POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Système longue portée de communication bidirectionnelle à l'intérieur d'un bâtiment

BENOIT DESPATIS-PAQUETTE

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Août 2019

© Benoit Despatis-Paquette, 2019.

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Système longue portée de communication bidirectionnelle à l'intérieur d'un bâtiment

présenté par **Benoit DESPATIS-PAQUETTE**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Martin TRÉPANIER, président

Robert PELLERIN, membre et directeur de recherche

Louis RIVEST, membre et codirecteur de recherche

Jean-Samuel CHENARD, membre

DÉDICACE

À ma très chère épouse,

ton support dans cette aventure m'a permis de réaliser cet ouvrage;

et à mes enfants,

sans qui je n'aurais pas fait le saut dans cet inconnu.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont d'abord à mes directeurs de recherche qui m'ont accepté, malgré ce projet qui sort du cadre traditionnel du génie industriel. Votre appui a permis de définir et grandement améliorer la rédaction de ce mémoire.

J'aimerais aussi remercier les gens qui m'ont rendu des services, d'une aide cruciale, pour réaliser ce projet multidisciplinaire. D'abord, Grégory Clément, mon ancien collègue, qui a conçu avec moi les cartes électroniques et avec qui j'ai eu le plaisir d'apprendre le brasage. Ensuite, Harald Naumann pour son aide et son expertise avec les pertes de trajet; Alan Woolhouse du Weightless-SIG pour son ouverture à partager de l'information, Boris Lovošević pour sa branche MicroPython et Fabien Petitgrand de la compagnie Ubiik pour les conseils éclairés sur le fonctionnement interne de ses produits.

Finalement, je tiens à remercier notre partenaire industriel Sanuvox Technologies, ainsi que le programme Mitacs *Accelerate* sans lequel je n'aurais pu envisager de retourner aux études pour compléter une maîtrise recherche.

RÉSUMÉ

La conception d'un produit requiert bien souvent une équipe multidisciplinaire, d'autant plus si celui-ci est intelligent et connecté. Ce changement de perspective amène son lot de défis et force les entreprises manufacturières à évaluer l'ensemble des compétences requises à la réalisation d'un projet de connectivité. Pour notre partenaire industriel, son objectif est de surveiller, contrôler et optimiser la désinfection des salles de bain dans les hôpitaux afin de réduire les maladies nosocomiales. Il désire intégrer ces changements à son équipement actuel, bien que celui-ci est installé dans un environnement qu'il ne contrôle pas et que l'accès au réseau existant de l'hôpital lui soit interdit.

Dans le cadre de cette recherche, notre partenaire industriel veut concevoir un réseau parallèle qui prend la forme d'un système de communication bidirectionnelle. La revue de la littérature scientifique a permis d'exposer les limitations des technologies existantes et de choisir une technologie appropriée. Dans ce cas précis, les réseaux longue portée offrent la meilleure solution et c'est plus précisément la technologie Weightless qui répond aux critères d'évaluation. En revanche, l'utilisation de cette technologie fait apparaitre de nombreux défis pour cette organisation.

Ce projet de recherche cherche ainsi à évaluer la faisabilité technique et organisationnelle de concevoir un système longue portée au sein d'une équipe de recherche et développement d'une petite et moyenne entreprise manufacturière. L'approche utilisée comprend de développer un prototype et d'évaluer les compétences nécessaires dès le départ et celles acquises durant le projet pour surmonter les obstacles en cours de route. Cette évaluation a exposé les compétences inconnues en début de projet qui sont cruciales à son succès. Ce projet a permis de démontrer que ce système de communication longue portée requiert de multiples expertises dont celles du génie électrique, du génie informatique et logiciel.

De plus, l'absence de données expérimentales sur le Weightless nous a obligé de mener nos propres tests afin d'évaluer la faisabilité technique de cette technologie. Il a été ainsi impératif de déterminer la couverture de bâtiments de différentes tailles. Nos données expérimentales ont d'ailleurs permis d'évaluer la précision d'un modèle de simulation, le COST231, afin de déterminer le nombre de stations de base nécessaires pour l'implantation d'un système de communication dans un immeuble. Nos résultats empiriques ont d'ailleurs montré l'inexactitude du modèle COST231,

car celui-ci est pessimiste. Ce modèle permet cependant de donner un point de départ lors de l'implantation du système et du nombre maximal de stations de base pour couvrir le bâtiment sélectionné.

Finalement, le constat de l'auteur est qu'il faut une équipe multidisciplinaire pour rassembler toute l'expertise nécessaire à la réalisation d'un projet d'un produit intelligent connecté avec le Weightless. Plusieurs compétences n'ont pu être évaluées et identifiées, car ce projet de conception est incomplet. La version commercialisable du système de communication aurait dû comprendre l'application dorsale pour gérer les messages entrants et sortants, ainsi que les interfaces humain-machine pour les utilisateurs finaux. De plus, d'autres compétences seront nécessaires si notre partenaire industriel désire migrer l'application dorsale et ses interfaces vers l'infonuage. La faisabilité organisationnelle dans le cadre d'une petite et moyenne entreprise est limite, car la taille de l'équipe de recherche et développement nécessaire pour la réalisation d'un projet de ce type est considérable. La sous-traitance devient une option non négligeable. L'auteur propose de favoriser les profils multidisciplinaires généralistes au sein d'une petite entreprise, car ceux-ci peuvent agir comme chefs d'orchestre et diriger adéquatement les fournisseurs à proposer des solutions viables.

ABSTRACT

Product design now requires a multidisciplinary team, especially if the product is smart and connected. This shift in perspective brings its own share of challenges and forces manufacturing companies to assess the skill set required to complete a connectivity project. For our industrial partner, its goal is to monitor, control and optimize the disinfection of bathrooms in hospitals to reduce hospital-acquired infections. He wants to incorporate these features into his existing equipment, even though it is installed in an environment he does not control and access to the hospital's existing network is prohibited.

As part of this research, our industrial partner wants to design a parallel network that takes the form of a two-way communication system to monitor, control and optimize the disinfection of bathrooms in hospitals to reduce hospital-acquired infections. The review of the scientific literature exposes the limitations of existing technologies and aids in choosing the right technology. Wide-area networks offer the best solution and it is more precisely the Weightless technology that meets the evaluation criteria. On the other hand, the use of this technology raises many challenges for this organization.

This research project evaluates the technical and organizational feasibility of designing a wide-area system within the research and development team of a small to medium-company. The approach used involves developing a prototype and evaluating the skills that are needed from the outset and acquired in the course of overcoming challenges along the way. This evaluation exposed skills that were not identified at the beginning of the project and are crucial to its success. This wide-area communication system requires multiple forms of expertise, including electrical engineering, and computer and software engineering.

Also, the lack of experimental data with Weightless forces us to conduct our own tests to assess the technical feasibility of this technology. It was thus imperative to determine the coverage area of different size buildings. Our experimental data made it possible to evaluate the accuracy of the simulation model COST231 in order to determine the number of base stations required to implement a communication system in a building. Our empirical results have shown that the COST231 model is inaccurate because it is pessimistic. This model, however, provides a starting point when implementing the system and the maximum number of base stations to cover the selected building.

Finally, the author's conclusion is that it takes a multidisciplinary team to gather all the expertise needed to carry out a project for a smart connected product with Weightless. Several skills could not be assessed and identified because this design project is incomplete. The saleable version of the communication system should have included the back-end application to handle incoming and outgoing messages, as well as human-machine interfaces for end-users. In addition, other skills will be needed if our industrial partner wants to migrate the back-end application and its interfaces to a cloud. Organizational feasibility in a small and medium-sized enterprise is limited, as the size of the research and development team needed to complete a project of this type is considerable. Subcontracting becomes a valuable option. The author proposes to promote multi-disciplinary generalist profiles within a small company, as they can act as conductors and adequately direct suppliers to propose viable solutions.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VII

TABLE DES MATIÈRES IX

LISTE DES TABLEAUX XII

LISTE DES FIGURES XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XIV

CHAPITRE 1 INTRODUCTION 1

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE 4

2.1 Méthode d'identification de la littérature pertinente 4

2.2 Aperçu de la connectivité LPWAN 5

2.3 Spécification des technologies LPWAN 9

2.3.1 Sigfox 10

2.3.2 RPMA 11

2.3.3 LoRa et LoRaWAN 11

2.3.4 Spectre licencié cellulaire 12

2.3.5 Weightless 13

2.4 Revue des expérimentations LPWAN dans un bâtiment 15

2.4.1 Expérimentations avec le LoRa 15

2.4.2 Validité des hypothèses du LPWAN 18

2.5 Synthèse du domaine LPWAN en milieu intérieur 19

2.6 Conclusion 20

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE 22

3.1 Objectifs 22

3.2 Méthodologie 23

3.2.1 Identifier le matériel et les paramètres de configuration du Weightless 23

3.2.2 Interfacer avec la station de base 25

3.2.3 Déterminer les compétences pour intégrer le Weightless dans un produit 26

3.3 Conclusion 26

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: CONNECTIVITY VALIDATION FOR INDOOR IOT APPLICATIONS WITH WEIGHTLESS PROTOCOL 27

4.1 Introduction 27

4.2 Literature review 28

4.2.1 Low-Power Wide Area Network 28

4.2.2 Indoor Wide Area Network - Indoor LPWAN 29

4.2.3 Range 30

4.3 Scope 31

4.3.1 Choosing the protocol 31

4.4 Methodology 33

4.4.1 End Device Configuration 33

4.4.2 Base Station with Protocol Stack 34

4.4.3 Test Place: Commercial Building 35

4.4.4 Test Place: École Technologie Supérieure (ÉTS) 36

4.4.5 Test Place: Polytechnique Montreal 36

4.5 Results 36

4.5.1 Test Place: Commercial Building 36

4.5.2 Test Place: ÉTS 37

4.5.3 Test Place: Polytechnique Montreal 38

4.6 Conclusion 40

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE ET ÉVALUATION DES COMPÉTENCES POUR CONCEVOIR UN PRODUIT INTÉGRANT LE WEIGHTLESS 41

5.1 Définition de la compétence 41

5.2 Évaluation des compétences requises pour le projet 42

5.3 Acquisition de nouvelles compétences 44

5.4 Défis selon les étapes méthodologiques 45

5.4.1 Conception des prototypes de cartes électroniques 45

5.4.2 Programmation du script pour interfacer avec la station de base 47

5.5 Conclusion 50

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 53

RÉFÉRENCES 57

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Comparaison des différentes technologies LPWAN 20

Table 4.1 : Typical Weightless Downlink Performance 31

Table 4.2 : Typical Weightless Uplink Performance 31

Table 4.3 : Modulation and Coding Scheme 33

Table 4.4 : Test Locations 39

Tableau 5.1 : Taxinomie de Bloom révisée 42

Tableau 5.2 : Évaluation des compétences de l'équipe en génie électrique 43

Tableau 5.3 : Évaluation des compétences de l'équipe en génie informatique et logiciel 44

Tableau 5.4 : Listes des modules, des fonctions et des scripts MicroPython 47

Tableau 5.5 : Progression des compétences en génie électrique 50

Tableau 5.6 : Progression des compétences en génie informatique et logiciel 51

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Catégorisation du LPWAN 6

Figure 2.2 : Structure de la trame de message Weightless adaptée de (Weightless SIG, 2017) 14

Figure 2.3 : Cartographie des canaux adaptée de (Weightless SIG, 2017) 15

Figure 4.1 : HAT on an Evaluation Board 34

Figure 4.2 : MicroPython End Device (µP-ED) Front and Back 34

Figure 4.3 : Messages received from Base Station (Software: WireShark) 35

Figure 4.4 : Map View: Wings' (building) Identification 36

Figure 4.5 : Satellite View Commercial Building and Outdoor Range 37

Figure 4.6 : Measured RSSI Datapoints from Ubiik Software 37

Figure 4.7 : Testing location at ÉTS 38

Figure 4.8 : Wings and Floor ID at Polytechnique © Polytechnique Montréal, 2019 38

Figure 4.9 : Test locations at Polytechnique 39

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

µP-ED	MicroPython Evaluation Board
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ACK	Acknowledgement
ADR	Adaptive Data Rate
AES	Advanced Encryption Standard
AID	Association Identification
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AT	Attention (command)
bps	bits par secondes
BSN	Base Station Network
BW	Bandwidth
COST	European Cooperation in Science & Technology
CPS	Cyber Physical System
CR	Coding Rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
dB	Décibel
dBm	Décibel-milliwatts
eMTC	enhanced Machine Type Communication
ÉTS	École de technologie supérieure
EVB	Evaluation Board
FCC	Federal Communications Commission
FDA	Food and Drug Administration
FDMA	Frequency Division Multiple Access

FEC	Forward Error Correction
FM	Fade Margin
FOTA	Firmware Over The Air
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
HAT	Hardware Attached on Top
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
ISM	Industriel, scientifique et médical
JAR	Java Archive
LAN	Local Area Network
LE	Little Endian
LoRa	Long Range
LOS	Line of Sight
LPN	Lower Power Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
M2M	Machine to Machine
MAC	Couche de liaison
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NB-IoT	Narrowband - Internet of Things
OQPSK	Offset Quadrature Phase-Shift Keying
OSI	Open Systems Interconnection
PAN	Personal Area Network
PDR	Packet Delivery Ratio

PER	Packet Error Rate
PHY	Couche physique
PME	Petite et moyenne entreprise
QoS	Quality of Service
R&D	Recherche et développement
RED	Radio Equipment Directive
RSSI	Received Signal Strength Indication
SF	Spreading Factor
SIG	Special Interest Group
TDMA	Time Division Multiple Access
TI	Technologies de l'information
ToA	Time of Arrival, Time on Air
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
WAN	Wide Area Network
WEP	Wired Equivalent Privacy
WPA	Wi-Fi Protected Access
WSN	Wireless Sensors Network

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les dirigeants des compagnies manufacturières cherchent à extraire de leurs équipements diverses informations. La valeur de ces données varie selon les applications et les modèles d'affaires, toutefois leur intérêt est indéniable. Selon Porter et Heppelmann (2015), pour concevoir ces nouveaux produits, il faut comprendre leurs trois composantes, soit : le composant physique (mécanique, électrique), la partie intelligente (capteurs, microcontrôleur) et sa connectivité (antenne, protocole, réseau communiquant avec l'infonuagique). Cette dernière partie est complexe, car il existe une panoplie de technologies disponibles qui rendent le choix difficile. Dans leur autre article (Porter & Heppelmann, 2014), ils présentent la nouvelle architecture technologique de ces produits connectés intelligents, dont un bloc exclusif pour la connectivité. Selon eux, la conception des produits évolue d'une perspective axée sur l'ingénierie mécanique vers un système complexe multidisciplinaire. Ceci amène son lot de défis pour les entreprises manufacturières qui devront revoir la constitution de leur équipe de recherche et développement (R&D).

Cela est d'ailleurs le cas pour notre partenaire industriel qui a entrepris le développement d'un objet connecté pour un système de désinfection automatisé pour les salles de bain d'hôpitaux. Ces appareils servent à éviter la prolifération des infections telles que le C. difficile. Ces maladies nosocomiales sont très problématiques pour les gestionnaires d'hôpitaux et leurs administrateurs. Pour se prémunir d'éventuelles poursuites, et par souci de prévention, ces unités de désinfection automatisées permettent d'arrêter la reproduction des microorganismes au sein de la pièce en affectant directement leur ADN avec un rayonnement ultraviolet. Pour en assurer le bon fonctionnement, une application centralisée devra :

- collecter les registres des cycles d'opération;
- transmettre les paramètres de configuration des cycles;
- informer si une unité est défaillante; et
- avertir si celle-ci n'a pas été en fonction depuis un certain temps.

L'objectif de cette collecte de données est de garantir une désinfection adéquate de la pièce et une traçabilité en cas d'incidents. Il ne s'agit pas d'équipements critiques tels qu'un électrocardiogramme ou des sondes directement reliées à un patient. Ces systèmes ont leur propre

réseau de communication et leur centre d'intérêt au niveau de la recherche scientifique. Les équipements critiques sont régis par Santé Canada (au Canada) et la *Food and Drug Administration* (FDA) aux États-Unis. Il s'agit plutôt ici des équipements non critiques qui sont davantage tournés vers le bon fonctionnement du système hospitalier que directement vers un patient spécifique.

Pour réaliser un tel projet, il faut conceptualiser les blocs à développer pour créer l'architecture globale du système. C'est à travers ces expertises identifiées dans (Danjou et al., 2017) qu'il est possible d'énumérer les éléments liés à un projet d'un objet connecté (*smart device*) :

- système cyber-physique (*Cyber Physical System*, CPS);
- communication machine à machine (*Machine to Machine*, M2M);
- réseau de capteurs sans-fil (*Wireless Sensors Network*, WSN);
- infonuagique (*Cloud*); et
- cybersécurité.

Dans le contexte visé par cette recherche, les immeubles sont des lieux où l'analyse de la propagation des ondes est complexe, car celles-ci se propagent selon plusieurs trajets (*Multi-Path*). Ces trajets évoluent rapidement selon les réflexions, les absorptions et les interférences ambiantes. De plus, l'accès aux architectures de transmission de données en place (réseau LAN ou Wi-Fi) est interdit à notre partenaire industriel, comme ce fût le cas en 2017 lors de son projet pilote. Il est donc impératif de recourir à un réseau parallèle dédié, soit un réseau de capteurs sans fil. Toutefois, le choix de la technologie de radiofréquence n'est pas évident, car chacune possède, selon les applications, des avantages et des inconvénients pouvant affecter considérablement le succès du projet. De la même façon, la certification associée au pays vient complexifier ces requis et il faut l'évaluer selon les normes en vigueur au Canada. Un choix valable pour un pays donné n'est pas nécessairement la solution optimale pour un autre.

L'objectif de cette recherche est d'évaluer la faisabilité technique et organisationnelle de concevoir un système de communication bidirectionnelle pour les équipements connectés placés à l'intérieur d'un immeuble. Ce système sera dans un environnement non contrôlé sans accès au réseau filaire ou sans-fil existant. La portée sera un enjeu important dans l'élaboration du prototype et elle devra être validée de façon expérimentale pour confirmer la couverture adéquate du bâtiment visé.

La suite du mémoire est organisée comme suit. Premièrement, la revue de la littérature présente la stratégie de recherche, les technologies et leurs spécifications, ainsi que les données expérimentales

disponibles dans la littérature scientifique. Le chapitre 3 présente les objectifs spécifiques liés à ce projet et la méthodologie utilisée pour les réaliser. Ces objectifs proviennent des problématiques identifiées dans la revue de la littérature. Le chapitre 4 dévoile les résultats expérimentaux qui ont été publiés dans un article de conférence du *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Le chapitre 5 présente le processus d'évaluation des nouvelles compétences requises pour réaliser ces expérimentations et la manière dont ces compétences peuvent être intégrées au sein d'une équipe de R&D d'une petite et moyenne entreprise (PME). Finalement, le dernier chapitre conclut le mémoire en exposant les limites de ces travaux et en énonçant des perspectives de recherche.

CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE

La revue de la littérature permet de baliser le domaine étudié et fait état des connaissances disponibles. Ce chapitre permet ainsi d'établir la technologie appropriée pour réaliser l'objectif technique de la conception d'un prototype d'un système parallèle de connectivité au sein d'un immeuble. Ce chapitre débute sur la stratégie utilisée pour identifier la littérature pertinente. Ensuite, un aperçu des technologies de connectivité permet de présenter les caractéristiques, et dans la section suivante, leurs spécifications. Une revue des travaux scientifiques permet d'établir leurs réalisations. Une synthèse définit les aspects technologiques manquant pour répondre à l'objectif de cette recherche. La conclusion permet de donner une vue sommaire des résultats de la recherche dans la littérature grise et scientifique.

2.1 Méthode d'identification de la littérature pertinente

Cette section présente la stratégie employée pour identifier les articles scientifiques pertinents à la revue de la littérature. Cette section présente les premières étapes pour établir la stratégie de recherche, les mots clés utilisés et les sources des articles.

Avant de procéder à la recherche d'articles scientifique, une première analyse de la littérature est nécessaire. Ces lectures établissent une base sur le jargon du domaine principalement pour les objets connectés, leur structure et les modèles d'affaires. C'est de cette étape qu'émerge l'idée d'utiliser les technologies de réseaux longue portée à faible consommation d'énergie (*Low Power Wide-Area-Network* LPWAN). À travers ces documents issus du marketing (*White Papers*), ces pages web et ces blogues, plusieurs auteurs font des comparaisons entre les technologies.

Il y a cependant très peu d'articles couvrant le domaine du LPWAN au début 2017 (42 selon *Engineering Village Compendex* et 16 selon IEEE); et encore moins pour des applications intérieures (mots clés : *indoor LPWAN*). La majorité questionne la capacité des systèmes d'utiliser leur radio pour se positionner, ce qui n'est pas le but visé par le présent projet. En 2019, il y a plus de 700 articles qui utilisent le mot clé LPWAN. Les autres mots clés utilisés pour raffiner les recherches sont les noms des technologies, par exemple : LPWAN LoRa.

Les sources de recherche sont : IEEE, *Engineering Village* (*Compendex*) avec plusieurs articles de *Elsevier*, Google *Scholar* et des articles tirés du magazine *Sensors*. De plus, un blogue d'un auteur

du domaine a permis d'approfondir les connaissances dans la propagation des ondes et les calculs permettant une comparaison objective. Il s'agit de *IoT M2M Blog* de Harald Naumann, auteur du livre *IoT M2M Cookbook (Naumann, 2016)*.

Des alertes permettent de suivre l'avancement des recherches avec *Engineering Village* et Google *Scholar*. Elles sont configurées pour fournir par courriel, selon des mots clés, les liens vers les articles. L'apport de ces nouveaux articles permet de rester à jour dans le domaine du LPWAN.

2.2 Aperçu de la connectivité LPWAN

Cette partie présente la terminologie du domaine de la connectivité et plus précisément du LPWAN. Ceci permet de fournir les bases pour différencier les technologies en jeu.

Postscapes, en collaboration avec *Harbor Research*, représente les technologies de connectivité dans l'univers de l'Internet des objets par une œuvre infographique (Postscape & Harbor Research, 2018). Celle-ci se veut une représentation plus complète de l'histoire des objets connectés. D'après leur travail, les systèmes intelligents et les objets connectés sont une combinaison de capteurs et d'actionneurs, de la connectivité et des personnes et des processus qui les accompagnent. Les technologies de connectivité sont regroupées selon la taille du réseau allant du réseau personnel (PAN) au réseau étendu (WAN).

Pour leur part (Ali et al., 2017) décrivent les différentes technologies de communication de machine à machine (M2M), propriétaires et libres d'accès. La catégorisation de ces technologies LPWAN dépend du spectre des radiofréquences, à savoir s'il est licencié ou à l'intérieur de la bande industrielle, scientifique et médicale (ISM) selon la figure 2.1. Le modèle d'affaires sert aussi de différenciateur, car le Sigfox, bien qu'à l'intérieur de l'ISM, fonctionne comme un opérateur d'une bande licencié. Toutes ces technologies fournissent un moyen de communication d'une faible quantité d'informations (bande passante réduite) avec une portée similaire aux antennes cellulaires. Ils utilisent pour la majorité une fréquence sous 1 GHz appelé sub-GHz. Les fréquences permises sont le 915 MHz en Amérique et 868 MHz en Europe. C'est pourquoi la majorité des recherches effectuées sont sur le 868 MHz, car elles se sont déroulées en Europe dans l'environnement le plus mature pour le LPWAN.

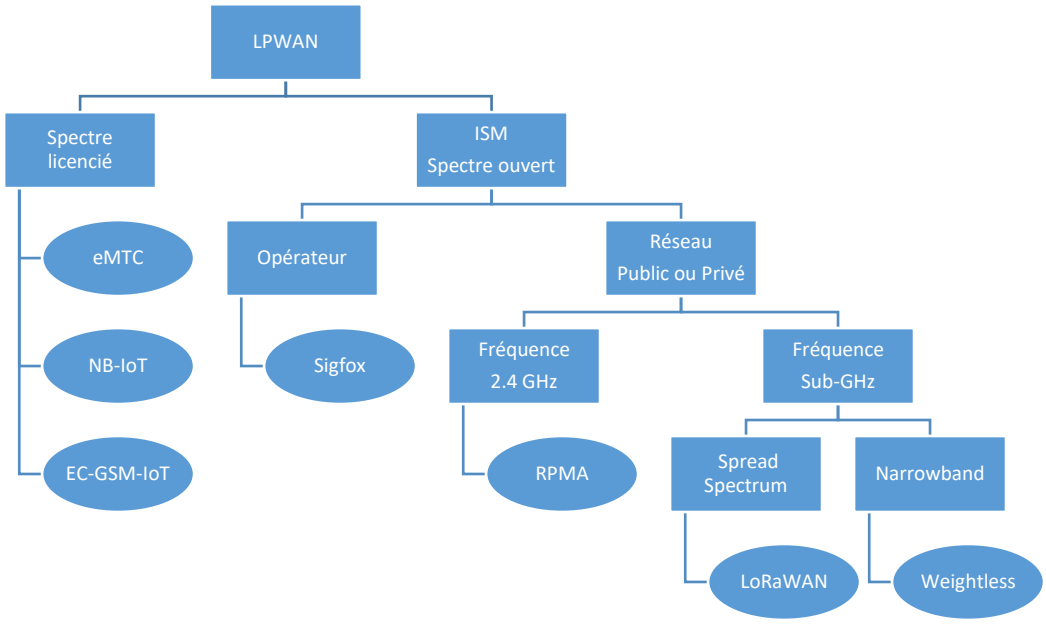

Figure 2.1 : Catégorisation du LPWAN

Les technologies sans fil utilisent les ondes électromagnétiques pour transmettre l'information à plusieurs périphériques. Les trois types d'architecture sont : centralisé, décentralisé et maillé. Un réseau centralisé serait équivalent à celui d'une passerelle Wi-Fi où chaque appareil communique directement avec le point d'accès central. C'est le modèle principalement utilisé par les technologies LPWAN. Il est nommé : topologie en étoile. Le réseau décentralisé serait représenté par la connexion à l'Internet et ses serveurs. Il peut symboliser le réseau d'amenée (*backhaul network*). Pour les réseaux maillés, aussi nommé *Mesh Network*, ils permettent de relayer l'information par plusieurs sauts et dans certains cas évaluent le chemin le plus rapide ou le moins énergivore. Ils peuvent se réparer en redirigeant les messages vers d'autres bornes en modifiant leur registre de routes. Le Zigbee ou le Bluetooth *Mesh* serait des exemples de ce type de réseau.

Les réseaux de capteurs sans fil présentent des défis similaires à ceux du filaire. Ils doivent établir comment accéder au canal de communication sans interférer dans les autres messages. Ces techniques d'accès multiples peuvent être basées sur la réservation (réglementée) ou aléatoire. Cette dernière catégorie est séparée entre l'aléatoire pur ou avec réservation. L'utilisation de méthode aléatoire pure comme ALOHA peut être la cause de nombreuses collisions lorsque le réseau approche de la saturation. Il y aura alors perte de messages. L'accès aléatoire est plus efficace énergétiquement si la qualité de service (QoS) n'est pas élevée. Pour une QoS élevée, il

faut prendre en compte l'énergie utilisée pour émettre à nouveau et risquer de saturer encore plus le réseau, ce qui augmente les collisions.

Les architectures des différents LPWAN sont similaires bien que la terminologie des composants internes puisse différer selon la compagnie. D'après Sanchez-Iborra et Cano (2016), l'information des capteurs est transmise par un nœud périphérique (*edge node*) à une station de base. Celle-ci la transmet au réseau d'amenée (*backhaul network*) pour être dirigée vers l'infonuagique et ses serveurs. De là, l'information est accessible par les utilisateurs finaux. La connectivité LPWAN se situe principalement entre les unités en périphérie et la station de base. Dans certaines applications, le lien au réseau d'amenée est assuré par une liaison cellulaire au lieu d'un lien filaire vers Internet. Selon eux, l'avantage d'une telle structure est son coût énergétique et économique en plus de conserver une portée similaire au réseau cellulaire et satellitaire.

Selon Ayele et al. (2017), plusieurs caractéristiques définissent la propagation d'un signal. Pour comprendre ces éléments, il faut se référer aux équations de propagation des ondes et du bilan de liaison qui représente la qualité de la liaison du récepteur en décibel. La fréquence utilisée par une technologie LPWAN est directement liée avec sa longueur d'onde :

$$c = \lambda \times f \tag{2.1}$$

c : vitesse de la lumière, λ : longueur d'onde (m.), f : fréquence (Hz)

L'équation suivante permet de déterminer la puissance reçue en décibel-milliwatts (dBm) pour valider qu'elle est supérieure à la sensibilité du module radio, sans quoi le message ne pourra être décodé :

$$P_r[\text{dBm}] = P_t[\text{dBm}] - 20 \log_{10}(d) - 20 \log_{10}(4\pi/\lambda) \tag{2.2}$$

Pt : puissance d'émission, Pr : puissance de réception, d : distance, λ : longueur d'onde,

Ces deux équations nous confirment que l'utilisation d'une fréquence plus basse permet de parcourir plus de distance pour la même puissance reçue. De plus, la perte de puissance en visibilité directe, appelée perte d'évanouissement, peut être calculée en décibel (dB) par :

$$L_p(\text{dB}) = -147 + 20\times\log_{10}d + 20\times\log_{10}f \tag{2.3}$$

L_p : Perte d'évanouissement, d : distance (m.), f : fréquence

Pour établir le bilan de liaison dans un contexte de trajets multiples, il faut ajouter des pertes additionnelles[1], ainsi que le gain des antennes avec l'équation :

$$P_r = P_t + (G_t + G_r) - (L_p + L_c + \psi_{dB} + \psi^r_{dB}) \tag{2.4}$$

G_t, G_r : gain antenne d'émission et de réception, L_p : Perte due à l'évanouissement,

L_c : Perte due aux conducteurs, ψ_{dB} : Perte due aux obstacles (*Shadowing*),

ψ^r_{dB} : Perte due à l'évanouissement de Rayleigh

Plusieurs autres termes doivent être définis pour comprendre les limitations des technologies LPWAN, soit :

- la bande passante;
- la puissance d'émission et le bilan de liaison;
- le facteur d'étalement; et
- les méthodes de reconstruction des messages.

La bande passante (*Bandwidth*, BW) est l'espace réservé dans le spectre radiofréquence pour moduler le signal afin de fournir un débit de données. La bande est qualifiée d'étroite (*Narrowband*) lorsqu'elle est de 1 MHz et moins. Par exemple, le Wi-Fi avec sa bande de 20 MHz peut transmettre beaucoup plus d'informations que le Bluetooth avec une bande de 1 MHz.

La puissance d'émission maximale est régie par les instances gouvernementales et elle est un facteur important sur l'intensité du signal reçu. Selon la distance à couvrir et la QoS désirée, il est possible de réduire cette puissance afin d'augmenter la durée de vie de la batterie. Une réduction de la moitié de la puissance reçue peut engendrer un gain de 4 fois l'autonomie initiale, car l'énergie est dissipée au carré de la distance (cas d'une antenne omnidirectionnelle). C'est pourquoi il faut optimiser le bilan de liaison. Les modules radio peuvent, lors de la réception d'un signal, prendre une mesure de puissance. Il s'agit de l'indication de l'intensité du signal reçu (*Received Signal Strength Indication,* RSSI). Le RSSI donne une indication sur la force du message, en dBm, et elle peut être comparée à sa sensibilité interne pour déterminer sa marge d'évanouissement. Le RSSI

---

[1] D'autres pertes peuvent être dues à la forme d'émission des antennes, la courbure de la terre, la présence d'objets dans la zone fresnel et la désadaptation de polarisation des antennes.

varie entre -30 dBm à -120 dBm. Certains modules radio peuvent descendre à près de -140 dBm en 4G LTE et LPWAN.

Pour augmenter la sensibilité du récepteur, il existe une méthode de décodage, appelée facteur d'étalement (*Spreading Factor* SF), qui représente un symbole par plusieurs modulations radio. Cette technique est utilisée dans les sonars et les radars. L'objectif est de diminuer l'évanouissement dû à la distance et réduire le nombre de paquets erronés (*Packet Error Rate* PER).

L'ajout de données redondantes permet de faciliter la reconstruction du message avec un algorithme de correction tel que l'autocorrection des erreurs (*Forward Error Correction* FEC). Ceci réduit le pourcentage de paquets erronés en reconstruisant le message avec les morceaux reçus. Toutefois, l'augmentation du *Coding Rate* (CR) vient avec des désavantages tels que : l'augmentation du temps d'émission (*Time on Air*, *Time of Arrival*, ToA) et la réduction du taux d'émission (débit). L'augmentation du temps radio aura un impact direct sur l'autonomie du système si celui-ci est muni d'une source fixe d'énergie, car l'émission d'ondes est la fonction la plus énergivore d'un module radio. Il faut aussi distinguer un message non reçu d'un message irréparable. Dans le premier cas, le récepteur n'est pas au courant de la présence d'un message, alors que dans le deuxième, avec un principe de diversité (plusieurs récepteurs du même message), le message peut être reconstruit selon l'algorithme utilisé.

2.3 Spécification des technologies LPWAN

Les technologies faisant partie du LPWAN sont :

- Sigfox ;
- RPMA ;
- LoRa et LoRaWAN ;
- spectre licencié cellulaire ; et
- Weightless.

Chaque technologie identifiée est évaluée selon les critères suivants : la portée et la pénétration des ondes, le nombre de connexions concurrentes, la réglementation et sa disponibilité au Canada, sa capacité bidirectionnelle et ses limitations d'envois des messages, et sa latence évaluée sur l'envoi de messages successifs. Plusieurs de ces critères sont basés sur l'évaluation de la couche matérielle

du modèle *Open Systems Interconnection* (OSI) qui comprend la couche physique (PHY), la couche de liaison (MAC) et la couche du réseau.

2.3.1 Sigfox

Selon Ray (2017), le premier système LPWAN est celui de Sigfox. Sa technologie est basée sur une communication à bande ultra étroite (100 Hz). Ceci permet d'envoyer une très faible quantité d'informations (charge utile, *payload*, de 12 bytes), provenant par exemple d'un capteur, à une longue distance de l'ordre du kilomètre avec une quantité d'énergie minime (puissance de 50 µW). Le message est envoyé à trois reprises sur des canaux et des intervalles de temps différents pour favoriser un gain en diversité sur la fréquence et le temps, car il n'existe pas d'autres mécanismes pour réduire les interférences avec le Sigfox. Ceci permet d'avoir un système de communication autonome à batterie avec une longévité de plusieurs années, voir une décennie selon Lavric et al. (2019). De plus, l'utilisation d'une bande si courte permet une meilleure efficacité. Le coût du module radio est considérablement réduit puisque la transmission se fait à des vitesses de l'ordre de la centaine de bits par secondes (bps). En comparaison, le Wi-Fi est de l'ordre de plusieurs millions de bits par secondes (Mbps). Le modèle d'affaires que la compagnie Sigfox a décidé d'implanter est celui de l'opérateur. L'entreprise est propriétaire de son réseau et est responsable de sa maintenance. Les frais d'accès au réseau sont déterminés par la quantité d'informations (liaison montante et descendante) ainsi que le nombre d'équipements connectés par le client. L'avantage d'un tel modèle est que n'importe où dans le monde les serveurs sont sur la même architecture. Toutefois, la réglementation de chaque pays force l'utilisation d'un spectre radio différent. Par exemple, en Europe, les modules radiofréquences utilisent le 868 MHz, alors qu'aux États-Unis, ils sont sur le 915 MHz. Cela limite l'interopérabilité lors du déplacement de l'équipement hors de son pays principal. L'autre contrainte importante est la quantité de messages qui peuvent être transmis par chaque radio. Le maximum permis est de 140 messages par jour en liaison montante et 4 messages (8 bytes maximum) par jour en liaison descendante. Il s'agit encore à ce jour d'une limitation basée sur un accord informel (*Gentleman's Agreement*).

Finalement, la pénétration à l'intérieur des bâtiments est limitée par la proximité d'une tour opérée par la compagnie Sigfox ou l'une de ses filiales. Pour évaluer la performance de communication, une étude du site visé doit être effectuée en plus d'obtenir les certifications radio pour l'appareil

connecté. La compagnie Sigfox Canada a débuté ses activités au printemps 2019 (Sigfox Canada, 2019) et elle a permis de rendre cette technologie disponible au Canada de façon expérimentale.

2.3.2 RPMA

La technologie de la compagnie Ingenu est propriétaire et intitulée *Random Phase Multiple Access* (RPMA). Sanchez-Iborra et Cano (2016) expliquent que le RPMA utilise une topologie en étoile sur la fréquence 2.4 GHz et que cette fréquence a un impact négatif sur la pénétration pour la connectivité à l'intérieur des bâtiments et sur l'efficacité énergétique. Finnegan et Brown (2018) énoncent que la modulation se fait selon un spectre étalé (*spread spectrum*) pour réduire l'impact des interférences et du bruit ambiant. L'utilisation de la bande ISM à 2.4 GHz permet d'éviter en Europe le facteur d'utilisation (*duty cycle*) qui limite l'envoi de messages successifs. Les régulations gouvernementales sont plus souples pour la puissance d'émission ce qui augmente le bilan de liaison. Une technique de débit de données adaptatif (*adaptive data rate*, ADR) permet d'optimiser le facteur d'étalement en fonction de la puissance du signal reçu en liaison descendante. Tous les messages sont cryptés et une variante de l'algorithme de Viterbi permet de garantir l'intégrité du message même avec un taux d'erreur de paquet de données (PER) de 50%.

2.3.3 LoRa et LoRaWAN

La modulation LoRa, pour *Long Range*, utilise un préambule pour baliser et se synchroniser. Il s'agit d'un long et constant gazouillis (*chirp*), soit une augmentation répétée de la fréquence. Il est confirmé par un message similaire, mais inversé. La force de ce type de modulation est sa capacité à décoder plusieurs messages simultanément. Cette méthode est basée sur l'orthogonalité du signal grâce à des SF différents.

Le LoRa comprend trois composants : la couche physique, brevetée par la compagnie Semtech, la couche de liaison et la couche réseau. Le LoRaWAN, quant à lui, est le protocole libre (*Open Source*) de la couche de liaison. Il permet de transporter le message jusqu'au serveur principal qui décodera le message. Contrairement au LoRa qui peut être décodé et utilisé comme réseau maillé, le LoRaWAN demande une architecture plus complexe et dépend de serveurs pour éliminer les redondances et identifier la provenance des messages. Ce n'est pas nécessairement la passerelle (*gateway*) la plus proche qui recevra le message. De plus, dans un environnement dense, il se peut que plusieurs passerelles le reçoivent. Selon Song et al. (2017), ceci permettra jusqu'à une certaine

limite d'avoir un gain de diversité et de décoder le message malgré la perte ou l'endommagement de certains paquets. Il existe, selon le réseau utilisé, un concept de *Duty Cycle* qui limite l'émission des équipements connectés. Ce facteur est une limite considérable dans plusieurs modèles d'affaires en Europe, là où la densité force cette réglementation stricte pour éviter les interférences radio. Au Canada et aux États-Unis, la réglementation force à 400 ms la durée maximale d'émission. Ceci limite l'utilisation d'un facteur d'étalement (SF) de 7 à 10. Seulement les protocoles comme le LoRaWAN qui utilisent une technique d'accès multiple aléatoire comme le ALOHA sont affectés par cette contrainte. D'après Petajajarvi et al. (2017), il existe trois classes d'équipement : A, B et C. Les unités de classe A doivent prévoir deux fenêtres pour la réception d'un message en liaison descendante . Les appareils de classe B augmentent le nombre de fenêtres pour la communication provenant de la station de base, alors que ceux de la classe C permettent de recevoir les messages en tout temps à l'exception du moment où ils transmettent. La puissance d'émission est limitée à 14 dBm en Europe et 30 dBm en Amérique du Nord.

2.3.4 Spectre licencié cellulaire

Depuis la version 13 du 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) sur le réseau LTE, de nouvelles spécifications sont officielles. L'objectif de la création du eMTC (*enhanced Machine Type Communication*), anciennement connu sous LTE Cat M1, est de réduire le coût et la consommation énergétique. Selon Yang et al. (2017), la bande passante est de 1.08MHz. Elle doit être compatible avec le standard LTE. Le canal dédié pour l'accès aléatoire est fixé à cette bande et il est non-configurable. Ceci permet un haut débit dans le LPWAN de 1 Mbps dans chacune des directions. Un autre aspect à l'avantage de cette technologie est la couverture de 155 dB permettant une meilleure pénétration des ondes (ex : les égouts). Toutefois, cette augmentation de couverture de 15 dB vient avec une réduction du débit de données grâce à des répétitions, similaire au standard longue portée du *Bluetooth Low Energy* (BLE).

Avec la venue du 5G dans la prochaine décennie, plusieurs technologies compétitionnent pour l'espace créé afin de connecter plus d'appareils avec des débits toujours plus grands. Le *Narrowband IoT* (NB-IoT) délaisse les contraintes du LTE pour une bande passante de 180 kHz et une couverture de 164 dB. Le débit résultant de ces changements est réduit à 50 kbps. Selon Raza et al. (2017), seulement la moitié des messages peuvent être confirmés en raison de la capacité limitée de la liaison descendante. Ceci peut, dans certaines applications, être un ajout de complexité

et une consommation additionnelle due à la gestion de cet aspect par le module radio ou le microcontrôleur.

Le troisième, moins connu, est le EC-GSM-IoT. Il est présentement à l'essai dans différents pays où la couverture 2G prédomine la 4G. Puisqu'il s'agit d'une mise à jour logicielle des stations cellulaires, son adoption est dépendante de la décision du pays de conserver son réseau 2G déjà en place. Son utilisation commerciale n'est pas encore officielle et selon l'association GSMA des essais à grande échelle était prévue en 2018 avec Orange (GSMA).

Aucune de ces trois technologies n'était disponible en 2017 au Canada. En 2019, seulement le eMTC est actuellement couvert par les gros joueurs de l'industrie canadienne. De plus, en 2017, le coût de connectivité des modules 3G représente un montant non négligeable (50$ par module radio, mensualité de 5-10$/mois/appareil) comparativement à l'offre américaine du NB-IoT à 5$ par module et 6$ par année/appareil pour la connectivité.

2.3.5 Weightless

Le Weightless est basé sur la spécification du Weightless-SIG. Ce groupe propose une approche libre (*Open Source*) axée sur l'efficacité du spectre radio et les principes de modulation de l'industrie cellulaire. Contrairement au LoRa, le Weightless peut être configuré avec un SF de 1, 4 ou 8. Sa bande passante est de 12.5, 50 ou 100 kHz pour un débit de 200 bps à 100 kbps. Les trois facteurs différenciant le Weightless sont la possibilité de la confirmation (*Acknowledgement* ACK) de chaque message en liaison descendante, l'envoi simultané (*Multicast*) de messages en liaison descendante et la mise à jour du micrologiciel par liaison radio (FOTA). Les modules disponibles commercialement sont sur la fréquence 868 MHz et 915 MHz, bien que le Weightless soit conçu pour fonctionner aussi sur 138 MHz, 433 MHz, 470 MHz, 780 MHz et 923 MHz. De plus, il est possible de configurer l'autocorrection des erreurs (FEC). Pour l'aspect sécurité, toutes les communications sont cryptées avec l'algorithme *Advanced Encryption Standard* (AES-128/256). La couche physique utilise le *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK) (similaire au 2G) et le *Offset Quadrature Phase-Shift Keying* (OQPSK). Ces informations sont tirées de l'article (Sanchez-Iborra & Cano, 2016).

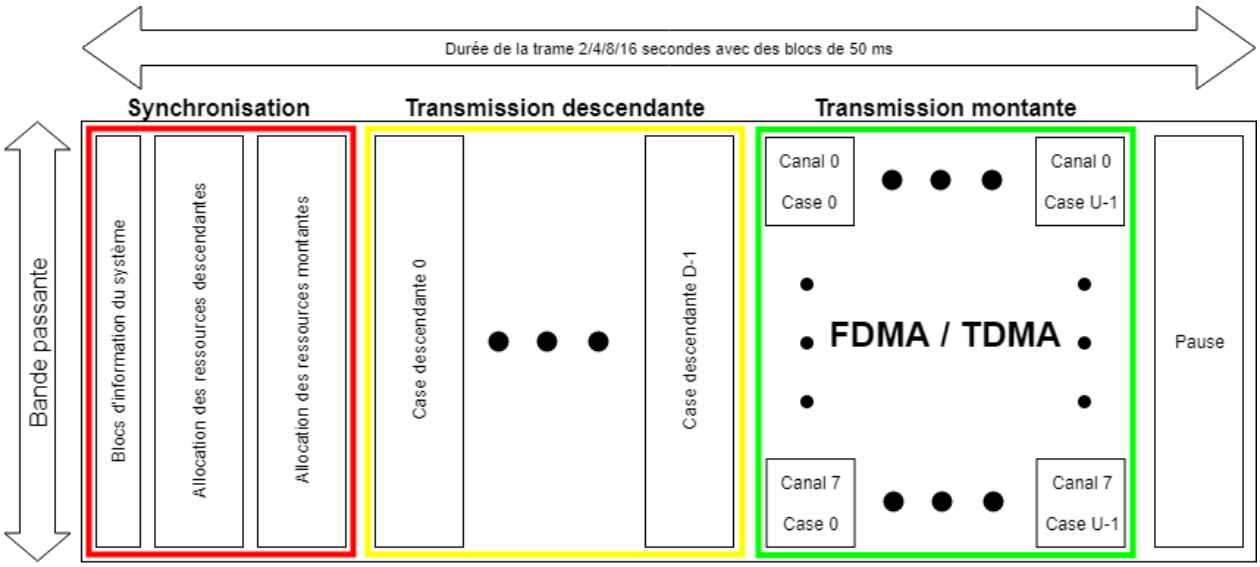

Figure 2.2 : Structure de la trame de message Weightless adaptée de (Weightless SIG, 2017)

Le Weightless se base sur un réseau synchrone dont la structure de la trame est représentée à la Figure 2.2. La synchronisation (en rouge) se fait au début de la trame afin d'allouer les ressources montantes et descendantes. En plus d'utiliser l'accès multiple par répartition temporelle (TDMA de 50 ms représenté par les blocs gris), le Weightless utilise l'accès multiple par répartition de fréquence (FDMA) dès la fin de la transmission descendante (en jaune). La station de base Weightless diffuse à intervalles réguliers selon la configuration établie de la durée de sa trame qui peut être de 2, 4, 8 ou 16 secondes (Weightless SIG, 2017).

L'efficacité spectrale du Weightless vient de son allocation de la bande de 500 kHz avec 40 canaux disponibles. En comparaison, pour le LoRa, il n'y a que 4 canaux disponibles pour la même bande complète, d'où l'efficacité du spectre radio. De plus, l'utilisation de SF plus bas permet d'augmenter le nombre de symboles reçus, car ils ne sont pas dupliqués. Selon Petitgrand (2017), dans un scénario où le débit par équipement est de 200 bytes aux 15 minutes, le nombre maximal de modules par station de base est de 52 pour le LoRa et 2769 pour le Weightless. Ces valeurs ont été calculées en fonction d'un PER de 0.1%.

Une autre particularité du Weightless est sa gestion au niveau de la couche réseau. Si le message est adressé à un seul appareil (*Unicast*), ou à un groupe (*Multicast*), ou s'il doit être confirmé (ACK), il ne va pas emprunter le même chemin. Dans le cas d'un message montant confirmé, il passe par AD (*Acknowledged Data*) et UAD (*Unicast Acknowledged Data*) (chemin rouge de la

Figure 2.3). Un message non confirmé envoyé à un groupe passe par MD (*Multicast Data*) et MUD (*Multicast Unacknowledged Data*) (chemin vert de la Figure 2.3).

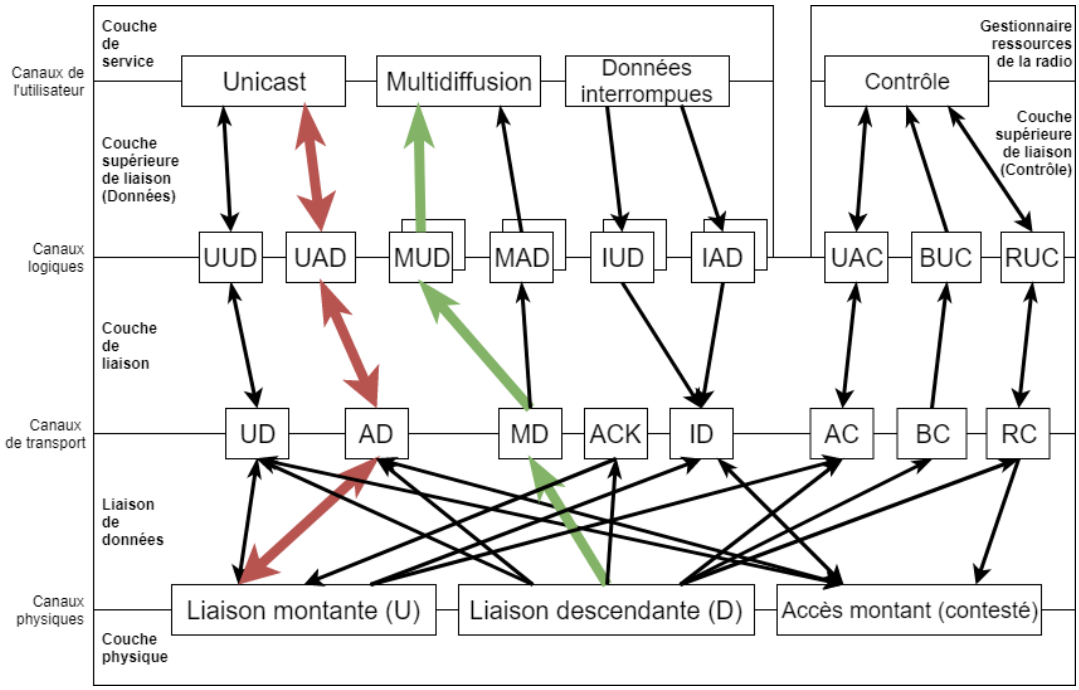

Figure 2.3 : Cartographie des canaux adaptée de (Weightless SIG, 2017)

Selon la taille du bâtiment, le réseau de capteurs peut être constitué d'une seule station de base ou d'un réseau de stations de base (BSN). Advenant un BSN, il faut un serveur (*back-end*) pour décoder les messages. Le Weightless utilise la station de base pour décoder et rediriger le message sur l'infonuage s'il est disponible. Le coût est moindre si l'édifice ne requiert pas un BSN puisque les coûts inhérents au serveur ne sont pas comptabilisés et les données sont centralisées à un seul endroit : la station de base.

2.4 Revue des expérimentations LPWAN dans un bâtiment

Cette revue se veut une liste des différentes expérimentations scientifiques effectuées avec les technologies retenues à la section précédente.

2.4.1 Expérimentations avec le LoRa

Plusieurs auteurs expérimentent avec le LoRa dans des bâtiments universitaires qui peuvent aussi représenter le type d'immeuble rencontré en milieu hospitalier. Il s'agit tous les deux de bâtiments en béton armé, composés de plusieurs étages et même souvent de plusieurs ailes. Ils couvrent des

superficies de plusieurs milliers de mètres carrés. Ils contiennent une population importante d'humains, contrairement à un entrepôt.

Selon Ayele et al. (2017), la présence d'humains peut considérablement affecter la propagation des ondes, car leurs corps sont des masses d'eau qui absorbent les ondes. Les auteurs procèdent à des tests sur l'impact du SF et du CR sur le PER. L'augmentation du SF doit réduire le PER. Toutefois, à leur étonnement, ceci n'est pas observé aux 4 emplacements. Selon leur analyse, l'environnement intérieur avec des personnes qui se déplacent peut affecter rapidement le trajet du signal. Les meilleurs résultats proviennent du SF 7, soit le plus petit conforme à la spécification interne du LoRa. Leur hypothèse est que, lors du préambule, un mécanisme de synchronisation s'effectue avec un ajustement du gain du préamplificateur du récepteur. L'étendue dynamique (*dynamic range*) du préamplificateur est relativement petite en comparaison avec la variation du trajet du signal. Dès que la force du signal reçu se trouve à l'extérieur de l'étendue dynamique, le reste ou une partie du paquet est perdu. Si la perte est importante, le FEC ne peut corriger la situation.

Wendt et al. (2015) testent l'utilisation du LoRa avec une fréquence de 2.45GHz. Pour la propagation des ondes à l'intérieur, ils obtiennent les résultats désirés en utilisant un SF 12. Toutefois, en respectant les règles du Canada (SF10), le nombre de paquets reçus est nul dès que le signal rencontre 2 murs.

Gregora et al. (2016) évaluent la portée en milieu intérieur. En l'absence d'un protocole de test défini, ils émettent un signal à 7 positions par étage et enregistrent le signal reçu à deux positions, soit sur le toit et au sous-sol. L'emplacement de la station de base a un impact sur la couverture. Celle-ci est plus grande lorsque le récepteur est sur le toit. Les paramètres utilisés ne sont pas compatibles avec la réglementation canadienne, car ils utilisent la fréquence 868 MHz et un SF12. De plus, l'absence de dimensions du bâtiment réduit la précision et l'utilisabilité de cette recherche.

Neumann et al. (2016) démontrent les limitations dans les envois répétitifs selon la contrainte européenne du *Duty Cycle*. Cette réglementation ne s'applique pas au Canada. Pour ce qui est de la portée, ils enregistrent 25% de paquets perdus avec un SF élevé à proximité de la station de base pour atteindre 0% dans le sous-sol. Ce comportement n'était pas prévu et est contre intuitif. En contrepartie, l'utilisation d'un SF bas (bande de 125 kHz) augmente le nombre de paquets perdus au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la station de base pour atteindre 27% au sous-sol.

Petajajarvi et al. (2016) procèdent à une étude de faisabilité de la mobilité d'un émetteur (brassard attaché à un humain). Les résultats démontrent que le LoRa peut être utilisé pour des applications fixes (96.7% de paquets reçus) et mobile (95% de paquets reçus). Toutefois, il existait une zone morte (absence de couverture). Le module récepteur est fixé à 24 m au coin sud-ouest du campus. Pour couvrir les pièces problématiques (distance 195m±15m) un SF 12 a été utilisé. Une de leurs observations est que la collecte de données est fastidieuse, car il faut attendre longtemps entre l'envoi successif de messages (dû au *Duty Cycle*).

Buyukakkaslar et al. (2017) évaluent la pertinence d'utiliser une technologie LPWAN pour transmettre des données pour une application de connectivité d'équipements médicaux. Ils valident la durée de transmission du message selon les différents SF avec la bande passante la plus étroite permise par le LoRaWAN (125 kHz). Ils confirment que le temps de transmission est trop long pour des applications où la latence est critique. Cette recherche confirme les calculs théoriques du temps d'émission selon la charge et le SF.

La recherche de Haxhibeqiri et al. (2018) se déroule dans un environnement industriel similaire à un entrepôt. La surface est de 34 000 m² et ils ont pu couvrir la totalité du bâtiment avec un SF 7. L'absence de murs à l'intérieur du bâtiment est un facteur clé du succès. Ils confirment que l'utilisation du SF 7 est bénéfique pour l'extensibilité du système bien que la couverture en périphérie extérieure du bâtiment soit affectée.

Une analyse sur l'absence du *Duty Cycle* avec le 915 MHz est fournie par Alsohaily et al. (2018) de l'Université de Toronto. Pour atteindre la couverture maximale sans compromettre la capacité du système, il faut une distribution non uniforme des appareils communiquant en liaison montante. Il faudrait 76% des équipements à l'intérieur d'un cercle (épicentre sur la station de base) couvrant le premier 26% de la zone. De plus, à la limite de la zone, il ne faut pas dépasser 1% de la capacité totale du système. Ils conviennent qu'il existe un compromis à faire entre couverture et capacité.

L'article de l'Université de Calgary de Yousuf et al. (2018) est le seul qui a évalué la portée du LoRaWAN en milieu intérieur avec le 915 MHz et la puissance maximale d'émission de 30 dBm (contrairement à 14 dBm en Europe). Toutefois, les dimensions du bâtiment de 7 étages ne sont pas fournies. Ils utilisent un SF10. Ils représentent le ratio de paquets reçus (*Packet Delivery Ratio* PDR) par une cartographie de densité (*heat map*) de l'intérieur du bâtiment *Information and Communications Technology*. Celui-ci est couvert en quasi-totalité à l'exception du premier étage

où le PDR est inférieur à 60%. Les auteurs n'optimisent pas l'emplacement de la passerelle (au 7e étage) ce qui permet d'augmenter la couverture intérieure. De plus, ils ne testent pas le PDR selon les différents SF.

2.4.2 Validité des hypothèses du LPWAN

Selon les départements marketing associés aux entreprises fournissant des technologies LPWAN, une station de base peut couvrir 5 à 10 km et communiquer avec plusieurs dizaines de milliers de nœuds périphériques. Cette hypothèse est étudiée par plusieurs scientifiques.

Selon Lavric et al. (2019), le Sigfox ne peut communiquer avec plus de 1100 modules radio s'il veut maintenir un PER de moins de 10%. Il faut pour ce faire accéder aux 1920 canaux disponibles. Avec 360 canaux disponibles, la limite est de 100 appareils qui communiquent de façon simultanée.

Selon les articles (Oliveira et al., 2017; Petitgrand, 2017), la couverture maximale en milieu urbain en Europe est de 1500 m à 2000 m, et de 3800 m à 5000 m en Amérique du Nord. Rappelons que pour couvrir deux fois la distance (de 5 à 10) sans obstacle ni absorption autre que l'air, il faut quatre fois plus d'énergie.

D'après les données fournies par Mekki et al. (2019), le NB-IoT possède la plus courte portée. Toutefois, le nombre important de stations de base qui peuvent être mises à jour permet de couvrir rapidement, à faible coût les endroits déjà desservis par la technologie précédente (2G/LTE). C'est pourquoi Lauridsen et al. (2017) affirment que le NB-IoT fournie la meilleure couverture en plus de la meilleure capacité au niveau du nombre de connexion. Donc, malgré une portée accrue, le Sigfox ne donne pas la couverture optimale, car il est limité par le nombre d'appareils liés à sa station.

Haxhibeqiri et al. (2017) montrent que le rythme auquel les collisions augmentent (et que les paquets sont retardés) est exponentiel sur le LoRa. Dans les deux configurations testées par les chercheurs, le nombre total de paquets perdus atteint 50 % autour de 100 nœuds périphériques. Ils constatent que c'est loin des attentes qui se comptent en milliers.

Adelantado et al. (2017) démontre qu'après 500 nœuds sur leur réseau d'expérimentation LoRa, il y a une perte d'efficacité accrue pour chaque nœud ajouté. À 500 messages de 10 bytes envoyés par heure par chacun des 250 nœuds, seulement 200 seront reçus, soit 40%. À 500 nœuds, le nombre reçu est inférieur à 150, soit 30%. Le LoRaWAN pour compenser ces collisions enverra le

même message à plusieurs reprises ce qui a pour effet de réduire la capacité réelle du réseau et d'augmenter inutilement le nombre de collisions.

2.5 Synthèse du domaine LPWAN en milieu intérieur

Selon les données recueillies sur chaque technologie, il est possible d'écarter celles qui ne répondent pas aux critères d'évaluation.

Tout d'abord, le Sigfox est écarté parce qu'il n'est pas disponible au Canada en 2017. De plus, le nombre de messages en liaison descendante serait un inconvénient notable en plus de son incapacité à mettre à jour le micrologiciel. Ceci est particulièrement important pour pallier les failles de sécurité lorsqu'une brèche est découverte. Notons le cas en 2018 avec le standard Bluetooth (brèche CVE-2018-5383) ou avec Intel (*Spectre* et *Meltdown*).

Le RPMA est écarté puisque la fréquence utilisée limite considérablement sa portée à l'intérieur d'un bâtiment en comparaison avec les technologies utilisant la bande sub-GHz. Même le LoRa à 2.45GHz a démontré ce fait.

Le LoRa et le LoRaWAN sont les technologies les plus reconnues, matures dans le LPWAN. Toutefois, l'absence de la capacité de mettre à jour le micrologiciel et l'utilisation d'un protocole basé sur le ALOHA (LoRaWAN) compromet son utilisation. De plus, le nombre de paquets perdus autour de 250-500 nœuds, soit le champ d'application de cette recherche, n'est pas acceptable et une forme de confirmation (ACK) augmente encore plus les collisions. La station de base ne peut recevoir les messages lorsqu'elle émet.

Pour les technologies cellulaires, seulement le 2G, 3G, 4G, LTE et LTE Advanced sont disponibles lors de l'évaluation en 2017. Il y avait des percées en NB-IoT et en eMTC, mais ces deux technologies ne sont pas disponibles au Canada au moment de l'analyse. Même chose pour le Bluetooth, les nouvelles puces électroniques, les micrologiciels et les kits de développement ne sont pas disponibles en ce moment pour offrir le standard maillé (*Bluetooth Mesh*) ou longue portée.

Finalement, l'absence de données expérimentales ne permet pas d'évaluer le Weightless qui possède les caractéristiques recherchées. Il offre la possibilité de confirmer par un ACK chaque transmission. Ceci augmente le trafic descendant et augmente grandement la qualité de service du réseau, car seuls les messages non reçus seront émis à nouveau. De plus, sa trame synchrone

utilisant le FDMA et le TDMA permet d'éviter les collisions. La fonction *Multicast* permet de mettre à jour les paramètres d'un groupe sans envoyer chaque message individuellement et ceci peut être utilisé pour mettre à jour le micrologiciel (FOTA).

Les articles identifiés sont principalement destinés aux ingénieurs en propagation d'ondes et non à toutes les autres expertises nécessaires pour l'intégration à l'intérieur des produits et des systèmes. Aucune liste des expertises interne en PME n'est présentée. De plus, la majorité des recherches présentées ont utilisé de l'équipement prêt à être utilisé (*off-the-shelf*). Ils n'ont pas conçu leur propre circuit ou intégrer l'émetteur dans un produit ou un système complet.

2.6 Conclusion

La revue de littérature a permis d'obtenir les données expérimentales pour évaluer les technologies disponibles et adéquates pour répondre à la faisabilité technique de concevoir un système de communication longue portée dans un environnement intérieur. D'après celle-ci, la technologie la plus prometteuse pour atteindre l'objectif de cette recherche est le Weightless. Il se démarque par son réseau synchrone qui prévient les collisions, son équilibre en liaison montante et descendante, ainsi que les autres critères d'évaluation du Tableau 2.1. Il possède toutes les caractéristiques recherchées. Toutefois, il y a un vide dans la littérature sur ses performances réelles, autant en intérieur qu'à l'extérieur qu'avec les fréquences multiples sur lesquelles le Weightless peut être utilisé.

Tableau 2.1 : Comparaison des différentes technologies LPWAN

Technologies	**Portée**	**Pénétration des murs**	**# Liaisons concurrentes**	**Disponible au Canada**	**FOTA**
Sigfox	++++	Bonne	100-1000	Non	Non
RPMA	++	Faible	Inconnu	Réseau Privé	Inconnu
LoRa, LoRaWAN	+++	Bonne	100-500	Oui	En développement
Cellulaire eMTC, NB-IoT, EC-GSM-IoT	+	Bonne	> 1000	Non	Oui pour eMTC
Weightless	++	Bonne	> 1000	Réseau Privé	Disponible

Pour évaluer la faisabilité technique du Weightless de couvrir un bâtiment, il faut définir au chapitre suivant les objectifs spécifiques, ainsi que la méthodologie pour les atteindre. Une expérimentation de terrain permet de résoudre l'absence de données expérimentales sur les performances du Weightless.

CHAPITRE 3 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Ce chapitre définit, en premier, les objectifs qui découlent de la problématique d'évaluer la faisabilité technique et organisationnelle de la conception d'un système de communication au sein de l'équipe de R&D d'une PME. Le contexte hospitalier, dans lequel le système du partenaire de recherche opère, ne permet pas d'avoir accès à un réseau filaire ou sans-fil existant. La création d'un réseau parallèle est proposée, mais la technologie pour le réaliser est à confirmer par l'expérimentation scientifique. Un des aspects importants du projet est sa capacité de communication bidirectionnelle afin de garantir l'opérabilité selon les critères de surveillance et de contrôle. Ce projet est réalisé en partenariat avec une entreprise manufacturière de Montréal et son équipe de R&D.

La méthodologie de recherche permet ensuite d'identifier les étapes pour évaluer la faisabilité et analyser les aspects techniques et organisationnels pour atteindre l'objectif général du projet. Elle donne aussi des explications sur les choix effectués. Ce chapitre est donc composé de deux sections : objectifs et méthodologie.

3.1 Objectifs

Comme mentionné dans l'introduction, l'objectif général de ce mémoire est d'évaluer la faisabilité technique et organisationnelle de la conception, au sein de l'équipe de R&D du partenaire industriel, d'un système de communication bidirectionnelle pour les équipements connectés placés à l'intérieur d'un immeuble. La technologie sélectionnée est le Weightless, car il est le seul à répondre aux critères d'évaluation présentés dans la revue de la littérature. Celle-ci révèle qu'il n'y a pas de travaux faisant état de la propagation des ondes dans les bâtiments pour le Weightless à 915 MHz. Sans cette information, il n'est pas possible de déterminer le nombre de stations de base ni les performances radio attendues.

Ainsi, le premier objectif spécifique pour l'aspect technique est d'identifier le matériel et les paramètres de configuration du Weightless qui permettent de couvrir différentes tailles de bâtiments. L'évaluation de la portée du signal est essentielle pour déterminer la couverture réelle d'une station de base Weightless. Un modèle de simulation est évalué pour permettre de déterminer le nombre de stations de base sans effectuer une étude du site (*site survey*).

Le deuxième objectif spécifique, encore pour l'aspect technique, est de définir les éléments constituant la transmission d'un message du nœud périphérique jusqu'au serveur d'application pour informer l'utilisateur final. Cet objectif permet de compléter la boucle de communication d'un système incorporant le Weightless. La station de base décode les messages et le manufacturier de cet équipement, la compagnie Ubiik, ne permet pas d'ajouter des scripts ou des applications à l'intérieur de celle-ci. Elle est sécurisée et inaccessible par les utilisateurs. C'est pourquoi il faut ajouter l'objectif de déterminer les blocs de script nécessaires pour interfacer un serveur d'applications. Cette étape est nécessaire pour accomplir l'intégration dans le produit du partenaire et valider sa faisabilité technique.

Pour l'aspect organisationnel, le troisième objectif spécifique évalue au sein de l'équipe de R&D du partenaire de recherche (une PME de Montréal) les compétences nécessaires pour intégrer le Weightless aux équipements de désinfection. Cette évaluation est dérivée des défis rencontrés au cours du projet et des nouvelles compétences acquises pour les relever. Il permet d'évaluer la faisabilité organisationnelle d'intégrer une technologie de connectivité à l'intérieur du processus de conception de produits.

3.2 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs de cette recherche, la méthode proposée repose sur le développement d'un prototype du système. Cette expérimentation de terrain permet de tester sa faisabilité technique tout en évaluant les compétences acquises durant le processus par l'équipe de R&D du partenaire industriel. Ceci permet de valider l'aspect technique et organisationnel de l'objectif général. Cette section explique comment l'expérimentation permet d'atteindre ces objectifs et elle est divisée pour chaque méthode spécifique.

3.2.1 Identifier le matériel et les paramètres de configuration du Weightless

Les articles consultés lors de la revue de la littérature modélisent les blocs d'architecture pour concevoir un système basé sur le Weightless. Cette recherche identifie le matériel (*hardware*) basé sur le protocole de communication et de modulation permettant de couvrir différentes tailles de bâtiments similaires à des hôpitaux. Ceci comprend un nœud périphérique (comprenant le module radio), une station de base, des antennes et un ordinateur faisant office de serveur.

D'après les travaux de Gregora et al. (2016), l'emplacement de la station de base a un impact majeur sur les résultats. La première expérimentation doit déterminer l'emplacement optimal de la station de base Weightless. Un protocole de test pour assurer la répétabilité des résultats est capital. Chaque message envoyé doit être converti en caractères hexadécimaux. Il est retourné au nœud périphérique pour valider la communication dans les deux sens (montante et descendante). Une vérification du statut de la synchronisation avec la station de base est effectuée après chaque envoi. En cas de perte de synchronisation, une nouvelle commande de connexion est envoyée par le module radio.

Pour effectuer les tests de portée, le nécessaire de départ (starter kit, Ubiik, 2018a) de la compagnie Ubiik est composé d'une station de base, de deux cartes électroniques d'évaluation (EVB) sur le 915 MHz et de leur antenne respective. Pour réduire l'impact du corps humain à proximité de l'émetteur, il faut concevoir deux autres cartes électroniques. La première est une carte de type HAT (*Hardware Attached on Top*) et l'autre est une conception miniaturisée du premier assemblage (EVB + HAT). Les deux types de cartes comprennent le module radio Ubiik et le microcontrôleur Espressif permettant de communiquer par Wi-Fi avec le protocole Telnet à un client par un ordinateur portatif ou une application mobile.

Les bâtiments sélectionnés pour cette recherche sont un immeuble constitué de bureaux locatifs, le pavillon principal de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) et celui de Polytechnique Montréal. L'immeuble locatif fait 75 m de long et 6 étages de haut avec un stationnement intérieur d'un étage et demi. Le pavillon de l'ÉTS fait 75 m par 125 m Le nombre d'étages est difficile à déterminer due à la présence des mezzanines entre les étages. L'accès pour les tests se limite du premier sous-sol au 3e étage. Le pavillon principal de Polytechnique Montréal fait 175 m par 110 m sur 6 étages. Il n'y a aucun test de couverture du sous-sol, car il n'est pas accessible au public. L'avantage d'avoir ces trois tests dans des édifices différents est qu'il sera possible de généraliser les résultats, ainsi qu'avoir une évaluation de trois tailles d'immeubles.

L'utilisation d'un modèle de simulation permet d'évaluer les plans d'un immeuble sans avoir à effectuer de multiples visites pour établir le nombre de stations de base. En collectant la puissance reçue durant les tests, les résultats sont comparés à un modèle de simulation et permettent d'établir son niveau de précision. L'entreprise peut passer d'une méthode essai-erreur vers celle d'une

prédiction par un modèle de simulation pour établir le nombre de stations de base nécessaire pour couvrir un bâtiment.

D'après Hosseinzadeh et al. (2017), le meilleur modèle pour la propagation des ondes qui couvrent le spectre du 868 MHz et du 915 MHz est le modèle multi-murs (*Multi-wall Model*) aussi référé au sein de la littérature scientifique par COST231. Celui-ci est basé sur le modèle Hata, qui lui est une itération du modèle Okumura. L'organisme responsable de l'élaboration de ces modèles en Europe est *l'European Cooperation in Science & Technology* (COST). D'après Andrade et Hoefel (2010), le COST231 n'est pas adapté aux environnements industriels, car il est basé sur une atténuation par le nombre de murs. Toutefois, dans le cas précis de cette recherche, les immeubles visés sont principalement constitués de plusieurs pièces avec beaucoup de murs qui les séparent. Une université possède aussi ces caractéristiques à l'exception des amphithéâtres ou des agoras. Flattie (2012) prédit que le COST231 est pessimiste par rapport aux atténuations des murs. Il propose un modèle plus près de la réalité. Toutefois, les mesures sont prises avec une fréquence de 1800 MHz. Cet aspect doit être confirmé lors des comparaisons entre les données expérimentales et celles du modèle. L'objectif de cette comparaison est de déterminer la couverture d'une station de base et le nombre requis pour couvrir un bâtiment.

3.2.2 Interfacer avec la station de base

Le choix du Weightless ajoute un objectif secondaire à cette recherche, car pour compléter la boucle de communication jusqu'au serveur d'applications, il faut transiter par une station de base. Cette station ne conserve pas les messages et si elle n'est pas connectée au Ubiik Cloud ou un serveur local autorisé, ces messages seront perdus. Pour accéder à ses fonctions internes avec un serveur local, il faut programmer un script avec la pile de protocoles de communication (*Interface Protocol Stack*). Pour ce faire, il faut ouvrir une interface de connexion (*socket*) sécurisée par un algorithme AES-128. Le langage privilégié est le Java puisque la compagnie Ubiik possède déjà un exemple de code. Toutefois, le langage de prédilection de l'auteur est le Python puisqu'il a complété deux cours (270 heures) au *Massachusetts Institute of Technology* (MITx) et qu'il a très peu d'expérience avec le Java. Selon la documentation d'Ubiik, il faut réussir à crypter un *challenge* pour obtenir les autorisations nécessaires pour utiliser les autres fonctions de communication de la station de base. En cas d'échec, l'interface se ferme. Le format des messages

et du *Interface Protocol Stack* sont fournis dans le document de spécifications de la compagnie Ubiik (Ubiik, 2018b).

3.2.3 Déterminer les compétences pour intégrer le Weightless dans un produit

Ce troisième objectif est dérivé des défis relevés durant le projet par l'équipe de R&D de l'entreprise partenaire pour atteindre les deux objectifs spécifiques précédents. Pour cela, l'équipe doit évaluer ses compétences initiales et déterminer les nouvelles connaissances à acquérir, ainsi que leurs sources, pour réaliser le projet. Ces nouvelles connaissances, avec l'expérience acquise durant ce projet, peuvent devenir des compétences. Finalement, la conclusion du chapitre 5 permet de discuter des défis rencontrés, de la méthode pour les surmonter, ainsi que du constat de l'investissement et des efforts pour intégrer le Weightless dans son produit.

3.3 Conclusion

L'objectif général est d'évaluer la faisabilité technique et organisationnelle d'intégrer le Weightless au sein d'un produit connecté comme système de communication bidirectionnelle à l'intérieur d'un immeuble. Ces aspects sont abordés par une expérimentation de terrain ayant comme objectif la conception d'un prototype du système de communication. Les compétences acquises pour sa réalisation sont évaluées en fonction de l'initial pour déterminer la faisabilité organisationnelle. Pour atteindre ces objectifs, les résultats sont présentés en deux temps, soit le chapitre 4 pour l'aspect technique avec un article du IEEE, et le chapitre 5 traite de la faisabilité organisationnelle.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: CONNECTIVITY VALIDATION FOR INDOOR IOT APPLICATIONS WITH WEIGHTLESS PROTOCOL

IEEE IoTI4 2019: International Workshop on IoT Applications and Industry 4.0

Authors: Benoit Despatis-Paquette, Louis Rivest and Robert Pellerin

Abstract - Non-critical medical equipment manufacturers are looking for alternative ways of collecting data as IT departments in hospitals will not provide access to their local network. Weightless could solve this problem with a low-cost alternative, a new wireless architecture with long-range capabilities indoors. This paper presents experimental data on the use of the Weightless Protocol inside buildings. Results on the actual indoor range and a comparison with predicted indoor propagation model are presented and discussed.

Keywords - Medical equipment, Internet of Things, Indoor, LPWAN, Weightless, Range, Sub-GHz, COST231.

4.1 Introduction

The IEEE has defined the term Internet of Things (IoT) as a network of interconnecting sensors so that each element is intelligent, programmable and able to interact with a person and his or her environment (Geng, 2017). For companies that provide equipment and services to their customers, IoT has become a priority, as the economic value of having remote access to equipment data is well established (Porter & Heppelmann, 2015). However, implementation of these communication systems can be a challenge.

In the case of medical equipment manufacturers, IoT may be difficult to achieve, as non-critical equipment does not have access to the existing IT infrastructure, as internal Wi-Fi is prohibited to external companies for logistical and security reasons. Without access to the Internet through a network infrastructure on site, companies seeking to obtain data on the use of their equipment must turn to another solution. Cellular connectivity may be considered, but it can only be applied to high-value equipment that is able to justify a significant monthly payment over the life of the equipment, as well as a significant initial cost for the electronic communication module.

Low-Power Network (LPN) technologies, such as LoRa (Long Range) Modulation, could solve the range problem and reduce the number of gateways, while complying with the strict rules of

electromagnetic interference (Federal Communications Commission FCC, Innovation, Science and Economic Development Canada ISED formerly Industry Canada IC, CE, Radio Equipment Directive RED). LPN is also named Low-Power Wide-Area Network (LPWAN). The Indoor LPWAN technology provides an alternative solution aiming to create an additional network operating at a different frequency. It is designed to transmit at a low bit rate over long distance in the most efficient way to reduce power consumption. Buyukakkaslar et al. (2017) confirmed the relevance of using LPWAN technology to transmit data for medical equipment.

So far, most research on LPWAN technologies was done with the use of the LoRaWAN protocol. Weightless was addressed in the literature as an alternative protocol, but no articles have published experimental results. LoRaWAN was mainly tested for scalability and data collisions. In the case of Weightless, such tests are irrelevant, as the protocol forces a synchronization before each end device talks. Weightless combines Time Division Multiple Access (TDMA) and Frequency Division Multiple Access (FDMA).

This paper aims at filling this gap by presenting experimental results obtained when testing the Weightless protocol inside buildings. The remainder of the paper is structured as follows. First, a literature review on LPWAN with similar tests with LoRaWAN and on Indoor Propagation is presented. The project scope and methodology are then described in sections 4.3 and 4.4. The paper ends with a presentation of our results and concluding remarks.

4.2 Literature review

4.2.1 Low-Power Wide Area Network

In 2009, with the cost reduction of radio frequency equipment, Sigfox developed the first LPWA network (Ray, 2017). Since then, several companies have created their own signal modulation technology to penetrate this market such as Semtech (LoRa), Ubiik (Weightless), and Ingenu (RPMA) (Raza et al., 2017). Technologies associated with Wide Area Network (WAN) enable communication at distances of several kilometers (LOS - Line of Sight). Researchers have simulated applications in an urban, rural and indoor contexts (Gregora et al., 2016; Petajajarvi et al., 2016). Energy conservation for self-powered/autonomous sensors is a dissociating factor in comparison with cellular technologies or Wi-Fi, which only have a few hours or days of autonomy. LPWAN sensors, meanwhile, are designed for a lifetime of one (1) to ten (10) years with a single

battery. All of these networks operate in a star-shaped architecture like a wireless router (Wi-Fi). The main advantage is the extended coverage that allows a reduction in the number of base stations (equivalent to a router). The other important advantage is the number of machines that can be connected to a station. The limitation of Wi-Fi in the industry is vague, but the 802.11 protocol allows 2007 identifiers AID (Association ID). However, if security is enabled the number of keys is only 50 or 64 which becomes a bottleneck for the number of connected machines (Moore, 2015). LPWAN systems can accept several thousand or even tens of thousands of connections (Petitgrand, 2017).

LoRa modulation has been evaluated in several research papers and the LoRaWAN protocol was tested for its Quality of Service (Petajajarvi et al., 2016). The Quality of Service (QoS) was judged satisfactory with a result of 96%. However, there was only one emitter that did not consider the losses due to collisions during a simultaneous transmission.

4.2.2 Indoor Wide Area Network - Indoor LPWAN

In the category of LPWAN systems, a subcategory is observed; it is defined by its integration with the buildings. The goal is to develop a wireless infrastructure dedicated to sensors within buildings and see its viability in comparison with other networks, such as Wi-Fi. Gregora et al. (2016) have made it possible to map the signal strength in a reinforced concrete building, while Ayele et al. (2017) demonstrated signal quality according to several parameters including Spreading Factor (SF). This spreading coefficient is the ratio between the number of modulation (chip) per second and the number of symbols that are encoded across the message.

$$\text{SF} = \textit{chip rate / symbol rate} \tag{4.1}$$

In the case of LoRa, SF can take the value of 7 to 12. Which implies 128 chips to send a single binary symbol if SF=7. Considering only the message (payload), with SF=12, the transmission would be 32 times longer as shown in the following table (Symbol time, time by symbol). For Canada and the USA, Time on Air (ToA) should not exceed 400 ms. That is why SF=11 or 12 are not allowed. In Europe, they have other types of limitations like Duty Cycle. This will force the device to wait a certain time according to a percentage. For example, a Duty Cycle of 0.1% will require an end device that sends a 400 ms message to wait 400 sec before sending another one.

4.2.3 Range

The capability of a transmitter and a receiver to communicate is based under a known formula. The Fade Margin (FM) needs to be positive.

$$FM = P_r - Receiver\ Sensitivity \tag{4.2}$$

To establish the power received (P_r) in a free space with an omnidirectional antenna:

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] - 20\ log10(d) - 20\ log10(4\pi/\lambda) \tag{4.3}$$

where P_t is the transmitter power, d is the distance between the receiver and transmitter and λ is the wavelength.

In real life applications, more factors are considered in a link budget calculation:

$$P_r = P_t + (G_t + G_r) - (L_p + L_c + \psi dB + \psi^r dB) \tag{4.4}$$

where such as the gain from both antenna (G_t: Transmitter Antenna Gain, G_r: Receiver Antenna Gain), Path Attenuation (L_p), Conductor Loss (L_c), Shadowing (ψdB) and Rayleigh Fading (ψ^rdB).

Path loss, also named Path Attenuation, can be calculated with:

$$L_p(dB) = -147 + 20log_{10}d + 20log_{10}f \tag{4.5}$$

where f is the frequency (Hz) and d is the distance (m).

Authors conclude:

> In relation to the models that consider the wall attenuation, like COST 231 and average walls model, the path loss prediction is overestimated because industrial environments are usually large rooms where walls are not the predominant obstacles, as the industrial machines and stored materials are. (Andrade & Hoefel, 2010, p. 5)

As per this conclusion, we will estimate attenuation using European COST231, a Multi-Wall Indoor Propagation Model, because we have a lot of rooms, walls and floors inside an hospital compared to the flat, open space of a manufacturing plant. This model is applicable for 800 to 1900 MHz (Davis, 1997):

$$L = L_{fs} + 37 + 3.4\ k_{w1} + 6.9\ k_{w2} + 18.3\ n^{((n+2)/(n+1)-0.46)} \tag{4.6}$$

where L is the attenuation in dB, L_{fs} is the free space loss in dB, n is the number of traversed floors (reinforced concrete, but not thicker than 30 cm), k_{w1} is the number of light internal walls (e.g. plasterboard), windows etc, k_{w2} is the number of concrete or brick internal walls.

According to Weightless Specifications (Weightless SIG, 2017), the receiver sensitivity of the base station (Downlink) and the end module (Uplink) are shown in the tables below.

Table 4.1 : Typical Weightless Downlink Performance

Modulation Scheme	**SF**	**PHY Data rate (kpbs)**	**Rx sensitivity (dBm)**
GMSK	1	100	-106.0
GMSK	1	50.0	-113.5
OQPSK	4	12.5	-119.5
OQPSK	8	6.25	-122.5

Table 4.2 : Typical Weightless Uplink Performance

Modulation Scheme	**SF**	**100 kHz**		**12.5 kHz**	
		PHY Data rate kpbs	**Rx sensitivity (dBm)**	**PHY Data rate kpbs**	**Rx sensitivity (dBm)**
GMSK	1	100	-109.0	10.0	-119.0
GMSK	1	50.0	-116.5	5.00	-126.5
OQPSK	4	12.5	-122.5	1.25	-132.5
OQPSK	8	6.25	-125.5	0.625	-135.5

4.3 Scope

4.3.1 Choosing the protocol

With the known problems of cybersecurity, no equipment is indefinitely immune to intrusion. For the same reason that Wired Equivalent Privacy (WEP) encryption was superseded by Wi-Fi Protected Access (WPA) in 2003, no security protocol is guaranteed to be secured in the future. To address this situation, a mechanism needs to be put in place to update its firmware. All objects that are not able to have a new firmware are no longer secure. Firmware includes an ordered set of instructions and stored data in a manner that is functionally independent of the main memory. By changing the firmware, companies can address security breaches and add features to their equipment, like it was done in 2018 to correct CVE-2018-5383 for Bluetooth by Apple and major manufacturers. In the field of LPWAN, we are speaking of Over-The-Air Firmware (FOTA) when

this operation is done through the air (wirelessly). The base station sends a binary file to an end-device so it can reprogram itself. Without human intervention on site, the cost to update the system is then greatly reduced. Another feature is Multicast. A base station can create a group of end-devices that will be receiving the same message all at once. It can be used also to transfer a new firmware. This option can reduce a base station ToA if it needs to send the same message to a lot of devices.

As part of the project, LPWAN technology was selected to address the issue of connectivity for medical equipment in hospitals. Its validity was evaluated by a test in an equivalent environment because the hospital initially selected did not install the proposed equipment. To be considered acceptable for the analysis, the proposed technology had to be compared to the Wi-Fi network:

- simplify the architecture by reducing the number of base stations (routers);
- increase the range of communication of each receiver;
- increase capacity (250+);
- allow two-way communication with message confirmation;
- offer a multicast service; and
- enable remote firmware update (FOTA).

The initial choice of protocol (LoRaWAN) could not fully achieve these objectives. Consequently, another protocol was evaluated. Most initial objectives and assumptions were related to the ALOHA random communication protocol. Weightless protocol does not suffer from this problem thanks to its better bandwidth allocation, base station synchronization, and balanced bidirectional communication.

Without any experimental data in the scientific literature, it was difficult to evaluate the expected results and coverage. This research was designed to collect data samples to validate the indoor range with Weightless Protocol. With commercially available equipment, only four Modulation and Coding Scheme (MCS) can be chosen at 100 kHz; with narrowband (12.5 kHz) that makes 4 more MCS, for a total of 8 (MCS: 0, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11).

Table 4.3 : Modulation and Coding Scheme

Modulation Scheme	SF	Bandwidth (kHz)	Weightless (MCS)	Ubiik Config Flag	MCS
GMSK	1	100	0	0	0
OQPSK	8	100	2	0	2
GMSK	1	12.5	3	1	0
OQPSK	8	12.5	5	1	2
GMSK + FEC	1	100	6	0	6
OQPSK + FEC	8	100	8	0	8
GMSK + FEC	1	12.5	9	1	6
OQPSK + FEC	8	12.5	11	1	8

where GMSK is Gaussian Minimum Shift Keying, OQPSK is Offset Quadrature Phase-Shift Keying, FEC is Forward Error Correction and Flag is for narrowband options.

4.4 Methodology

Experimentation in different situations was needed to understand range behavior, expected results, improved radio equipment and how to properly change internal parameters. Multi-sites were selected to evaluate the effect of a building shape.

4.4.1 End Device Configuration

Initial tests were done with an evaluation kit connected with a USB to a computer. To reduce the impact of a body near the emitter, an autonomous circuit board was designed; two variants were manufactured: HAT (Hardware Attached on Top) + Evaluation Board (EVB) (Figure 4.1) and a fully integrated version (µP-ED for MicroPython End Device, Figure 4.2). Both versions were controlled by an embedded MicroPython Interpreter communicating on UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) by AT Command (ATtention). To send a message to its Base Station, a TELNET session was providing the capability to send UART Write and Receive commands. TELNET is a protocol that provides permission to log on to a remote device on the same network. One challenge was the end of line character (\r ASCII 13) used because it was not fully integrated into the receiver script. To solve this, a function was programmed to replace it by (\r\n ASCII 13 and 10) at the end. ASCII stands for American Standard Code for Information Interchange. It is an encoding standard for characters.

Figure 4.1 : HAT on an Evaluation Board

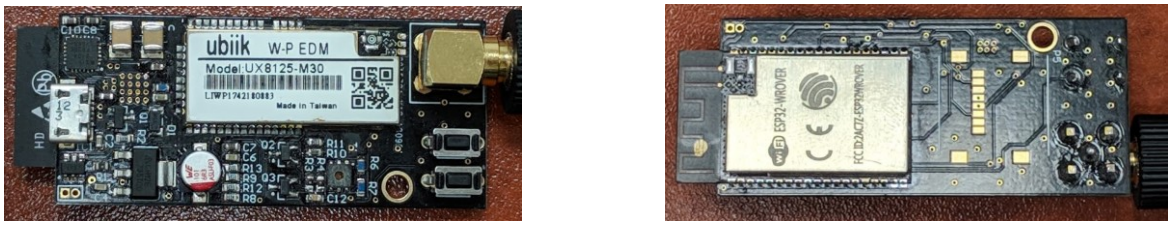

Figure 4.2 : MicroPython End Device (µP-ED) Front and Back

4.4.2 Base Station with Protocol Stack

To interface with Ubiik Base Station, a Java Sample Code and a library (wp-ps-core) is available. Dependency issues with different environments (Windows, Linux (Ubuntu), Raspbian) were enough reason to implement an MQTT Bridge and Authentication Script under Python. To send and receive commands, it is necessary to encrypt with AES-128 a provided challenge (by the Base Station) and add a CRC (Cyclic Redundancy Check). To access this challenge, a Python Script will:

- open a socket connection (Port 7979);
- receive 2 messages (length in Bytes are in parentheses);
    - Message Length (4) in Little Endian (LE) + Counter (2) (in LE) + Message Type (1) + Base Station ID (16) + CRC (2) (in LE).
        - Message is highlighted in blue. 13 00 00 00 for 19 bytes (message length), 00 00 for counter 0, 7F for message type, 0a […] 2a for Base Station ID, 0a 0a for CRC value (Figure 4.3)

  - Message Length (in LE) + Challenge (16) + CRC (in LE)
- send encrypted challenge and proper message structure;
  - Message Length + Payload + CRC
- receive a Message Type 0xAC (Counter at 01 00); and
  - Message is highlighted in blue. 04 00 00 00 for 4 bytes (message length), 01 00 for counter 1, 00 ac for authentication message, 12 86 for CRC value (Figure 4.3)
- send an ACK (Acknowledgement) Message Type to confirm Base Station message.

```
0000  00 23 18 99 c0 91 00 0a  35 0b aa 7b 08 00 45 00   ·#····· 5··{··E·
0010  00 41 dc 4c 40 00 40 06  d2 aa c0 a8 05 0b c0 a8   ·A·L@·@· ·····
0020  05 64 1f 2b e2 61 14 3e  05 54 6b 81 24 ef 50 18   ·d·+·a·> ·Tk·$·P·
0030  00 e5 b0 80 00 00 13 00  00 00 00 00 7f 0a bd 8a   ····· ·· ·····
0040  90 b6 34 53 a3 68 ca 07  fe 78 12 6c 2a 0a 0a      ··4S·h·· ·x·l*··

0000  00 23 18 99 c0 91 00 0a  35 0b aa 7b 08 00 45 00   ·#····· 5··{··E·
0010  00 32 1d f8 40 00 40 06  91 0e c0 a8 05 0b c0 a8   ·2··@·@· ·····
0020  05 64 1f 2b e3 8e 9d 46  f9 84 25 ee 2a fa 50 18   ·d·+···F ··%·*·P·
0030  00 e5 20 7e 00 00 04 00  00 00 01 00 00 ac 12 86   ·· ~··· ·· ·····
```

Figure 4.3 : Messages received from Base Station (Software: WireShark)

4.4.3 Test Place: Commercial Building

An initial survey for distance was necessary with a first generation Base Station. P_t = 4 dBm for Base Station and P_t=12dBm for EVB. Synchronization cannot be achieved on the weakest side (downlink in this case). According to the EVB Datasheet, its sensitivity is -120 dBm. Expected Fade Margin is then 124 dBm (downlink). Frequency is 915 MHz as per North American Regulations.

The Base Station is placed at three different locations (1st floor, 3rd floor, on the roof). A laptop and an EVB connected by USB were used to send messages through AT+TX command. Received Signal Strength Indicator (RSSI) and packet count are collected to see the signal strength and QoS.

Building length is 75 m. It has 6 floors and 2 basement floors for parking. Weightless configuration parameters are SF = 8 and BW = 12.5 kHz (Narrowband).

4.4.4 Test Place: École Technologie Supérieure (ÉTS)

A preliminary survey for distance with a stronger Base Station P_t = 27 dBm took place at ÉTS (Montreal, Canada). The Base Station is located on the 1st floor inside a room that has Ethernet Connection. Messages are sent with the same commands and are acknowledged with Ubiik Cloud. The building's dimensions are 125 m by 75 m. Weightless configuration parameters are SF = 8 and BW = 12.5 kHz. Expected Fade Margin is 147 dBm (uplink and downlink).

4.4.5 Test Place: Polytechnique Montreal

The base station was placed in the Graduate Students' Cafe (C418) which is the closest available room near the center of the building (Yellow dot in Figure 4.4). Weightless configuration parameters are SF = 1 (no FEC) and 8 (+FEC), BW = 12.5 kHz. Expected Fade Margin is 132 dBm for SF = 1 and 147 dBm for SF = 8. Different test locations were selected according to the number of walls and number of floors.

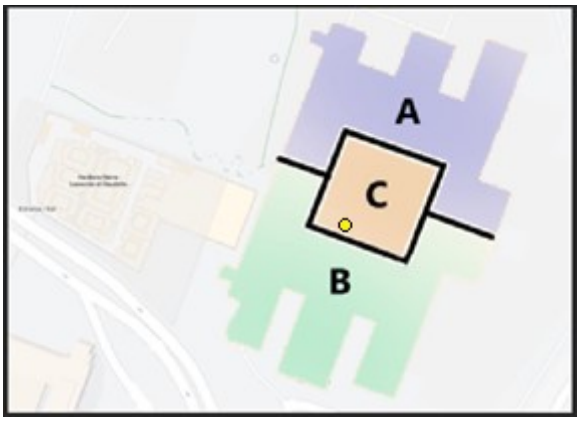

Figure 4.4 : Map View: Wings' (building) Identification

4.5 Results

4.5.1 Test Place: Commercial Building

All floors are covered when the Base Station is on the 3rd floor (even the Basement S1 and S2). The roof is not covered. When installed on the roof, the 1st floor is partially covered in front of the elevator (the center section of the building) and the basement is not covered at all. Benefits of this is the outside range. Maximum range was not tested, but 220 meters away, inside an office building,

a strong signal (over -70 dBm) was recorded. Expected results from COST231 is less than 3 floors in direct line (12 meters). Actual results are up to 4 floors. Full floor coverage was not possible to test because offices were not accessible. The only test locations were in the corridor without any walls to attenuate the signal, and the same was true for the parking.

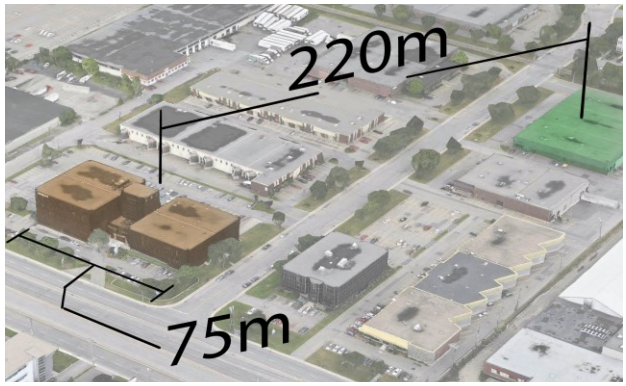

Figure 4.5 : Satellite View Commercial Building and Outdoor Range

Outdoor coverage is confirmed with COST231 (FM = 1 dBm, P_r = -119 dBm), but the signal was stronger than expected (near Path Lost in free space). All FM are calculated with a sensitivity of -120 dBm, but measured RSSI with Ubiik Software (Figure 4.6) were never under -110 dBm. Under that point, registration to the Base Station was lost.

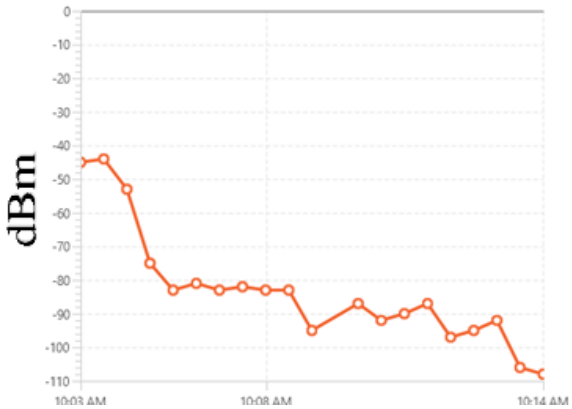

Figure 4.6 : Measured RSSI Datapoints from Ubiik Software

4.5.2 Test Place: ÉTS

Our test locations confirmed that basement (S1) and the 1st floor were covered and the 3rd floor on the opposite side of the building was not (red dot). Base Station is identified (Figure 4.7) as a

yellow dot with letter B, green dots represent location where device was able to register to the network. One data point revealed a strange behaviour: if the user with the laptop was in between the EVB and the Base Station, the device was unregistered from its network.

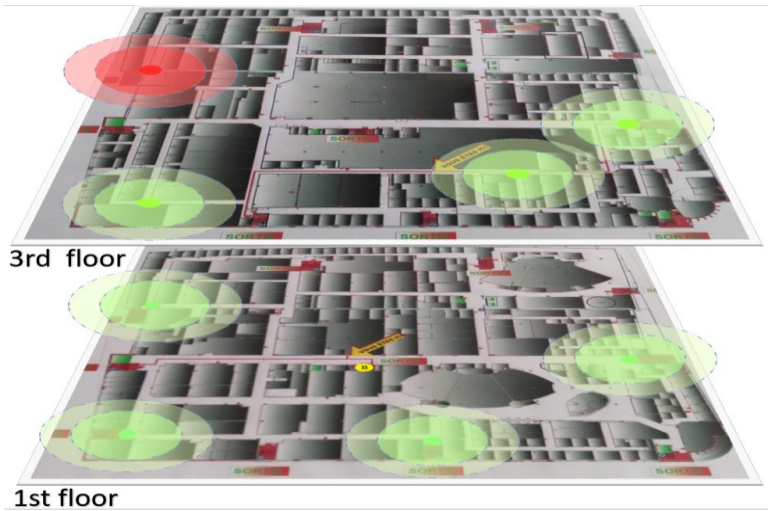

Figure 4.7 : Testing location at ÉTS

According to COST231 (d = 65m.), 12 light walls would be the maximum, or 6 concrete walls. With 2 floors to penetrate and a distance of 65 m., the maximum range is 2 light walls, or 1 concrete walls. The results show better coverage than the model output.

4.5.3 Test Place: Polytechnique Montreal

Wing B was covered on 6 floors except the cafeteria near the tunnel to the other pavilion (identified on Figure 4.8). Wing A was mostly not covered, especially on the 6th floor. “Yes” symbols show where the end device was able to synchronize with Base Station and “No” where the signal was lost, and the device became unregistered from the network.

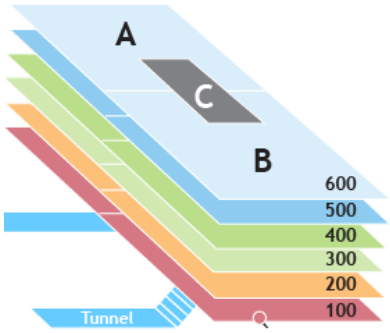

Figure 4.8 : Wings and Floor ID at Polytechnique © Polytechnique Montréal, 2019

Table 4.4 : Test Locations

Room ID	Uplink	Downlink	Room ID	Uplink	Downlink
Stairs	YES	YES	**A604.1**	NO	NO
B117	NO	NO	**A617**	NO	NO
B123	YES	YES	**A600**	YES	YES
B222	YES	YES	**C610**	YES	YES
B277	YES	YES	**B657**	YES	YES
C240	YES	YES	**B620**	YES	YES
A305	YES	YES	C609	YES	YES
C418	YES	Not Tested	Base Station – C418		

Bold Room ID are represented on Figure 4.9. Stairs are represented on Figure 4.8 near the Tunnel.

COST231 is predicting a positive Fade Margin with 2 light walls and 2 floors, but no coverage on the first floor (3 floors traversed). A600 is at the end of a main corridor, and as soon as we encountered a wall, the network synchronization was lost. On the first floor, the device is located at the door before entering the tunnel and its signal was strong enough for uplink messages and synchronization (downlink). A few meters further away, near the building's corner, the signal was lost, mostly due to the wall penetration rather than distance itself.

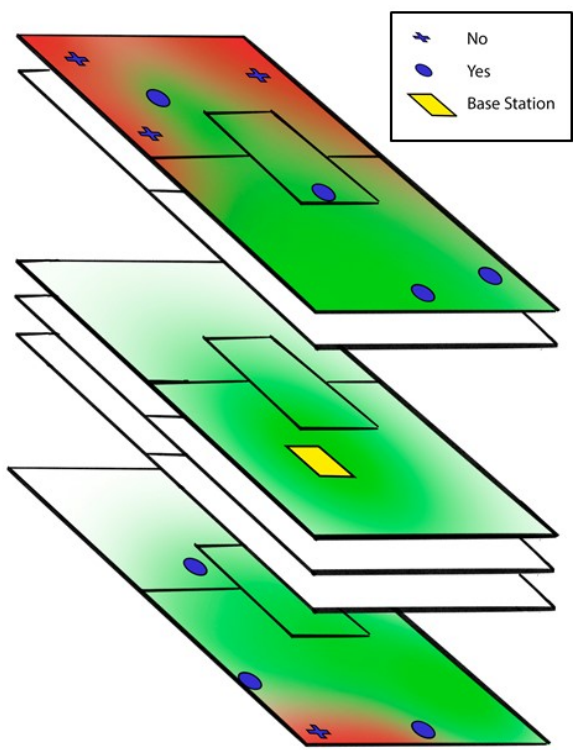

Figure 4.9 : Test locations at Polytechnique

A range decrease was not witnessed with SF = 1. Without RSSI, it was not possible to accurately calculate a link budget at each location. Firmware issues on µP-ED (1.0.7) prevented the use of the AT+RSSI command. Firmware 1.0.8 is adding this and many more commands.

4.6 Conclusion

Indoor IoT applications can benefit from a simpler wireless architecture for their sensors. The Wi-Fi network still needs many more routers to cover the same area. Protocol specifications from both Wi-Fi and Weightless can determine the maximum number of supported connected devices and considerably favor Weightless. Without possible collisions on the same network because of TDMA and FDMA, message confirmation can be implemented with Weightless in comparison to LoRaWAN.

Our results have shown that walls and floors are important obstacles and have more impact on the range limitations than distance. Actual coverage with Weightless is better than expected by COST231 for all test locations. Corrected factors could be proposed with further research.

An open plan building would offer fewer restrictions and a single Weightless Base Station could fully cover a building. Actual coverage should also be better in an industrial setting, as manufacturing plants do not suffer from as much loss from wall penetration (Andrade & Hoefel, 2010). However, there must be more electromagnetic interferences in such buildings compared to a hospital or a university. This research did not include such tests. As for hospitals, they may require a second base station to fully cover each room. We also need to investigate whether a system can perform without a backup to record lifetime data and to deal with data corruptions. To reduce the chance of missing data, a second Base Station should be added. Further research is also required to measure whether such architecture affects other communications on site.

To create better heat maps, each data point should register RSSI. A Vector Network Analyzer can evaluate each antenna efficiency and gain (G_t and G_r) for an accurate calculation of the link budget.

We could also assume that a longer Time on Air can reduce the chance of decoding the message because of its limited internal amplifier. Humans moving inside a building should rapidly affect its electromagnetic signatures. Tests during day and night could bring about valuable information on those interferences and their effects on range and QoS.

CHAPITRE 5 DISCUSSION GÉNÉRALE ET ÉVALUATION DES COMPÉTENCES POUR CONCEVOIR UN PRODUIT INTÉGRANT LE WEIGHTLESS

Ce chapitre propose une évaluation organisationnelle de l'acquisition des compétences nécessaires pour réaliser la méthode liée à l'objectif technique, soit : d'identifier le matériel et les paramètres de configuration du Weightless pour couvrir différents immeubles; et d'interfacer le serveur d'applications avec la station de base. Dans la première section, la terminologie associée aux compétences est définie, ainsi que la taxinomie utilisée pour évaluer le niveau de chaque compétence de l'équipe R&D. Ensuite, l'évaluation des compétences à acquérir de l'équipe d'ingénierie de la PME associée à ce projet est présentée. Les méthodes pour acquérir ces nouvelles compétences sont discutées à la section suivante. Par la suite, les défis sont identifiés selon les étapes méthodologiques choisies, soit la conception de cartes électroniques pour le prototype et le la programmation du script pour interfacer avec la station de base afin d'accéder aux messages décodés. Finalement, la conclusion expose la progression des compétences au sein de l'équipe, explique la méthode d'acquisition choisie par celle-ci et se termine par les limites et les compétences encore à développer pour compléter le projet afin qu'il soit commercialement viable.

5.1 Définition de la compétence

Cette section permet de définir les termes compétence et connaissance. Elle propose une analyse de ces définitions pour déterminer les compétences d'une équipe de R&D.

Selon l'office de langue française la compétence est : « [l']ensemble de connaissances, de qualités et d'habiletés qu'une personne doit posséder pour accomplir une tâche spécifique» (Office québécois de la langue française, 2017). En comparaison, la connaissance est : « [l']ensemble des notions et des principes transmis […] en faisant appel à ses capacités de compréhension et de mémorisation, mais qu'il peut également acquérir par l'étude, l'observation ou l'expérience (Office québécois de la langue française, 2008).

L'objectif n'est pas uniquement de savoir, mais d'avoir aussi les habiletés pour l'exécuter. Le fait de savoir comment braser un élément sur une carte électronique ne donne pas à un ingénieur électrique le savoir-faire d'un expert de la brasure en surface. Par exemple, une résistance 0201 ayant pour dimension 0.6mm x 0.3 mm est difficile à braser, car il faut éviter de trembler, être

capable d'utiliser en même temps un microscope (vision décalée par rapport aux mains), une paire de pinces et un fer à braser. Pour considérer cette compétence comme acquise, il faut savoir (connaissances) et savoir-faire (habiletés).

Le choix du modèle pédagogique provient du besoin de classifier le niveau d'acquisition des compétences. Les modèles proposés par la littérature sont : la taxinomie de Bloom (Bloom et al., 1956) et la taxinomie révisée de Bloom (Anderson & Krathwohl, 2001). La taxinomie de Bloom révisée se compose de 6 niveaux de complexité croissante, soit : reconnaître, comprendre, appliquer, analyser, évaluer et créer.

Tableau 5.1 : Taxinomie de Bloom révisée

Niveaux	Description
Reconnaître	Se rappeler des faits et des concepts de base
Comprendre	Expliquer les concepts
Appliquer	Utiliser la connaissance dans une situation nouvelle et/ou pratique
Analyser	Établir les liens entre les concepts
Évaluer	Argumenter sa position ou sa décision
Créer	Produire de nouveaux concepts

5.2 Évaluation des compétences requises pour le projet

L'équipe visée par cette analyse est composée de quatre membres : un ingénieur mécanique, un ingénieur électrique, un designer industriel et un ingénieur industriel (l'auteur). Les compétences reliées à la conception d'un produit ayant pour caractéristique le rayonnement ultraviolet ne sont pas traitées dans cette analyse, car elles sont déjà au niveau 6 (Créer). L'équipe R&D du partenaire industriel a de nombreux projets de création de nouveaux produits à son actif. Cet aspect n'est pas à négliger pour une entreprise qui n'aurait pas une équipe d'expérience en conception produits. Cette compétence devrait être analysée pour assurer le succès du projet visé.

L'évaluation des compétences se fait selon deux regroupements : le génie électrique; et le génie informatique et logiciel. L'auteur n'est pas en mesure de définir la frontière nette entre les deux derniers génies. L'objectif n'est pas de caractériser ces compétences elles-mêmes, mais leur acquisition dans un contexte de PME. D'après l'évaluation faite par l'auteur au début du projet, la liste des tâches de nature technique, qui demandent la mobilisation de compétences que ne possède pas l'équipe au démarrage du projet, sont :

- intégrer le module radio Weightless sur une carte électronique;

- accéder aux messages décodés par la station de base Ubiik (*Interface Protocol Stack*) ou par le Ubiik Cloud (*Application Programming Interface*);
- programmer une application pour la gestion des messages; et
- concevoir une interface humain-machine (*Front-End*) pour les utilisateurs finaux.

Les tableaux suivants présentent la liste des compétences nécessaires au projet. L'évaluation est faite selon les connaissances de l'auteur de son équipe avec laquelle il a travaillé depuis de nombreuses années. Deux colonnes supplémentaires aux niveaux sont ajoutées pour identifier les compétences absentes au début, soit : celles que l'équipe de R&D ne possède pas et celles, inconnues, qui se sont révélées nécessaires au cours de la réalisation du projet. Ces dernières sont importantes, car elles échappent à la compréhension initiale des tâches à réaliser.

Tableau 5.2 : Évaluation des compétences de l'équipe en génie électrique

		Niveau de la connaissance							
		Absent	Inconnu	1	2	3	4	5	6
Circuits imprimées									
	Schéma de principe					x			
	Traces					x			
	4 couches			x					
	Antenne PCB	x							
	Impédance antenne		x						
	Perte de retour antenne		x						
	VSWR antenne		x						
	Analyseur vectoriel		x						
	Fichier pour production					x			
Composants (Nomenclature)									
	Type de boîtiers pavés		(selon le type)						
Assemblage									
	par insertion					x			
	en surface			x					
	four refusion	x							
	jet d'air chaud		x						
	accessoires			x					

Tableau 5.3 : Évaluation des compétences de l'équipe en génie informatique et logiciel

		Niveau de la connaissance							
		Absent	Inconnu	1	2	3	4	5	6
Micrologiciel									
	Langage C					x			
	Langage MicroPython					x			
	Langage Assembleur	x							
Scripts embarqués									
	Modules MicroPython					x			
	UART				x				
Script sur ordinateur									
	Langage Python				x				
	Boutisme		x						
	Socket	x							
	CRC16		x						
	Langage Java			x					
	Java Decompiler		x						
	Cryptage	x							
	AES-128		x						
	Réseau				x				
Logiciel									
	Solidworks							x	
	Altium PCB Design					x			
	Easy EDA (PCB Design)	x							
	WireShark			x					

5.3 Acquisition de nouvelles compétences

La méthode choisie pour acquérir ces nouvelles compétences est l'expérimentation avec le matériel Ubiik par une itération de prototypes de cartes électroniques. De plus, l'équipe consulte de nombreuses pages web de la communauté *Open Source*, ainsi que les codes et leur Wiki sur GitHub. Plusieurs tutoriels en ligne peuvent être bénéfiques dans l'acquisition de nouvelles compétences, sans oublier les blogues. Il y a aussi les cours magistraux (exemple : l'université) et les cours en ligne qui sont disponibles (exemple : plateforme edX). Finalement à travers les lectures d'articles scientifiques, il est possible d'acquérir de nouveaux concepts et d'en comparer les méthodes d'expérimentations. Il est important de rappeler que pour atteindre le niveau 3 (Appliquer), il faut procéder à une utilisation pratique de la nouvelle connaissance.

5.4 Défis selon les étapes méthodologiques

La majorité des défis à surmonter sont inconnus au début d'un projet similaire, à moins que l'équipe n'en soit pas à son premier projet du genre. La difficulté réside dans la limite de la conscience des membres de l'équipe de R&D des compétences requises pour réaliser les étapes méthodologiques. La conscience d'une personne comprend son savoir et la compréhension de ne pas savoir une majorité d'informations. Une personne peut savoir conduire sans pour autant comprendre le fonctionnement intrinsèque du moteur à combustion. De plus, certaines parties de son savoir peuvent être erronées. Cette section discute des compétences acquises en cours de projet. La section est organisée en fonction des étapes méthodologiques choisies pour atteindre chacun des deux objectifs spécifiques de l'aspect technique qui sont d'identifier le matériel et les paramètres de configuration pour la couverture du bâtiment; et d'interfacer avec la station de base pour accéder aux messages décodés.

5.4.1 Conception des prototypes de cartes électroniques

Pour identifier le matériel et ses paramètres de configuration, il faut concevoir des prototypes de cartes électroniques intégrant le Weightless. Cette tâche identifie le matériel nécessaire pour procéder à l'évaluation de la couverture d'une station de base. La réalisation de la première carte demande de nouvelles compétences qui sont :

- assemblage de composants en surface par refusion;
- conception d'un circuit imprimé à 4 couches;
- paramétrisation du lien série UART;
- évaluation et optimisation de l'antenne radio; et
- programmation des scripts embarqués.

L'assemblage par refusion permet de braser les composants au circuit imprimé. Pour assembler les cartes électroniques, l'équipe a choisi le four de refusion (*reflow oven*). Le jet d'air chaud est une autre technique utilisée pour cette opération, mais elle est plus complexe et moins automatisée que le four. De plus, la compagnie chinoise qui fabrique les circuits imprimés offre un service de pochoir pour la pâte de refusion. Ce savoir-faire est inconnu de l'équipe au début du projet, mais après quelques essais, le résultat est satisfaisant pour un prototype.

La conception d'un circuit imprimé à 4 couches exige la compréhension des couches de puissance et de mise à la terre. Ces couches sont au centre de la carte afin de réduire les interférences et d'améliorer l'intégrité des signaux. Ceci rend la conception beaucoup plus complexe puisque les composants sont plus rapprochés et que les traces (équivalent à un fil électrique) ont plus de chance de se croiser.

La transmission série entre le microcontrôleur et le module radio Weightless utilise l'interface UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter). Pour communiquer, il existe plusieurs paramètres, dont : la vitesse de transmission (*baud rate*), la taille de la trame (*Data Frame*) et les bits de configuration de début et de fin. De plus, la transmission série peut être de type ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) ou propriétaire. Dans ce cas-ci, elle est de type ASCII par commande AT. Une commande AT débute toujours par les deux lettres AT. Elle peut activer une fonction, demander la valeur d'une ou plusieurs variables ou définir la valeur d'un ou plusieurs variables. Chaque commande AT se termine par un ou plusieurs caractères de fin de transmission. Toutefois, le module Ubiik ne communique pas les mêmes caractères de fin que le microcontrôleur avec le micrologiciel MicroPython. L'identification de ce problème est dû aux messages reçus qui étaient mal structurés lors du script initial. Il est facile de le résoudre en envoyant une commande AT de modification de caractères de fin au module Ubiik. Cette commande pour fonctionner requiert elle aussi le bon caractère.

Pour évaluer et optimiser l'antenne, il faut un analyseur de réseau (*Vector Network Analyzer ou Scalar Network Analyzer*). Ce matériel et son utilité étaient inconnus de l'équipe et son auteur. Cet équipement sert à mesurer l'impédance de l'antenne au module radio, à déterminer la perte de retour (*Return Loss*) de l'antenne selon la bande des fréquences et à établir le rapport de tensions des ondes stationnaires (*Voltage Standing-Wave Ratio*). Ces caractéristiques sont utilisées par la suite pour évaluer la puissance réelle et la limiter selon les normes gouvernementales. L'équipe ne possède pas ce savoir au début du projet et elle n'est pas en mesure de le maîtriser à la fin, car elle n'a pas eu accès à cet équipement. L'absence d'équipements de laboratoire peut aussi être un facteur de l'acquisition de nouvelles compétences. Le constat sur cette partie du projet est qu'il a permis d'acquérir la connaissance sur l'existence de ces méthodes afin qu'il soit possible d'externaliser cette évaluation à un laboratoire ou à une entreprise spécialisée dans le domaine. Cependant, cet aspect est ignoré puisque le module Ubiik est pré-certifié pour le Canada et l'équipe respecte la directive du gain maximal permis pour l'antenne. Le fait d'ignorer cet aspect peut

biaiser les résultats de la portée maximale en sous-évaluant celle-ci. Les résultats doivent être considérés comme pessimistes par rapport à un système optimisé.

Les compétences internes à l'équipe de R&D permettent déjà de réaliser un système embarqué sur un microcontrôleur. À travers plusieurs projets similaires, l'équipe a développé son expertise en MicroPython et son interpréteur. L'interpréteur est conçu en langage C et donne accès aux périphériques et aux fonctions internes du microcontrôleur choisi, soit le ESP32. Le système d'exploitation *Free RTOS* exécute les scripts C. Pour réaliser ce projet, il faut utiliser les modules *_thread*, *ota*, *network* et *machine*. L'équipe utilise les fonctions suivantes dans ces modules :

Tableau 5.4 : Listes des modules, des fonctions et des scripts MicroPython

Nom du module	Fonctions	Script	Utilité
_thread	start_new_thread		Permettre le multifil (*Multithreading*)
ota	start		Mettre à jour le micrologiciel par Wi-Fi
network	telnet.start ftp.start WLAN(1)	 ap	Accéder à l'interpréteur par Wi-Fi Permettre de transférer des scripts à l'ESP32 Créer un point d'accès Wi-Fi
machine	UART Pin	ubiik	Communiquer avec le module radio Ubiik Accéder aux périphériques physiques de l'ESP32

La programmation d'un script avec ces modules permet de les mettre en pratique. L'équipe possède maintenant un niveau plus élevé de compétences dans le domaine des systèmes embarqués en ayant plus de modules MicroPython à son actif pour de futurs projets de conception de produits.

À l'exception des compétences liées à l'analyseur de réseau vectoriel, l'absence des compétences inconnues est remédiée par la démarche de résolution de problèmes enseignée en ingénierie. Une aide externe peut être utilisée puisque ces compétences sont génériques à l'industrie des cartes électroniques. Le micrologiciel en MicroPython est disponible en ligne, mais le nombre d'utilisateurs est limité en comparaison au micrologiciel en C ou en assembleur. Il s'agit d'une particularité de l'équipe et non une généralisation de l'industrie. L'utilisation de cette compétence n'est pas critique à condition d'arriver à communiquer par commande AT, avec le module radio Ubiik, par une autre méthode.

5.4.2 Programmation du script pour interfacer avec la station de base

Pour accéder aux messages décodés dans la station de base, il faut ouvrir une interface de communication avec un serveur local ou envoyer des requêtes sur le serveur d'Ubiik, à condition

que la station de base ait un accès Internet. La programmation d'un script sur un serveur local est privilégiée par l'équipe afin d'éviter les coûts mensuels d'accès au serveur et parce que ses compétences pour interfacer avec un serveur infonuagique sont très limitées. Toutefois, l'interface de communication avec la station de base n'est guère simple, car elle opère avec un système d'exploitation Linux auquel l'équipe n'a pas accès et qu'il est impossible d'ajouter un script pour rediriger les messages à un autre serveur. L'accès aux messages ne se fait que localement par réseau LAN. Le document technique (Ubiik, 2018b) est disponible en ligne pour interfacer un ordinateur avec la station de base en mode hors ligne avec un câble Ethernet.

Le défi de communiquer directement avec la station de base est qu'il faut programmer un *Interface Protocol Stack*. Pour initier la communication, la station de base envoie un *challenge* qui doit être chiffré. La station attend de recevoir le message dans le bon format, sinon elle ferme complètement la connexion avec le client. Les détails techniques sont fournis dans (Ubiik, 2018b, p. 7-8), mais l'auteur n'est pas en mesure au début du projet de comprendre tous les termes et leur impact. Les compétences suivantes sont manquantes au sein de l'équipe pour réaliser cette partie du projet :

- boutisme (*Endianness*);
- CRC (*Cyclic Redundancy Check*);
- chiffrement AES (*Advanced Encryption Standard*);
- décompilation d'un fichier *Java Archive*; et
- utilisation du logiciel Wireshark.

Le boutisme est l'ordre d'écriture des bits. Il est important, car le message est divisé en trois sections (gauche à droite) et l'ordre d'écriture des bits est de droite à gauche (*Little Endian*) à l'intérieur de chaque section. Cette information est nécessaire pour structurer chaque message reçu et envoyé.

Le CRC assure l'intégrité du message. L'algorithme CRC16 est utilisé par les deux parties qui communiquent pour vérifier que la valeur reçue est identique à la valeur calculée. Ceci peut être programmé, mais l'auteur a trouvé une fonction Python dans la librairie binascii (crc_hqx) après plusieurs heures de recherche et de nombreux tests. Il existe plusieurs variantes du CRC16, c'est pourquoi la recherche de cette fonction est longue et l'absence de compréhension ne permet pas de conclure rapidement que c'est la version générique qui est utilisée par Ubiik.

Le chiffrement AES est un algorithme qui fonctionne selon un bloc défini de bits, soit : 128, 192 ou 256. AES-128 est le chiffrement choisi par Ubiik pour la communication sécurisée avec la station de base. Il possède comme critère une clé de 128 bits et un vecteur d'initialisation (*Initialization Vector*). La compréhension initiale est que la clé et le vecteur utilisé pour chiffrer le *challenge* est déduit par la station de base en fonction de ceux programmés par le client qui initie la connexion. Ce n'est pas le cas avec l'AES-128. Il faut connaître les paramètres utilisés par la station de base, car sa solution est unique. Aucune information dans la documentation ne permet de déduire ces deux éléments.

Pour chiffrer adéquatement le *challenge*, il faut accéder au code source de la libraire *ws-ps-core*. Cette librairie est incluse dans le fichier compressé de type *Java Archive*. Il existe un logiciel (Java Decompiler) pour décompiler ce type de fichier et extraire le code source des classes Java. Il est impossible par cette opération d'obtenir les commentaires à l'intérieur du code et le logiciel ne fonctionne pas pour tous les fichiers. Il est possible de trouver à travers la centaine de classes celle associée à la clé de chiffrement et son vecteur. La lecture du code source permet aussi de voir comment l'initialisation s'effectue avec la station de base pour confirmer certaines hypothèses, dont le boutisme et le CRC.

Wireshark est un logiciel renifleur (*sniffer*). Il permet de voir chaque paquet sur un interface réseau (Ethernet, Wi-Fi). Lorsqu'il est utilisé parallèlement avec l'interface Java de la compagnie Ubiik, il permet de renifler chaque transmission. De cette façon, l'équipe de R&D possède des exemples d'entrées et de sorties pour valider les hypothèses et confirmer le fonctionnement interne de l'initialisation. La combinaison de tous ces éléments permet d'obtenir le message ayant comme type 0xAC qui confirme l'accès aux fonctions internes de la station de base (initialisation de la communication réussie).

L'équipe effectue ces manipulations à l'interne, car les tentatives d'externaliser ce script ne sont pas concluantes. Normalement, cette partie peut être externalisée, à condition de trouver un programmeur qui comprend l'énoncé d'initialisation fourni par Ubiik. L'auteur a eu comme consultant une entreprise indienne recommandée par Ubiik, un ingénieur d'une entreprise spécialisée en automatisation et un ingénieur électrique à la maîtrise comme stagiaire, et ce sans succès. Le défi est surmonté par l'utilisation de la méthode de résolution de problèmes de l'ingénierie et de nombreuses lectures sur Internet.

En rétrospective, la solution est évidente et rapide à programmer. Ceci confirme le niveau d'acquisition de ces nouvelles compétences par l'équipe de R&D.

5.5 Conclusion

Cette section permet d'établir une vue d'ensemble de la progression des compétences au sein de l'équipe de R&D et de la manière dont elle s'y est prise pour accéder aux nouvelles connaissances. Elle se termine par une explication des compétences à acquérir pour continuer le projet afin qu'il soit commercialement viable.

Les tableaux présentent les compétences nécessaires pour ce projet et met en lumière la quantité de compétences initialement inconnues par l'équipe de R&D. Les X majuscules représentent la progression de la compétence par rapport à l'initial (x minuscule). Il faut rappeler que l'absence d'une seule de ces compétences empêche la réalisation de ce projet.

Tableau 5.5 : Progression des compétences en génie électrique

		Niveau de la connaissance							
		Absent	Inconnu	1	2	3	4	5	6
Circuits imprimées									
	Schéma de principe					x			
	Traces					x	**X**		
	4 couches			x		**X**			
	Antenne PCB	x		**X**					
	Impédance antenne		x	**X**					
	Perte de retour antenne		x	**X**					
	VSWR antenne		x	**X**					
	Analyseur vectoriel		x	**X**					
	Fichier pour production					x			
Composants (Nomenclature)									
	Type de boîtiers pavés		(selon le type)						
Assemblage									
	par insertion					x			
	en surface			x		**X**			
	four refusion	x				**X**			
	jet d'air chaud		x		**X**				
	accessoires			x		**X**			

Tableau 5.6 : Progression des compétences en génie informatique et logiciel

		Niveau de la connaissance							
		Absent	Inconnu	1	2	3	4	5	6
Micrologiciel									
	Langage C					x	**X**		
	Langage MicroPython					x	**X**		
	Langage Assembleur	x							
Scripts embarqués									
	Modules MicroPython					x	**X**		
	UART				x		**X**		
Script sur ordinateur									
	Langage Python				x	**X**			
	Boutisme		x				**X**		
	Socket	x				**X**			
	CRC16		x				**X**		
	Langage Java			x	**X**				
	Java Decompiler		x			**X**			
	Cryptage	x				**X**			
	AES-128		x			**X**			
	Réseau				x	**X**			
Logiciel									
	Solidworks							x	
	Altium PCB Design					x			
	Easy EDA (PCB Design)	x				**X**			
	WireShark			x			**X**		

La méthode choisie par l'auteur pour relever la majorité des défis est l'auto-apprentissage par la lecture de pages web et de forums. Cette recherche demande beaucoup d'heures et de capacités d'assimilation. Il n'existe aucune garantie de succès. Dans un contexte où la rapidité d'accès au marché est un enjeu, cette solution n'est pas optimale. Si l'objectif de l'entreprise est de minimiser les coûts, sans compter les heures supplémentaires, cette méthode est la plus indiquée à condition d'avoir des ressources en mesure d'acquérir ces connaissances et de les mettre en pratique avec des projets concrets pour les convertir en compétences. Il a fallu des années et plusieurs projets pour que l'auteur puisse comprendre, analyser et concevoir des cartes électroniques puisqu'il n'a pas eu une formation académique dans ce domaine. Et c'est grâce à la multidisciplinarité de ses connaissances qu'il est maintenant en mesure de relier les concepts permettant une vue d'ensemble, essentielle à l'élaboration d'un système intégrant le Weightless.

Selon les objectifs initiaux de l'équipe de R&D de créer une version commercialisable d'un équipement intégrant le Weightless, ce projet est incomplet. Il reste encore les compétences liées à l'application dorsale (*back-end*) pour la gestion des messages, ainsi que celles liées à l'interface humaine-machine (*front-end*) pour permettre aux utilisateurs finaux d'interagir avec le système. De plus, si ces deux éléments sont portés sur l'infonuage, d'autres compétences sont indispensables. Le constat de l'auteur est qu'une équipe multidisciplinaire est essentielle pour rassembler toute l'expertise nécessaire. Cette équipe doit évaluer ses compétences et déterminer lesquelles seront externalisées. La faisabilité organisationnelle au sein d'une PME est très limite considérant la taille de l'équipe nécessaire. Il faut envisager la sous-traitance et maximiser les profils multidisciplinaires généralistes qui peuvent agir comme chefs d'orchestre avec les fournisseurs et critiquer adéquatement leurs propositions de solutions.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Notre partenaire industriel souhaitait identifier et mettre en œuvre une technologie capable de couvrir un hôpital pour son système de désinfection automatisé. Sans accès aux infrastructures des réseaux filaires ou sans-fil, l'entreprise a décidé de créer un réseau parallèle et d'intégrer la communication bidirectionnelle dans son produit. Les données collectées permettront de surveiller les appareils de désinfection et l'envoi de nouveaux paramètres de configuration, ainsi que les mises à jour logicielles, assureront le fonctionnent optimal et sécuritaire du système. Toutefois, l'entreprise se questionne sur sa capacité à intégrer cette technologie.

Ce mémoire visait ainsi à évaluer la faisabilité technique et organisationnelle de l'adoption d'un système de communication bidirectionnelle longue portée dans le processus de conception d'un équipement connecté au sein d'une PME manufacturière. Ce système de communication bidirectionnel doit permettre d'assurer la surveillance et le contrôle d'équipements non critiques, dans un environnement non contrôlé.

La revue de la littérature suggère que la technologie Weightless, à l'intérieur du domaine LPWAN, est la plus prometteuse pour l'application visée. Ces avantages sont : son réseau synchrone, son efficacité du spectre radio, sa capacité à confirmer les messages et la possibilité d'envoyer un message à un groupe de diffusion.

La méthode choisie a reposé sur le développement d'un prototype du système de communication bidirectionnelle longue portée intégrant le Weightless. À travers la conception et l'expérimentation de terrain, il a été possible d'évaluer les deux aspects de l'objectif de ce mémoire, soit l'aspect technique et organisationnel.

L'aspect technique est divisé en deux objectifs spécifiques soit : d'identifier le matériel nécessaire pour couvrir différentes tailles de bâtiments; et d'interfacer avec la station de base de la compagnie Ubiik. Pour atteindre ces objectifs, l'entreprise partenaire a conçu deux cartes électroniques comprenant le module radio Weightless. De plus, elle a programmé un script pour interfacer avec la station de base pour accéder aux messages décodés, ainsi qu'à ses fonctions internes. Le modèle de simulation sélectionné, le COST231 a été évalué à partir des résultats de la couverture de trois bâtiments de tailles et formes différentes et il permet à l'entreprise d'obtenir un estimé du nombre de stations de base nécessaires pour couvrir un bâtiment.

L'aspect organisationnel est couvert par une évaluation des compétences au début du projet, ainsi qu'à sa fin, pour exposer les compétences absentes et celles initialement non identifiées au sein de l'équipe de R&D. Cette évaluation couvre la méthode d'apprentissage, la manière dont l'équipe a relevé les défis et les possibilités de la sous-traitance.

Le travail de recherche proposé démontre pour la première fois qu'il est possible d'intégrer le Weightless au sein d'un produit d'une PME pour lui donner des capacités de communication bidirectionnelle dans un environnement intérieur. De plus, l'utilisation du COST231 comme modèle de propagation donne un estimé pessimiste du nombre de stations de base pour couvrir un bâtiment. Les trois bâtiments ont été couverts pratiquement en totalité lors des tests avec une seule station de base. Le plus volumineux des trois est le pavillon principal de Polytechnique Montréal et deux ailes sur trois ont été couvertes par une seule station de base. L'aspect technique de la transmission d'un message sur une longue portée à l'intérieur d'un bâtiment est validé par cette recherche.

L'autre aspect technique est matérialisé par la réception du message de confirmation de la fin du processus d'authentification de la station de base. Il confirme la faisabilité d'interfacer un script d'un serveur local avec la station de base Ubiik pour accéder aux fonctions internes et aux messages décodés. Ce script est le début du développement d'une application sur un serveur local pour gérer les messages entrants et sortants associés à l'interface humaine-machine des utilisateurs finaux.

L'évaluation organisationnelle révèle l'étendue des compétences nécessaires pour concevoir un produit intelligent connecté au sein d'une PME. Les expertises en génie électrique, et en génie informatique et logiciel sont nombreuses et demandent des spécialisations. La sous-traitance permet de pallier un manque ponctuel d'expertise au sein de l'équipe de R&D. Toutefois, les membres de l'équipe doivent posséder les connaissances de base pour identifier les bons fournisseurs, et même savoir quels services sont requis pour le succès de leur projet. Selon la complexité du produit et le marché visé, d'autres compétences sont requises. Par exemple, la majorité de la population sait ce qu'est une application mobile, mais peu de gens sont en mesure de comprendre l'ampleur du travail requis pour en concevoir une et d'assurer sa compatibilité avec tous les appareils mobiles. L'auteur a tenté cette voie et après plus de 200 heures de programmation, il a reconsidéré ses choix technologiques pour le projet.

Grâce à ce projet de recherche, l'entreprise partenaire peut envisager avec confiance d'utiliser le Weightless pour développer le système de communication bidirectionnelle de son équipement de désinfection. En fonction de la valeur des données emmagasinées par le produit actuel, les gestionnaires d'un hôpital d'Ontario songent en effet à automatiser le processus de collecte grâce à un système de communication tel que celui proposé dans ce mémoire. De plus, l'entreprise possède maintenant de nouvelles connaissances et compétences pour répondre aux défis à venir dans la conception de ses nouveaux produits. Ces compétences sont cruciales pour maintenir l'avantage technologique par rapport à sa compétition.

Globalement, l'évaluation de la faisabilité organisationnelle est satisfaite en grande partie, bien que certains aspects techniques pour rendre le projet commercialement viable ne soient pas achevés. Des définitions plus complètes de chacune des compétences permettraient d'avoir une liste plus exhaustive et standardisée pour évaluer le potentiel de succès au sein d'une PME de concevoir des produits intelligents et connectés. Cette liste donnerait un outil pour les entreprises voulant intégrer les concepts de l'Industrie 4.0 au sein de leur organisation, ce qui exige une transformation par la mise en œuvre de compétences en constante évolution.

D'autres opportunités de recherche peuvent aussi découler de ce mémoire. Tout d'abord, une comparaison de la performance mesurée avec les fiches techniques permettrait de calculer précisément le bilan de liaison. Plusieurs facteurs n'ont pas été pris en compte comme la directivité (mesure de radiation), le gain, la polarisation et l'efficacité des antennes. Celui-ci serait de nouveau comparé avec le modèle de propagation, car ces facteurs ont un impact sur l'uniformité de la couverture d'un bâtiment. Ces travaux permettront de proposer des améliorations spécifiques au modèle COST231 pour le Weightless.

Ensuite, la collecte de données peut s'effectuer sur un plus long laps de temps. Ceci permettrait d'évaluer le PDR du Weightless et de voir les mécanismes de confirmation. De plus, l'ajout de l'aspect temporel serait un élément clé pour comparer les paramètres SF et FEC avec la résistance aux interférences. Le ToA est un facteur important dans le succès de la transmission d'une trame au sein du LoRa, il doit en être de même pour le Weightless.

Le serveur d'application envisagé au cours du projet est le NodeRED. Il permet avec du Javascript et des messages en format JSON, de simplifier la conception d'un serveur *back-end*, et même une interface humain-machine avec le NodeRED *Dashboard*. Plusieurs manipulations ont été

effectuées par l'équipe de R&D pour comprendre son fonctionnement afin de l'intégrer dans le système final. Ceci pourrait mener à d'autres défis pour bonifier l'analyse des compétences à acquérir dans la conception d'un produit intelligent connecté.

RÉFÉRENCES

Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine, 55*(9), 34-40. doi:10.1109/mcom.2017.1600613

Ali, A., Shah, G. A., Farooq, M. O., & Ghani, U. (2017). Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications, 83*, 124-139. doi:10.1016/j.jnca.2017.02.002

Alsohaily, A., Sousa, E., Tenenbaum, A. J., & Maljevic, I. (2018). *LoRaWAN radio interface analysis for north American frequency band operation.* Communication présentée à IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, Montreal, QC, Canada (vol. 2017-October, p. 1-6). doi:10.1109/pimrc.2017.8292414

Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (2001). *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*.

Andrade, C. B., & Hoefel, R. P. F. (2010). *On Indoor Coverage Models for Industrial Facilities*. Communication présentée à 7th International Telecommunications Symposium, Copenhagen, Denmark.

Ayele, E. D., Hakkenberg, C., Meijers, J. P., Zhang, K., Meratnia, N., & Havinga, P. J. M. (2017). *Performance analysis of LoRa radio for an indoor IoT applications.* Communication présentée à Internet of Things for the Global Community, IoTGC, Funchal, Portugal. doi:10.1109/IoTGC.2017.8008973

Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H., Krathwohl, D. R., & Tyler, R. W. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives, Handbook 1: Cognitive Domain* (vol. 1): David McKay Company, inc.

Buyukakkaslar, M. T., Erturk, M. A., Aydin, M. A., & Vollero, L. (2017). *LoRaWAN as an e-Health Communication Technology.* Communication présentée à International Computer Software and Applications Conference, Torino, Italy (vol. 2, p. 310-313). doi:10.1109/compsac.2017.162

Danjou, C., Rivest, L., & Pellerin, R. (2017). PME 2.0 Le passage au numérique. Tiré de https://cefrio.qc.ca/media/1268/pme_20-le-passage-au-numerique.pdf

Davis, J. S. (1997). Indoor Wireless RF Channels. Tiré de http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/indoor.htm

Finnegan, J., & Brown, S. (2018). A Comparative Survey of LPWA Networking [arXiv]. *arXiv*, 10.

Flattie, A. G. (2012). *Empirical Propagation Performance Evaluation of LoRa for Indoor Environment*. Communication présentée à International Conference on Wireless Networks, Singapore.

Geng, H. (2017). Internet of things and data analytics handbook. *Internet of Things and Data Analytics Handbook*, 1-776. doi:10.1002/9781119173601

Gregora, L., Vojtech, L., & Neruda, M. (2016). *Indoor signal propagation of LoRa technology.* Communication présentée à 17th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME), Prague, Czech Republic.

GSMA.). Extended Coverage – GSM – Internet of Things (EC-GSM-IoT). Tiré de https://www.gsma.com/iot/mobile-iot-technology-ec-gsm-iot/

Haxhibeqiri, J., Karaagac, A., Van Den Abeele, F., Joseph, W., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2018). *LoRa indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study.* Communication présentée à IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA, Limassol, Cyprus (p. 1-8). doi:10.1109/etfa.2017.8247601

Haxhibeqiri, J., Van den Abeele, F., Moerman, I., & Hoebeke, J. (2017). LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements. *Sensors (Switzerland), 17*(6). doi:10.3390/s17061193

Hosseinzadeh, S., Larijani, H., Curtis, K., Wixted, A., & Amini, A. (2017). *Empirical propagation performance evaluation of LoRa for indoor environment.* Communication présentée à IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics, Emden, Germany (p. 26-31). doi:10.1109/indin.2017.8104741

Lauridsen, M., Nguyen, H., Vejlgaard, B., Kovacs, I. Z., Mogensen, P., & Sorensen, M. (2017). *Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km Area.* Communication présentée à IEEE Vehicular Technology Conference, Sydney, NSW, Australia (vol. 2017-June). doi:10.1109/VTCSpring.2017.8108182

Lavric, A., Petrariu, A. I., & Popa, V. (2019). Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis under Large-Scale, High-Density Conditions. *IEEE Access, 7*, 35816-35825. doi:10.1109/access.2019.2903157

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express, 5*(1), 1-7. doi:10.1016/j.icte.2017.12.005

Moore, N. (2015). How Many Devices Can My Access Point Support? Tiré de https://blog.aerohive.com/how-many-devices-can-my-access-point-support/

Naumann, H. (2016). *IoT-M2M-Cookbook*.

Neumann, P., Montavont, J., & Noel, T. (2016). *Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study.* Communication présentée à International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, New York, NY, United states (vol. 0). doi:10.1109/WiMOB.2016.7763213

Office québécois de la langue française. (2008). connaissances.

Office québécois de la langue française. (2017). compétences. Tiré de https://www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bibliotheque/dictionnaires/terminologie_relations_professionnelles/competence.html

Oliveira, R., Guardalben, L., & Sargento, S. (2017). *Long range communications in urban and rural environments.* Communication présentée à Proceedings - IEEE Symposium on Computers and Communications, Heraklion, Greece (vol. 0, p. 810-817). doi:10.1109/iscc.2017.8024627

Petajajarvi, J., Mikhaylov, K., Hamalainen, M., & Iinatti, J. (2016). *Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring.* Communication présentée à International Symposium on Medical Information and Communication Technology, ISMICT, Worcester, MA, United states (vol. 2016-June). doi:10.1109/ismict.2016.7498898

Petajajarvi, J., Mikhaylov, K., Pettissalo, M., Janhunen, J., & Iinatti, J. (2017). Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. *International Journal of Distributed Sensor Networks, 13*(3). doi:10.1177/1550147717699412

Petitgrand, F. (2017). Choosing an LPWAN technology for a wireless IoT network. *Electronic Products, 59*(1). Tiré de https://www.electronicproducts.com/Internet_of_Things/Wireless/Choosing_an_LPWAN_technology_for_a_wireless_IoT_network.aspx

Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. Y. (2014). How smart, connected products are transforming competition. *Harvard business review, 92*(11), 64-88. Tiré de https://search.proquest.com/docview/1612370048?accountid=40695

Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. Y. (2015). How Smart, Connected Products Are Transforming Companies. *Harvard business review, 92*(11), 97-114. Tiré de https://search.proquest.com/docview/1717473529?accountid=40695

Postscape, & Harbor Research. (2018). What exactly is the internet of things ?

Ray, B. (2017). The Past, Present, & Future of LPWAN. Tiré de https://www.link-labs.com/blog/past-present-future-lpwan

Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, 19*(2), 855-873. doi:10.1109/comst.2017.2652320

Sanchez-Iborra, R., & Cano, M.-D. (2016). State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. *Sensors (Switzerland), 16*(5). doi:10.3390/s16050708

Sigfox Canada. (2019). Sigfox Canada Unveils Country's First Coast-to-Coast Internet of Things Network.

Song, Q., Lagrange, X., & Nuaymi, L. (2017). Evaluation of macro diversity gain in long range ALOHA networks. *IEEE Communications Letters, 21*(11), 2472-2475. doi:10.1109/lcomm.2017.2732984

Ubiik. (2018a). Resources. Tiré de https://www.ubiik.com/resources

Ubiik. (2018b). Weightless Starter Kit Interface with Protocol Stack.

Weightless SIG. (2017). *Weightless-P System specifications*.

Wendt, T., Volk, F., & Mackensen, E. (2015). *A benchmark survey of long range (LoRa) spread-spectrum-communication at 2.45 GHz for safety applications.* Communication présentée à IEEE

16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference, Cocoa Beach, FL, United states. doi:10.1109/wamicon.2015.7120312

Yang, W., Wang, M., Zhang, J., Zou, J., Hua, M., Xia, T., & You, X. (2017). Narrowband Wireless Access for Low-Power Massive Internet of Things: A Bandwidth Perspective. *IEEE Wireless Communications, 24*(3), 138-145. doi:10.1109/mwc.2017.1600298

Yousuf, A. M., Rochester, E. M., & Ghaderi, M. (2018). *A low-cost LoRaWAN testbed for IoT: Implementation and measurements.* Communication présentée à IEEE World Forum on Internet of Things, WF, Singapore, Singapore (vol. 2018-January, p. 361-366). doi:10.1109/WF-IoT.2018.8355180