



**HAL**  
open science

# Nœuds de mesure sans-fil et sans batterie communiquant en LoRa et commandés par leur interface d'alimentation par transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain

Gael Loubet, Alexandru Takacs, Alexandre Rumeau, Daniela Dragomirescu

## ► To cite this version:

Gael Loubet, Alexandru Takacs, Alexandre Rumeau, Daniela Dragomirescu. Nœuds de mesure sans-fil et sans batterie communiquant en LoRa et commandés par leur interface d'alimentation par transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain. Journées Nationales Microondes (JNM), May 2019, Caen, France. hal-02553322

**HAL Id: hal-02553322**

**<https://laas.hal.science/hal-02553322v1>**

Submitted on 12 Dec 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.

# Nœuds de mesure sans-fil et sans batterie communiquant en LoRa et commandés par leur interface d'alimentation par transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain

G. Loubet<sup>1</sup>, A. Takacs<sup>1,2</sup>, A. Rumeau<sup>1</sup>, D. Dragomirescu<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> LAAS-CNRS, 7 Avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse

<sup>2</sup> UPS-Université de Toulouse, 118 Route de Narbonne, 31330 Toulouse

<sup>3</sup> INSA Toulouse, 135 Avenue de Rangueil, 31400 Toulouse  
gael.loubet@laas.fr

**Résumé** – Ce papier adresse le concept de nœuds de mesure sans-fil et sans batterie communicant destinés aux applications de suivi de l'état des structures dans les environnements difficiles, particulièrement dans le domaine de la construction. Ces nœuds sont sans batterie et alimentés par transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain. Ils sont capables de mesurer à la fois la température et l'humidité relative et de communiquer les données mesurées sans-fil sur longue distance -selon la technologie LoRa et le protocole LoRaWAN-. La périodicité de mesure et de communication est contrôlée via l'interface d'alimentation sans-fil. Les résultats obtenus lors de la caractérisation des premiers prototypes prouvent le fonctionnement de ce nouveau type de commande sans-fil à distance.

## 1. Introduction

Le projet ANR McBIM (Matière Communicante au service du Building Information Modelling) [1] a pour finalité la concrétisation du concept de matière communicante [2] au travers du cas du béton armé communicant. A ses fins, un réseau composé de différents types de nœuds sans-fil (communicant (CN) et de mesure (SN)) -capables de générer, traiter, stocker et échanger des données sur plusieurs mètres, durant plusieurs décennies et autonomes en énergie- a été imaginé pour être embarqué dans des éléments en béton armé [3]. Cette architecture est présentée en Fig. 1. Les nœuds de mesure sont destinés à la quantification des paramètres physiques de l'environnement et à la transmission des données relevées aux nœuds communicants. Ces derniers ont en charge d'agglomérer les données mesurées, de les traiter, stocker et échanger avec le reste du réseau, ainsi que de faire la connexion entre les mondes physique et numérique *via* l'Internet. Ceux sont également eux qui sont responsables de l'alimentation à distance des nœuds de mesure.

Parmi les applications ciblées par le projet, on retrouve le suivi de l'état des structures (SHM) que l'on souhaite interconnecter avec la mise en œuvre d'un modèle numérique du bâtiment (BIM) [4] afin d'obtenir un système cyber-physique (CPS) complet. L'inaccessibilité des nœuds de mesure une fois déployés

a imposé le caractère sans batterie et alimentés à distance par transfert d'énergie sans-fil. Malgré la présence de diverses sources d'énergie disponibles mais fortement variables dans un bâtiment [5], et contrairement à [6] qui propose une solution de transfert d'énergie sans-fils en champ proche pour l'alimentation d'un capteur embarqué dans du béton, le choix du transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain (RF WPT) a été fait afin d'augmenter la distance utile d'utilisation du système, en plus d'avoir un contrôle total sur l'énergie disponible et transmise par les nœuds communicants aux nœuds de mesure.

Le prototype de nœud de mesure sans-fil conçu est présenté dans la section 2. Celui-ci est alimenté à distance grâce au transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain, mesure des données de température et d'humidité relative et communique ces données sur de longues distances en usant de la technologie LoRa et du protocole LoRaWAN [7]. La périodicité des mesures et des émissions est contrôlée par l'interface d'alimentation sans-fil. Les résultats obtenus sont l'objet de la section 3. A l'heure actuelle, seules des expérimentations dans l'air ont été réalisées. De par les contraintes temporelles et matérielles, les expérimentations dans du béton armé n'ont pas encore eu lieu. Ce changement de medium influera *a priori* fortement sur la propagation des ondes radiofréquences. La section 4 compile des discussions.

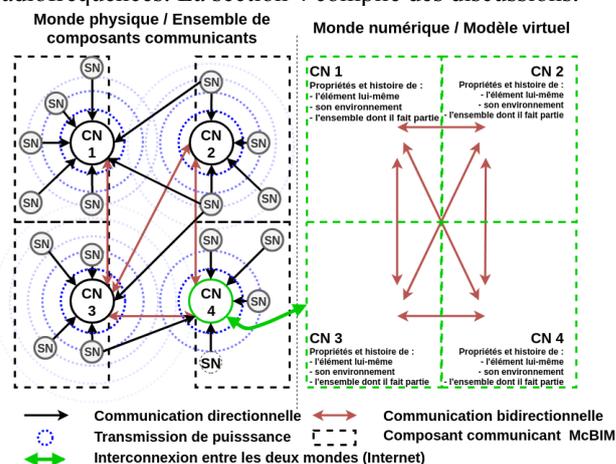


Figure 1. Schéma bloc de l'architecture réseau

## 2. Prototypage de nœuds de mesure sans-fil et sans batterie alimentés par transfert d'énergie sans-fil en champ lointain et communiquant en LoRaWAN

Le prototype de nœud de mesure conçu se compose des éléments présentés par le schéma bloc de la Fig. 2 :

(i) une rectenna adaptée et optimisée pour fonctionner dans la bande ISM des 868 MHz -composée d'une antenne dipôle arrondie avec anneau rectangulaire, compacte et large bande, réalisée sur un substrat FR4 (épaisseur : 0,8 mm, permittivité électrique relative : 4,4 et tangente de perte : 0,02) et d'un redresseur basé sur une diode Schottky (Avago HSMS 2850) en configuration série réalisé sur un substrat Rogers RT/Duroid 5870 (épaisseur : 0,787 mm, permittivité électrique relative : 2,3 et tangente de perte : 0,0012), ainsi que d'un circuit d'adaptation d'impédance entre l'antenne et le redresseur (composé d'un *stub* en court-circuit et d'une inductance) et d'un filtre passe-bas en sortie du redresseur [8]- permettant la récupération d'énergie radiofréquence et sa transformation en puissance à courant continu

(ii) une unité de gestion de l'énergie (PMU) -Texas Instruments bq25504 [9]- permettant l'administration optimisée de l'énergie récupérée par la rectenna afin de la stocker dans le supercondensateur puis de l'utiliser pour alimenter l'ensemble des composants actifs du nœud de mesure

(iii) un élément de stockage d'énergie composé d'un supercondensateur -AVX BZ01CA223ZSB de 22 mF [10]- permettant le stockage de l'énergie récupérée par la rectenna et gérée par la PMU

(iv) un module de communication LoRa -Semtech sx1276- (qui s'occupe de la couche physique LoRa) associé à un microcontrôleur -STMicroelectronics STM32L072CZ- (qui s'occupe de la couche protocolaire LoRaWAN et du code applicatif) et une antenne bâton ayant un gain d'environ +1 dBi -Murata CMWX1ZZABZ-091 sur une carte STMicroelectronics B-L072Z-LRWAN1 [11]- permettant la récupération, le traitement et la transmission selon le protocole LoRaWAN des données mesurées

(v) un capteur de température et d'humidité relative -Adafruit DHT22 [12]- permettant la mesure de ces deux paramètres environnementaux.

Le supercondensateur est initialement vide. La PMU est démarrée suivant une procédure de démarrage à froid, qui nécessite une tension d'au moins 350 mV en entrée et une puissance d'entrée supérieure à 15  $\mu$ W. Une fois le démarrage à froid accompli et pour une puissance d'entrée d'au moins 15  $\mu$ W et supérieure à la somme des puissances perdues par le système (courants de fuite), la PMU commence à charger efficacement le supercondensateur. Lorsque suffisamment d'énergie est stockée, les composants actifs sont alimentés. Ainsi, le supercondensateur est chargé et déchargés entre deux seuils, respectivement de 5,25 V ( $V_{max}$ ) et 2,30 V ( $V_{min}$ ) visibles sur le graphe de la Fig. 3 Des seuils de protection contre les sur- et sous-tensions de l'élément de

stockage d'énergie sont également implémentés matériellement.

Spécifiquement lors de la décharge du supercondensateur, i.e. lorsque les éléments actifs sont alimentés, la partie logicielle initialise le microcontrôleur, le capteur (avec un délai d'environ une seconde avant de pouvoir réaliser la première mesure) et le module de communication. Ensuite, le capteur fait une mesure de température et d'humidité relative que le microcontrôleur récupère, traite et encapsule dans une trame LoRaWAN qui est enfin transmise par le module de communication LoRa. Une fois la transmission finie, le nœud entre en sommeil profond avant d'être totalement éteint. Le fonctionnement complet dure environ 2,13 s (environ 830 ms d'initialisation et de mesure et 1,30 s de transmission). Le système a besoin de 214 mJ pour réaliser totalement ce traitement et 64 mJ sont dédiés uniquement au fonctionnement du capteur. Les trames transmises sont reçues *via* une passerelle LoRa placée à 1,3km du lieu d'expérimentation et sont ensuite transmises au réseau TheThingsNetwork [13] pour y être redirigées par l'utilisateur vers ses espaces de stockage et de traitement. Les processus de récupération, de traitement et de stockage des données sur serveurs n'ont pas encore été implémentés.

A ce stade du projet, le prototype n'est ni intégré, si miniaturisé mais permet une preuve de concept validant les architectures proposées en Fig. 1 et Fig. 2. Finalement les fonctionnalités suivantes sont implémentées :

(i) l'autonomie d'énergie et l'aspect sans batterie sont assurées par le système de transfert d'énergie sans-fil en champ lointain *via* la rectenna, par le supercondensateur et par la PMU

(ii) la mesure est réalisée par un capteur de température et d'humidité relative

(iii) la communication sans-fil unidirectionnelle entre les nœuds de mesure et communicants est garantie par le logiciel applicatif et la librairie protocolaire LoRaWAN embarqués dans le microcontrôleur et par le module de communication LoRa

(iv) le contrôle de la périodicité de mesure et de transmission des données est possible en contrôlant la quantité de puissance transmise aux nœuds de mesures par les nœuds communicants.

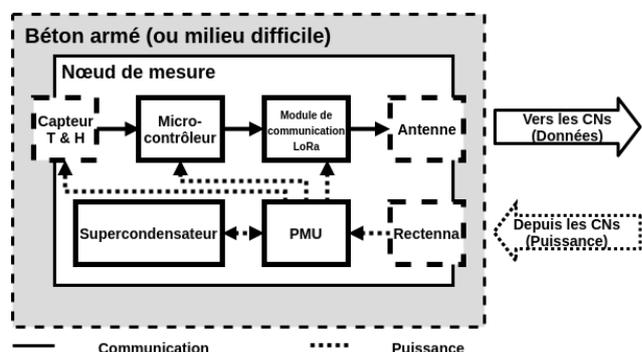
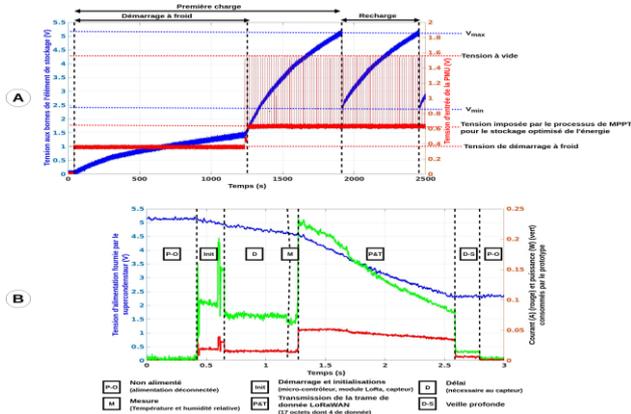


Figure 2. Schéma bloc du nœud de mesure sans-fil sans batterie et alimenté par transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain conçu.



**Figure 3. Pour une puissance radiofréquence estimée à +0 dBm à l'entrée du redresseur : a) tensions aux bornes du supercondensateur (bleu) et à la sortie de la rectenna (rouge) ; b) zoom sur la période de décharge : tension aux bornes du supercondensateur (bleu), courant consommé (rouge) et puissance consommée par les composants actifs (vert)**

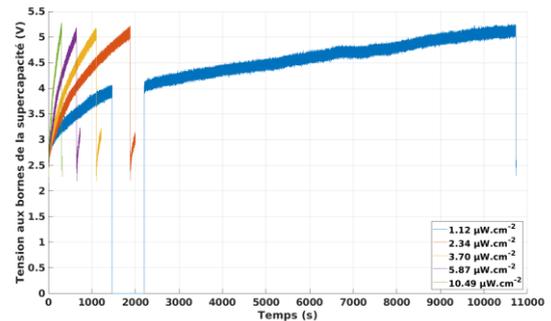
### 3. Résultats expérimentaux

Afin de valider le fonctionnement du prototype, nous avons réalisé trois phases de test : en maîtrisant l'énergie en entrée du redresseur, dans un milieu contrôlé (chambre anéchoïque) et en extérieur [3].

L'installation expérimentale pour les mesures en chambre anéchoïque et en environnement extérieur - présentée en Fig. 4- se compose d'une source de puissance radiofréquence (un générateur de signal Anritsu MG3694B opérant à 868 MHz connecté à une antenne patch adaptée et ayant un gain de +9,2 dBi à 868 MHz, les pertes dues aux connectiques sont estimées à 2,5 dB) qui génère une densité de puissance électromagnétique illuminant la rectenna (ayant un gain de +2,2 dBi) du prototype. Le prototype se situe à 150 cm de la source de puissance radiofréquence, i.e. en champ lointain. Afin de discriminer les émissions de puissance et les émissions destinées à la communication LoRa -toutes deux fonctionnant à 868 MHz- nous avons choisi d'utiliser des antennes à polarisation linéaire, orthogonalement orientées. Le nœud communicant n'a pas pour l'heure été implémenté. Néanmoins, l'association entre la source de puissance radiofréquence et la passerelle LoRa peut être vue comme un nœud communicant explosé et délocalisé et semble suffisant pour des premières expérimentations.



**Figure 4. Installation expérimentale en extérieur.**



**Figure 5. Courbes de charges/décharges du prototype pour différentes densités de puissance générées.**

En commandant la puissance émise -et donc reçue par la rectenna- on peut contrôler la période entre deux mesures et émissions consécutives. Les courbes de la Fig. 5 tendent à prouver qu'en maîtrisant la puissance transmise au nœud de mesure (exprimée au travers de la densité de puissance perçue par la rectenna ou de la puissance radiofréquence estimée à l'entrée du redresseur), la périodicité des mesures et de l'envoi des trames de données peut être contrôlée sans modifier ni la partie matérielle, ni la partie logicielle du prototype, juste par l'utilisation du système d'alimentation sans-fil. Cette période est comprise dans nos tests en extérieur entre environ 5 min 13 s pour une densité de puissance illuminant l'antenne de la rectenna estimée à 10,49  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  et 2 h 59 min pour une densité de puissance estimée à 1,12  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Avec une source émettant la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) maximale autorisée de 2 W ou +33 dBm [14], une densité de puissance de 1  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  peut être générée à 399 cm de la source, ce qui suffirait à faire fonctionner correctement le nœud de mesure présenté.

### 4. Discussions et perspectives

A date, le prototype n'a été testé que dans l'air ce qui ne permet pas de conclure quant à sa fonctionnalité dans le milieu cible qu'est le béton armé.

Ainsi, la poursuite du projet passera par la réalisation de prototypes optimisés, intégrés et compacts permettant des expérimentations dans une poutre en béton armé. La principale contrainte de volume est imposée par la rectenna qui doit fonctionner efficacement à 868 MHz ce qui correspond à une longueur d'onde d'environ 34 cm dans l'air, puis par le supercondensateur. En optimisant l'utilisation de l'énergie (en réduisant la consommation et les pertes des composants) la capacité de stockage nécessaire pourrait également être diminuée.

Le choix du capteur de température et d'humidité relative n'est pour l'heure pas optimal. En effet, le capteur choisi est actif et lent : il a besoin d'une alimentation électrique avec une tension comprise entre 3 V et 5 V durant au moins une seconde afin de réaliser une première mesure. Dans notre cas, cela représente 64 mJ, soit 30 % de l'énergie consommée et 26 % de l'énergie disponible et stockée dans le supercondensateur. L'utilisation d'un capteur passif

permettrait un grand gain en termes de consommation, donc de capacité de stockage d'énergie nécessaire et donc de volume du prototype. De même, d'autres paramètres mesurables semblent pertinents dans le cadre des applications visées (par exemple : les contraintes mécaniques, la corrosion, etc.).

Le choix de la technologie de communication sans-fil est également à étudier. En effet, la technologie LoRa et le protocole LoRaWAN permettent des communications unidirectionnelles longue distance mais consomment beaucoup plus que d'autres technologies permettant des communications moyenne distance comme le Bluetooth Low Energy (BLE) [15]. Néanmoins, le BLE usant de la bande ISM 2,45 GHz semble peu envisageable pour une utilisation dans du béton armé qui est fortement hydraté. De plus, il est essentiellement destiné à des communications bidirectionnelles. Enfin, la technologie RuBee [16] peut sembler une excellente solution pour des communications moyenne distance. En effet, elle se base sur une communication par champ magnétique à une fréquence de 131 kHz pour laquelle le béton et l'eau semblent transparents. Malheureusement, aucune solution commerciale n'est actuellement disponible.

Enfin, il est à noter que les limitations concernant le transfert d'énergie sans-fil en champ lointain sont principalement dues aux réglementations et non à la technologie elle-même. Ainsi, pour la bande ISM 868 MHz, la réglementation limite la puissance isotrope rayonnée équivalente à 2 W, soit +33 dBm [14].

## 5. Conclusion

Dans le cadre du projet McBIM, un premier prototype de nœud de mesure sans-fil et sans batterie alimenté par transfert d'énergie radiofréquence en champ lointain a été développé et validé expérimentalement dans l'air. Sa périodicité de mesures et de transmission des données est contrôlée par l'interface d'alimentation à distance. Le transfert d'énergie sans-fil use de la même bande de fréquences ISM que les communications LoRa, mais ne les altère pas grâce à l'utilisation de polarisations linéaires orthogonales. Les prochaines étapes du projet consisteront à l'intégration et la miniaturisation du prototype afin de réaliser des expérimentations dans une poutre en béton armée, le milieu cible qui est *a priori* très contraignant pour la propagation des ondes radiofréquences utilisées actuellement dans l'air à la fois pour l'alimentation et la communication sans-fil.

## Références

[1] McBIM Research Project. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne]. Disponible : [http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-fundedproject/?tx\\_lwmsuivibilan\\_pi2%5BCODE%5D=ANR-17-CE10-0014](http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anr-fundedproject/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-17-CE10-0014)

[2] S. Kubler, W. Derigent, and al., "Problem definition methodology for the 'communicating material' paradigm", IFAC Proc., vol.43, no.4, pp.198-203, 2010.

[3] G. Loubet, A. Takacs, and D. Dragomirescu, "Towards the Design of Wireless Communicating

Reinforced Concrete", IEEE Access Special Section on Wirelessly Powered Networks: Algorithms, Applications and Technologies, vol.6, pp.1-13, 2018.

[4] What is BIM. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.autodesk.com/solutions/bim>

[5] J. W. Matiko, N. J. Grabham, and al., "Review of the application of energy harvesting in buildings", Meas. Sci. Technol., vol.25, no.1, p.012002, 2014.

[6] L. Gallucci, C. Menna, and al., "An embedded wireless sensor network with wireless power transmission capability for the structural health monitoring of reinforced concrete structures", MDPI Sensors, vol.17, no.11, p.2566, 2017.

[7] LoRa Alliance Technical Committee. LoRaWAN 1.1 Specification, Beaverton, OR, USA, 2017. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne]. Disponible : [https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm\\_specification\\_-v1.1.pdf](https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm_specification_-v1.1.pdf) (accessed on 14 January 2019).

[8] A. Okba, A. Takacs, and H. Aubert, "Compact flat dipole rectenna for IoT applications", Prog. Electromagn. Res. C, vol.87, pp.39-49, 2018.

[9] Texas Instruments. bq25504 Ultra Low-Power Boost Converter With Battery Management for Energy Harvester Applications. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne]. Disponible : <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25504.pdf>

[10] AVX. BestCap® Ultra-low ESR High Power Pulse Supercapacitors. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne]. Disponible : <http://datasheets.avx.com/BestCap.pdf>

[11] STMicroelectronics. B-L072Z-LRWAN1. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne] Disponible : <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-l072z-lrwan1.html>

[12] Sparkfun. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module - DHT22. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne] Disponible : <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>

[13] The Things Network. Accédé le : 27 novembre 2018. [En ligne]. Disponible : <https://www.thethingsnetwork.org/>

[14] ETSI. Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD) intended for operation in the bands 865 MHz to 868 MHz and 915 MHz to 921 MHz; Guidelines for the installation and commissioning of Radio Frequency Identification (RFID) equipment at UHF, document ETSI TR 102 436, V2.1.1, 2014.

[15] IEEE 802.15.1 Working Group. IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements-Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Standard 802.15.1, 2005.

[16] IEEE 1902.1 Working Group. IEEE Standard for Long Wavelength Wireless Network Protocol, IEEE Standard 1902.1, 2009.