



HAL
open science

Réseau de capteurs Bluetooth Low Energy, sans fil et sans batterie, télé-alimentés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée

G Loubet, Alassane Sidibé, Taki Eddine Djidjekh, Lamoussa Sanogo, Alexandre Rumeau, Alexandru Takacs, Daniela Dragomirescu

► To cite this version:

G Loubet, Alassane Sidibé, Taki Eddine Djidjekh, Lamoussa Sanogo, Alexandre Rumeau, et al.. Réseau de capteurs Bluetooth Low Energy, sans fil et sans batterie, télé-alimentés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée. XXIIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Antibes Juan-Les-Pins, France. pp.503-506. hal-04740194

HAL Id: hal-04740194

<https://laas.hal.science/hal-04740194v1>

Submitted on 16 Oct 2024

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 Bluetooth Low Energy, sans fil et sans batterie, télé-alimentés par transfert de puissance électromagnétique rayonnée

G. Loubet^{1,2}, A. Sidibé¹, T. E. Djidjekh¹, L. Sanogo¹, A. Rumeau¹, A. Takacs^{1,3}, 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 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 utilisant le standard de communication Bluetooth Low Energy et pouvant être déployé pour diverses applications, par exemple pour le suivi de l'état de santé de structures en bétons armés. Ce réseau est notamment composé de nœuds de mesure capables de quantifier différents paramètres dont la température, l'humidité relative, ou encore la résistivité diélectrique des bétons armés. Afin d'assurer leur autonomie énergétique sur le long terme, ces nœuds de mesure sont sans batterie et télé-alimentés et télécontrôlés (id est à distance et sans fil) au travers d'un système de transfert de puissance électromagnétique rayonnée géré par des nœuds communicants. Ces derniers permettent de connecter les mondes physique et numérique afin d'obtenir un système cyber-physique.

1. Introduction

Dans le cadre du projet ANR **McBIM** [1], des réseaux de capteurs sans fil (WSN) ont été mis au point avec pour objectif le suivi de l'état de santé des structures (SHM) en béton armé au sein de systèmes cyber-physiques (CPS) [2-4]. L'architecture des réseaux conçus, implémentés, testés et caractérisés, est présentée en Fig. 1. Ces réseaux se composent de deux types de nœuds : les nœuds de mesure (SN) et les nœuds communicants (CN) ; et peuvent être déployés dans diverses applications -étant génériques-.

Les nœuds communicants sont considérés comme alimentés en énergie et accessibles durant toute la période d'exploitation du WSN. Ils servent à (1) collecter, (2) traiter et (3) stocker localement les données mesurées et transmises par les nœuds de mesure, mais également à (4) échanger ces données au sein : (i) d'un réseau maillé *ad-hoc* de nœuds communicants, (ii) avec des modèles (ou jumeaux) numériques (BIM) *via* Internet, et (iii) localement avec les utilisateurs ; ainsi qu'à (5) télé-alimenter et (6) télécontrôler -en termes de fréquence de fonctionnement- les nœuds de mesure de leur environnement immédiat, et ce, en contrôlant leur source de puissance électromagnétique rayonnée.

Les nœuds de mesure sont inaccessibles durant toute la période d'exploitation du WSN. Ils ont été conçus pour être autonomes en énergie et télé-alimentés par transfert sans fil de puissance (WPT) électromagnétique rayonnée [5]. Ils sont initialement destinés à être enfouis au cœur de bétons armés, afin d'en mesurer les propriétés internes. Une fois les données relevées, celles-ci sont prétraitées

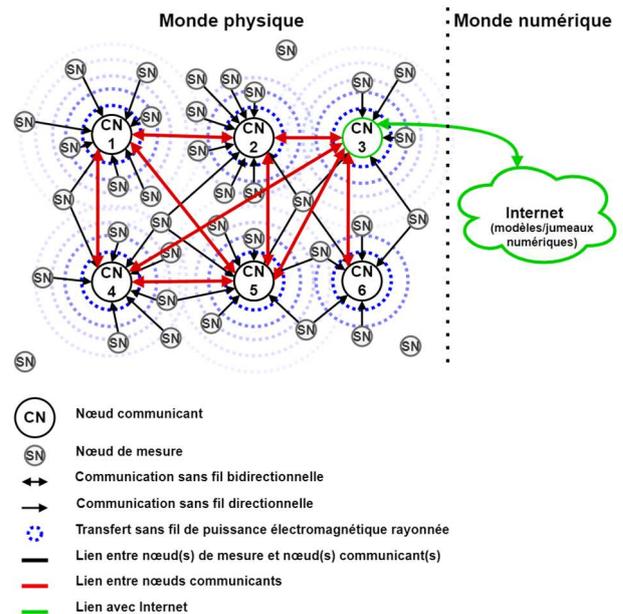


Figure 1. Architecture du réseau maillé de capteurs Bluetooth Low Energy sans batterie et télé-alimentés.

(essentiellement formatées) puis transmises aux nœuds communicants grâce à des technologies de communication sans fil fiables et fonctionnelles, en particulier au travers des bétons armés -des milieux de propagation des ondes électromagnétiques très contraignants [6]-.

Aussi, les nœuds de mesure présentent des contraintes de conception fortes : ils se doivent d'être (1) compacts, (2) entièrement sans fil, (3) autonomes en énergie, (4) sans batterie (pour des raisons de durée de vie et de coûts (pécuniers et environnementaux)), (5) résilients, et (6) fiables durant toute leur durée de vie -estimée proche de celle du béton armé lui-même, *id est* plusieurs décennies-. Pour assurer leur alimentation en énergie, une solution de WPT électromagnétique rayonnée (en champ lointain) depuis les nœuds communicants a été mise en œuvre. Cette solution permet de s'affranchir de la dépendance aux sources d'énergies ambiantes (non-prédictibles et très faibles -voire inexistantes au cœur des bétons armés-), mais également d'être indépendant de l'application visée, ainsi que de l'environnement de déploiement [7].

Une première implémentation du WSN a été proposée en se basant sur des communications sans fil LoRaWAN entre les nœuds de mesure et les nœuds communicants [2-

4]. Afin de réduire les besoins énergétiques des nœuds de mesure, et de tendre vers des distances de communication et de télé-alimentation du même ordre de grandeur (environ une dizaine de mètres), une nouvelle implémentation s'appuyant sur les dernières évolutions de la technologie de communication sans fil Bluetooth Low Energy (BLE) est proposée dans cet article [8-10].

Par la suite, la conception, l'implémentation, le test et la caractérisation de ces nœuds de mesures sont présentés.

2. Conception et implémentation du nœud de mesure sans batterie et télé-alimenté

La topologie et l'implémentation du nœud de mesure sans batterie et télé-alimenté sont présentées en Fig. 2.

Afin de minimiser la consommation énergétique du nœud de mesure BLE, des communications en mode "broadcaster/observer" entre les nœuds de mesure et le(s) nœud(s) communicant(s) ont été mises en œuvre. Les mesures (température et humidité relative, et résistivité diélectrique du béton) sont obtenues par des capteurs actifs de très faible consommation (Texas Instruments HDC2080 et circuit analogique "maison" pour instrumenter une sonde Wenner [11]). Ces données mesurées sont ensuite transmises dans quatre trames d'"advertising" BLE, systématiquement sur trois canaux dédiés (n° 37, 38 et 39) dans la bande de fréquences Industrielle, Scientifique et Médicale (ISM) autour des 2,45 GHz, au travers d'un module tout-en-un comprenant un microcontrôleur et un émetteur-récepteur (NXP QN9080) connecté à une antenne imprimée en F inversé (PIFA) et méandré. Cette redondance dans l'émission permet d'augmenter la probabilité de bonne réception en minimisant les interférences avec les systèmes communicants sans fil usant de la même bande de fréquences ISM autour des 2,45 GHz, en particulier les systèmes employant la Wi-Fi.

Le profil de consommation de la partie active du nœud de mesure est présenté en Fig. 3. Afin d'alimenter la partie active du nœud de mesure, une solution sans batterie et basée sur le WPT électromagnétique rayonnée a été implémentée. Récupérant moins de puissance que nécessaire à un fonctionnement en continu, l'utilisation d'un condensateur de 220 μF comme tampon d'énergie a été privilégié. Il est à noter qu'un condensateur de 100 μF est suffisant lorsqu'il est question de ne mesurer que la température et l'humidité relative, ou que la résistivité

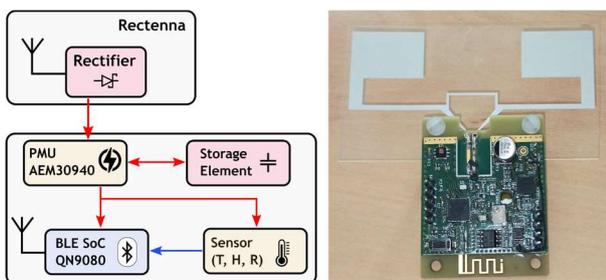


Figure 2. Diagramme bloc et photographie d'un prototype de nœud de mesure, incluant une antenne pour la récupération de puissance fabriquée sur substrat flexible (PET).

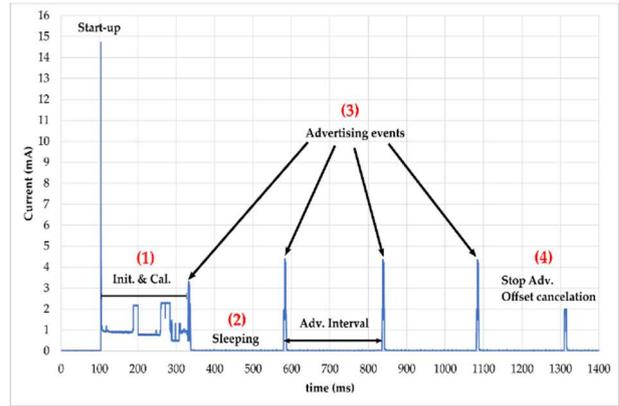


Figure 3. Profil de consommation du nœud de mesure.

diélectrique du béton. L'onde continue transmise par le(s) nœud(s) communicant(s) dans la bande de fréquence ISM autour des 868 MHz est récoltée par une antenne imprimée sur substrat flexible (PET) puis redressée dans un redresseur doubleur à base de diode Schottky (Skyworks Solutions Inc. MS7630-005LF) adapté en impédance, puis filtrée. Ainsi, une puissance continue est fournie à une unité de gestion de puissance (PMU) (E-PEAS AEM30940) qui optimise la récupération de puissance et qui stocke l'énergie dans le condensateur. De cette manière, le démarrage à froid -*id est* à partir d'un condensateur totalement déchargé- est possible, et le nœud de mesure reste interrogeable même après une très longue période d'oubli. Lorsque l'énergie emmagasinée dans le condensateur atteint un seuil préprogrammé, la PMU décharge cette énergie au travers d'un convertisseur DC-DC afin d'alimenter la partie active du nœud de mesure. Lorsqu'un seuil de décharge est atteint, la PMU arrête la décharge et donc l'alimentation du nœud de mesure. En configurant matériellement la PMU au travers de ses seuils, il est possible de stocker uniquement l'énergie nécessaire à un processus complet (démarrage, initialisation, mesure, formatage des données, et émission de 4 trames d'"advertising") qui dure environ 1,3 secondes, soit 1,2 mJ.

3. Résultats expérimentaux

Afin de quantifier ses performances, le nœud de mesure BLE a notamment été caractérisé en chambre anéchoïque, tel que présenté en Fig. 4. Pour des raisons de commodité, le nœud communicant a été scindé en deux parties : une pour les données et une pour la puissance. Néanmoins, l'intégration (et la colocation) de ces deux systèmes est possible et a été testée.

La partie traitant des données se compose d'un ordinateur portable sur lequel est connecté une carte d'évaluation du module tout-en-un BLE (NXP QN9080). Ainsi, les données mesurées et transmises par le nœud de mesure sont récupérées par le module tout-en-un BLE qui les envoie sur l'ordinateur pour (i) affichage en temps réel, (ii) stockage local, et (iii) mise à disposition *via* un accès Internet en Wi-Fi (ou 3G/4G). En se basant sur l'horodatage des messages reçus, il est possible de quantifier la périodicité de recharge du nœud de mesure, sans la mesurer directement sur ce nœud de mesure ce qui altérerait son fonctionnement nominal.

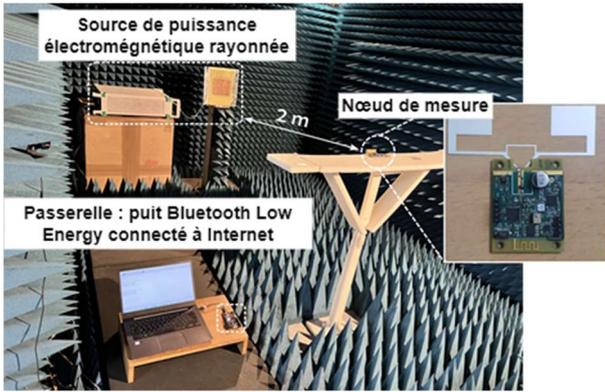


Figure 4. Dispositif expérimental de caractérisation du nœud de mesure en chambre anéchoïque, permettant de tester le transfert sans fil simultané d'information et de puissance.

La partie s'assurant de la télé-alimentation des nœuds de mesure par WPT électromagnétique rayonnée se compose d'un synthétiseur de puissance (pouvant être commandé depuis l'ordinateur portable) connecté à une antenne patch (gain de +9,4 dBi) tous deux fonctionnant dans la bande de fréquence ISM autour des 868 MHz, et ayant une puissance limitée à +33 dBm (ou 2 W) en accord avec les réglementations actuelles [12]. La distance entre cette source radiofréquence et le nœud de mesure a été fixée à deux mètres. De fait, les pertes en espace libre sont estimées à environ 37,23 dB. En contrôlant la puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP) de la source de puissance, la périodicité de recharge du nœud de mesure peut être contrôlée, et donc caractérisée en fonction de la puissance reçue par celui-ci.

Ainsi, les temps de première charge et de recharge ont été caractérisés et sont synthétisés dans la Table I.

Le temps de première charge correspond à la durée nécessaire pour obtenir les premières mesures et leur transmission dans 4 trames d'"*advertising*". Il s'agit donc du cas de démarrage à froid : le condensateur de stockage est complètement vide. Dans ce cas, 2,0 mJ doivent être stockés avant l'alimentation de la partie active du nœud de mesure : cela correspond à l'énergie nécessaire pour un processus complet (environ 1,2 mJ) à laquelle s'ajoute une marge d'environ 20 % pour compenser la variabilité et le vieillissement des composants, ainsi que la charge résiduelle du condensateur qui ne peut pas être exploitée par l'unité de gestion de la puissance. Le condensateur est chargé jusqu'à un seuil d'activation de l'alimentation (réglé matériellement à 4,23 V au niveau de l'unité de gestion de la puissance) et va ensuite se décharger au travers d'un régulateur de tension de 3,3 V jusqu'à un seuil de désactivation de l'alimentation (réglé

PIRE (dBm)	P_{Rx} (estimée) (dBm)	Première charge (s)	Recharge (s)
32,7	-3,33	54	27
30,7	-5,33	105	50
28,7	-7,33	200	96
26,7	-9,33	420	206
24,7	-11,33	1073	501

Table I. Temps de première charge et de recharge du nœud de mesure en fonction de la puissance transmise par la source, pour une distance de deux mètres.

matériellement à 1,94 V au niveau de l'unité de gestion de la puissance). A ce moment-là, le nœud de mesure n'est plus alimenté jusqu'à la prochaine charge complète. Subséquemment, si la puissance disponible en entrée du récupérateur d'énergie est suffisante, une recharge va débiter jusqu'à ce que 1,6 mJ supplémentaire soient stockés et permettent un nouveau processus complet. La périodicité de fonctionnement du nœud de mesure, contrôlée par le nœud communicant au travers de la gestion du WPT électromagnétique rayonné, va d'environ 27 secondes pour une puissance isotrope rayonnée équivalente d'environ +32,7 dBm, à 8 minutes et 21 secondes pour environ +24,7 dBm transmis. Respectivement, la première charge a une durée comprise entre 54 secondes et 17 minutes et 53 secondes. En l'état, le nœud de mesure peut fonctionner à partir d'une puissance d'environ -17 dBm (ou environ 20 μ W) en sortie de l'antenne de récupération de puissance, ce qui a permis des tests de télé-alimentation sur des distances de l'ordre de la dizaine de mètres.

Plusieurs implémentations du WSN ont été réalisées afin de tester différents cas d'usage, et ce dans des environnements divers. Ainsi, une unique source de puissance peut aisément alimenter une multitude de nœuds de mesure qui peuvent communiquer sans perte à un même nœud communicant. Aussi, une même source peut servir à alimenter des nœuds de mesure différents notamment dans la technologie de communication sans fil employée. Par exemple, des nœuds de mesure BLE et LoRaWAN ont pu cohabiter sans gêne et être alimentés par une même source, avec des périodicités de fonctionnement différentes du fait de besoins en énergie différents. Enfin, les nœuds de mesure ont été déployés et testés avec succès dans une poutre de béton armé.

En usant d'une technique de multiplexage de fréquences et de deux antennes distinctes, le réseau sans fil de capteurs proposé répond au paradigme du transfert sans fil simultané d'information et de puissance (SWIPT) [13]. Dans les faits, le WPT électromagnétique rayonnée est réalisé dans la bande de fréquences ISM autour des 868 MHz depuis le(s) nœud(s) communicant(s) vers les nœuds de mesure (voie descendante de puissance), tandis que le transfert d'information est réalisé dans la bande de fréquences ISM autour des 2,45 GHz depuis les nœuds de mesure vers le(s) nœud(s) communicant(s) (voie ascendante de données). Il est à noter qu'afin de réduire à la fois la consommation énergétique et les risques de compromission par cyber-attaque, la voie descendante de donnée n'a pas été implémentée.

A date, il existe dans la littérature quelques solutions de nœuds de mesure sans batterie et télé-alimentés par WPT électromagnétique rayonnée, généralement conçus pour une application spécifique. Ici, le WSN est voué -à la configuration près- à être générique et à être déployé pour des applications diverses. Un tableau comparatif des solutions actuelles est notamment présenté dans [4]. Parmi ces solutions, très peu emploient la technologie de communication sans fil BLE [14,15]. Ces dernières visent une alimentation en continu du nœud de mesure (plongé régulièrement en sommeil profond) et ont donc une distance de déploiement limitée à environ 2 mètres par la télé-alimentation. La solution proposée est plus optimisée

d'un point de vue efficacité énergétique, en employant des capacités du même ordre de grandeur -voir inférieures- non pas pour lisser la consommation dans le temps mais pour assurer la totalité de l'alimentation nécessaire à un processus complet, et ce pour des distances de télé-alimentation allant jusqu'à la dizaine de mètres. Enfin, la périodicité de mesure est ici contrôlée à distance, sans fil et sur demande au travers de la gestion de la puissance électromagnétique rayonnée transmise par le nœud communicant, et n'est donc pas figée logiciellement au niveau de nœud de mesure.

4. Conclusion

Une architecture innovante d'un nœud de mesure sans fil, sans batterie et télé-alimenté en champ lointain a été présentée dans cet article. Les résultats expérimentaux confirment qu'en utilisant un condensateur standard de seulement 220 μF pour stocker environ 2,0 mJ, ce nœud de mesure peut quantifier la température, l'humidité relative et la résistivité diélectrique du béton, et diffuser suivant la technologie Bluetooth Low Energy ces données relevées à au moins un nœud communicant connecté à Internet, ce qui permet ainsi leur mise à disposition dans le monde numérique. À terme, la technologie Bluetooth Low Energy permettra de s'interfacer directement avec les terminaux "conventionnels" des utilisateurs (tels des téléphones intelligents ou des ordinateurs) à l'aide d'un logiciel applicatif dédié.

Aussi la périodicité de fonctionnement du nœud de mesure peut être contrôlée par le(s) nœud(s) communicant(s) au travers du réglage de leur source de puissance radiofréquence. Cette périodicité s'échelonne de quelques secondes à quelques heures en fonction de la puissance reçue en entrée de la rectenna (*id est* du récupérateur) du nœud de mesure.

Enfin, la solution proposée permet de répondre au paradigme du transfert sans fil simultané d'information et de puissance en usant de deux bandes de fréquences pour séparer le transfert sans fil de puissance et la communication sans fil, qui ici ont une portée du même ordre de grandeur (*id est* la dizaine de mètres).

5. Remerciements

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

Les auteurs tiennent également à remercier M. Abokassem pour son aide dans la conception des prototypes de nœuds de mesure Bluetooth Low Energy.

Références

[1] W. Derigent, et al., "Materials communicating with the BIM: results of the McBIM project," IFAC-PapersOnLine, vol.55, no.8, pp.25-30, in 6th IFAC Symposium on Telematics Applications TA 2022, Nancy, France, 2022.

[2] G. Loubet, A. Takacs, and 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.

[3] G. Loubet, "Autonomous wireless sensor networks for the implementation of communicating materials. Application to civil engineering industry", Thèse de Doctorat, INSA Toulouse, 2021.

[4] G. Loubet, A. Sidibe, P. Herail, A. Takacs, et D. Dragomirescu, "Autonomous Industrial IoT for Civil Engineering Structural Health Monitoring," IEEE Internet of Things Journal, 2023.

[5] V. Palazzi et al., "Radiative Wireless Power Transfer: Where We Are and Where We Want to Go," in IEEE Microwave Magazine, vol.24, no.2, pp.57-79, 2023.

[6] S. S. Zhekov, O. Franek, et G. F. Pedersen, "Dielectric properties of common building materials for ultrawideband propagation studies [Measurements Corner]," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.62, no.1, pp.72-81, 2020.

[7] G. Peruzzi, et A. Pozzebon, "A review of energy harvesting techniques for Low Power Wide Area Networks (LPWANs)," Energies, vol.13, no.13, p.3433, 2020.

[8] A. Sidibe, G. Loubet, A. Takacs, et D. Dragomirescu, "A Multifunctional Battery-Free Bluetooth Low Energy Wireless Sensor Node Remotely Powered by Electromagnetic Wireless Power Transfer in Far-Field," Sensors, vol.22, no.11, p.4054, 2022.

[9] A. Sidibe, "Compact RF Wireless Power Transmission System for Battery-Free Geolocation", Thèse de Doctorat, Université Toulouse 3 - Paul Sabatier, 2023.

[10] A. Sidibe, G. Loubet, A. Takacs, L. Sanogo, et D. Dragomirescu, "Battery-free Bluetooth Low Energy Wireless Sensor Powered by Radiative Wireless Power Transfer," in 2023 21st IEEE Interregional NEWCAS Conference (NEWCAS), pp.1-4, Edinburgh, United Kingdom, June 2023.

[11] 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 Toulouse 3 - Paul Sabatier, Toulouse, France, 2019.

[12] 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.

[13] 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 Communication Surveys Tutorials, vol.20, no.1, pp.264-302, 2018.

[14] J. Janhunen, K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, et M. Sonkki, "Wireless energy transfer powered wireless sensor node for green IoT: Design, implementation and evaluation," Sensors, vol.19, no.1, p.90, 2019.

[15] R. La Rosa, C. Dehollain, et P. Livreri, "Advanced Monitoring Systems Based on Battery-Less Asset Tracking Modules Energized through RF Wireless Power Transfer", Sensors, vol.20, no.11, p.3020, 2020.