pour une fréquence de 868 MHz pour 250 mJ d'énergie à stocker.

Plusieurs tests qualitatifs ont également été réalisés pour s'assurer du bon fonctionnement du système cyber-physique et des nœuds de mesure. Ainsi, un système cyber-physique composé d'un réseau maillé de deux nœuds communicants (dont un connecté à Internet) et de quatre nœuds de mesure, dont trois situés dans des cavités d'air d'une poutre en béton armé, comme présenté en Fig. 4, a été testé avec succès. Ainsi, les nœuds communicants ont télé-alimentés et télécontrôlés les nœuds de mesure (même embarqués dans une 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.

4. Discussion et perspectives

A date, et à la connaissance des auteurs, il n'existe pas de système cyber-physique basé sur un réseau de capteurs sans fil composé de nœuds de mesure entièrement sans fil, autonomes en énergie, démarrables à froid et sans batterie, reconfigurables, et destinés à être entièrement enfouis dans du béton armé pour suivre son état de santé structurelle à long terme et de manière automatique, en réalisant des mesures en son cœur. Par exemple, les solutions destinées à l'estimation de la corrosion ont une durée de vie limitée en raison de l'utilisation de batteries et les mesures de résistivité sont réalisées en surface [8] ou avec des sondes enfouies nécessitant un équipement extérieur [9]. La solution proposée est finalement un réseau de capteurs sans fil télé-alimentés et télécontrôlés, adaptables à diverses applications.

Les nœuds de mesure peuvent être améliorées, tant du point de vue matériel que logiciel : pour obtenir des portées plus importantes, la puissance requise en entrée doit être minimisée, et pour des périodes plus courtes, l'énergie stockée doit être minimisée. Plusieurs compromis doivent ainsi être trouvés, notamment : (1) entre le volume du nœud de mesure et la portée ; et (2) entre la consommation des nœuds de mesure et la qualité des communications sans fils.

Les nœuds de mesure étant inaccessibles et déployés sur le long terme, ils se doivent d'être résilients et fiables durant toute leur durée de vie (*i.e.* plusieurs décennies). C'est pourquoi ils sont conçus aussi simples que possible, sans batterie, démarrables à froid, télé-alimentés, télécontrôlés et avec le moins de composants possible afin de réduire les points de défaillance. Aussi, le choix des technologies de communications sans fil pour lesquelles des réseaux sont déployables et administrables par le propriétaire est privilégié. Aussi, l'antenne doit être retravaillée afin de pouvoir fonctionner efficacement au contact direct du béton. Elle peut également être fabriquée grâce à des techniques additives ou d'impression 3D, et sur divers substrats notamment flexibles. Enfin, l'encapsulation des nœuds de mesure doit être considéré afin de les déployer directement et aléatoirement dans le béton armé tels des agrégats afin d'y effectuer des mesures fiables. Finalement, il est supposé que la défaillance d'un composant électronique (*e.g.* le microcontrôleur) liée à l'âge ou à l'environnement soit la cause la plus probable d'une défaillance complète du système cyber-physique.

Conclusion

Cet article présente un système cyber-physique destiné au suivi de l'état de santé structurelle des bétons armés, mais aisément scalable à d'autres applications, notamment en

milieux contraints. Il se compose d'un réseau de capteurs sans fil, comprenant des nœuds communicants et des nœuds de mesure. Ces derniers sont sans-fil, sans batterie, enfouis dans le béton armé, et alimentés et contrôlés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée. Ce système est à l'état de l'art des solutions de transfert sans fil simultanée d'information et de puissance en utilisant une unique antenne pour ces deux fonctions, et propose la plus grande distance d'utilisation testée à la connaissance des auteurs (11 mètres). Les nœuds de mesures sont également la première implémentation connue par les auteurs de résistimètre autonome en énergie totalement enfoui dans du béton.

Remerciements

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

Références

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] S.S. Zhekov, et al., « *Dielectric properties of common building materials for ultrawideband propagation studies [Measurements Corner]* », *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 62, n° 1, pp. 72-81, 2020.
- [5] T.D. Ponnimbaduge Perera, et al., « *Simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT): Recent advances and future challenges* », *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, n° 1, pp. 264-302, 2018.
- [6] A. Sidibe, et al., « *Compact Antenna in 3D Configuration for Rectenna Wireless power transfer Applications* », *Sensors*, vol. 21, n° 9, p. 3193, 2021.
- [7] A. Costanzo, et al., « *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.
- [8] « *Screening Eagle - Proceq Resipod* », disponible en ligne : <https://www.screeningeagle.com/en/products/resipod> (accédé le 21 février 2022).
- [9] D.M. Corva, et al., « *Miniature resistance measurement device for structural health monitoring of reinforced concrete infrastructure* », *Sensors*, vol. 20, n° 15, p. 4313, 2020.