



## **Etat de l'art associé au projet tuteuré**

### **Matériaux communicants intelligents**

Aloïsi Axelle, aaloisi@etud.insa-toulouse.fr  
Helcmanocki Lucie, helcmano@etud.insa-toulouse.fr  
Nicolas Damien, dnicolas@etud.insa-toulouse.fr  
Yu Juan, j\_yu@etud.insa-toulouse.fr

2017-2018

Tuteurs :  
Dragomirescu Daniela  
Loubet Gaël  
Takacs Alexandre

### **Résumé du projet**

La surveillance d'état fonctionnel et du vieillissement des structures en béton armé de bâtiments présente aujourd'hui un énorme intérêt pour les industriels, autant financier que sur le plan de la sécurité civile. La mise en place de réseaux de capteurs sans fil incorporés dans les structures dès leurs constructions permettra de recueillir des informations précieuses concernant l'état de fonctionnement et le vieillissement de structures ainsi que sur les contraintes subies au fil du temps. En effet cela permet de prévenir un effondrement, ce qui coûte plus chère qu'une réparation.

Notre projet porte sur la conception d'un système de capteurs télécommunicants, intégrés dans la structure du bâtiment. Se pose alors les contraintes suivantes : transmission du signal à travers le béton armé (forte atténuation de l'onde) et limitation dans la consommation en énergie des capteurs situés dans la plaque (nécessité d'autonomie énergétique).

Nous analyserons plusieurs technologies matures ou émergentes de réseaux de capteurs (e.g. RFID, UWB, LoRA, etc.) afin d'identifier les technologies appropriées pour l'application ciblée.

# Sommaire

Sommaire .....	2
Introduction .....	4
1. Définition des besoins techniques pour le développement du réseau de capteurs.....	6
1.1. Lien de communication entre nœuds sensitifs et nœud communicant .....	6
1.1.1. Les contraintes inhérentes au lien de communication nœud sensitif/nœud communicant.....	6
1.1.2. Choix de conception du lien.....	7
1.2. Lien de communication entre nœuds communicants .....	7
1.2.1. Les contraintes inhérentes au lien entre nœuds communicants.....	7
1.2.2. Choix de conception du lien.....	8
2. Différentes possibilités de technologies sans fil .....	9
2.1 Technologie RFID .....	9
2.1.1 Présentation des tags RFID .....	9
2.1.2 Bandes de fréquences.....	10
2.1.3 Fonctionnement des systèmes RFID .....	10
2.2 Technologie NFC .....	12
2.2.1 Définition du NFC .....	12
2.2.2 Fonctionnement d'un système NFC.....	13
2.3 Technologie Ultra Wide Band .....	14
2.3.1 Définition de l' <i>Ultra Wide Band</i> .....	14
2.3.2 L'UWB à Impulsion en Séquence Directe et l'UWB multibandes .....	16
2.4 Sigfox.....	18
2.4.1 Définition de la technologie de Sigfox .....	18
2.4.2 Caractéristiques techniques d'un système Sigfox.....	19
2.5 LoRaWAN et LoRa .....	20
2.5.1 Réseau LoRaWAN et technologie radio LoRa : définitions et fonctionnements ....	20
2.5.2 Caractéristiques techniques de LoRa et LoRaWAN.....	21
2.6 Technologie <i>Bluetooth</i> .....	22
2.6.1 Définition du <i>Bluetooth</i> .....	22
2.6.2 Fonctionnement et caractéristiques du <i>Bluetooth</i> .....	23
2.7 Technologie <i>ZigBee</i> .....	23
2.7.1 Définition de la technologie <i>ZigBee</i> .....	23

2.7.2 Propriétés techniques de la technologie <i>ZigBee</i> .....	24
2.7.3 Récapitulatif des caractéristiques techniques principales de la technologie <i>ZigBee</i>	24
2.8 Technologie par ondes sonores.....	25
3. Choix des technologies pour les deux niveaux de communications .....	25
3.1 Technologie proposée pour le lien de communication entre nœuds sensitifs et nœud communicant .....	25
3.2 Technologie(s) adéquate(s) pour le lien de communication entre les nœuds communicants.....	26
Conclusion.....	28
Références bibliographiques .....	29
Table des illustrations.....	32

# Introduction

La majeure partie des bâtiments et ouvrages d'art appartenant à notre quotidien sont fabriqués en béton armé. Ce matériau est privilégié dans les constructions pour sa solidité et sa durabilité. Cependant outre les dégradations dues aux problèmes de qualité du béton, il existe plusieurs phénomènes naturels qui accélèrent la dégradation du matériau (carbonations, attaque par chlorure/sulfate, cycle gel dégel pour certains bétons spécifiques, alcali-réaction, altération du terrain par secousses sismiques).

Il est donc pertinent de pouvoir évaluer en temps réel l'évolution de l'état et les contraintes exercées sur la structure, pour éviter des catastrophes humaines ou économiques. De plus la mise en place d'une surveillance automatique via un système de capteurs serait moins onéreuse que l'expertise régulière de l'état de la structure par un agent. Elle permettrait également d'anticiper les dégradations. Ce constat amène à la nécessité de pouvoir établir un réseau de capteurs à l'intérieur des matériaux.

Ainsi, dans le cadre de l'Unité de Formation Projet de Recherche Tutoré visant à familiariser les étudiants avec le monde de la recherche, nous avons choisi de travailler sur les matériaux communicants pour les BIM (Modélisation des Informations pour le Bâtiment).

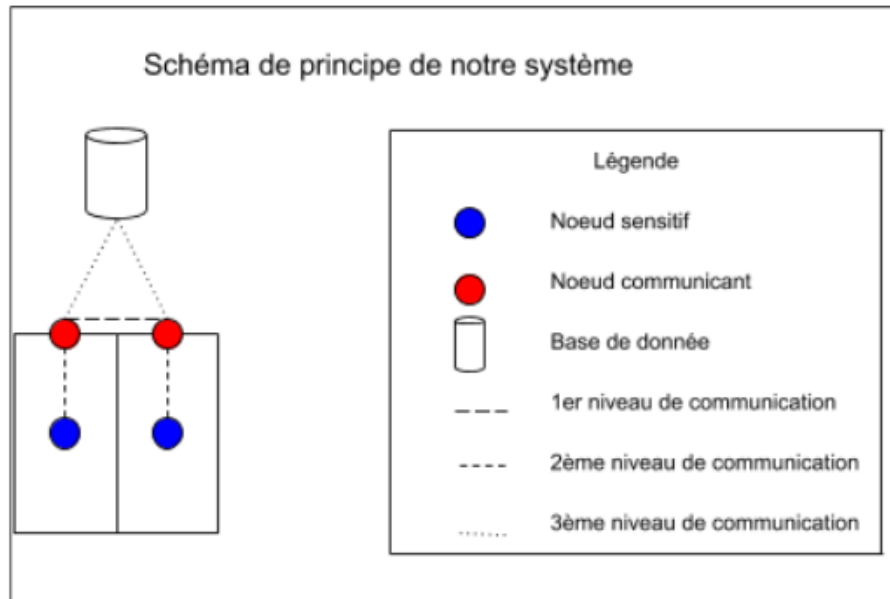
Ce document fait l'état de l'art des différentes technologies envisageables pour créer un système de capteurs enfouis dans des plaques de béton armé d'un bâtiment.

Pour structurer nos recherches, nous nous sommes basés sur un système en trois niveaux de communication.

Le premier niveau de communication se situe entre les nœuds sensitifs (les capteurs au sein du béton armé) et un nœud communicant placé en surface. Le deuxième niveau représente la communication entre les différents nœuds communicants. Le troisième niveau se situe entre les nœuds communicants et la base de données, mais ce niveau n'est pas exploré dans ce document.

Pour nous absoudre de plusieurs contraintes nous avons fait l'hypothèse de la préfabrication de la pièce de béton armé, ce qui nous permet de mettre de côté des problématiques de fabrication et de nous concentrer sur la partie post-fabrication du cycle de vie de notre pièce. Ainsi on ne s'occupera pas de l'enfouissement des capteurs au sein de la structure.

Dans un premier temps nous avons cherché les différentes problématiques associées au projet. Nous vous présenterons dans une première partie nos hypothèses et les contraintes qu'elles engendrent. Puis dans une deuxième partie, nous verrons les technologies de communication existantes qui pourraient s'adapter à notre projet. Dans une troisième et dernière partie nous verrons les avantages et inconvénients de chacune de ces technologies, appliquées dans le cadre de notre projet.



**Schéma de principe de notre système<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Renvoie à la référence [1] dans la table des illustrations

# **1. Définition des besoins techniques pour le développement du réseau de capteurs**

Dans cette première partie, nous allons définir les propriétés en termes de débit, de propagation, de portée ou encore de consommation d'énergie que nous recherchons dans une technique de transmission pour qu'elle soit applicable à notre objectif d'utilisation. Nous allons présenter deux cas de figure différents pour les deux types de liens de communication présents dans notre réseau de capteurs.

## **1.1. Lien de communication entre nœuds sensitifs et nœud communicant**

Cette partie traite du premier niveau de communication, c'est à dire du lien entre les nœuds sensitifs et les nœuds communicants. Nous formons l'hypothèse que notre transmission est unidirectionnelle et que seul le nœud sensitif envoie des données à un nœud communicant. Nous sommes donc dans une situation où un nœud sensitif à l'intérieur de la structure préfabriquée en béton armé doit envoyer des informations à un nœud communicant situé en surface de la structure.

### **1.1.1. Les contraintes inhérentes au lien de communication nœud sensitif/nœud communicant**

La transmission du signal doit être faite entre le nœud sensitif (capteur) situé dans la plaque de béton armé et le nœud communicant placé en surface de la plaque. Le signal émis doit ainsi pouvoir traverser la paroi de béton armé afin d'être transmis au nœud communicant situé en surface. Il est donc nécessaire de prendre en compte la propagation du signal dans le béton armé et son atténuation, ainsi que le changement de milieu béton armé-air, le nœud communicant étant placé à l'extérieur.

Le béton armé est un matériau composite constitué de béton et d'une structure métallique.

Le béton est composé d'un mélange de sable (31%), gravier (grains minéraux de tailles variables) (43%), ciment (17%), le tout gâché avec de l'eau (9%). C'est un matériau résistant à la compression mais sensible à la traction [1]. On ajoute donc au béton une armature métallique en acier résistante à cette dernière. Ces tiges peuvent être en acier carbone ou en acier inox selon la fabrication et leur diamètre peut varier entre 5 et 50 mm. L'association de ces composants est à l'origine du béton armé, plus solide et durable que le béton ordinaire.

Ce mélange de composants doit être pris en compte dans l'étude de la transmission de notre signal. Nous n'avons malheureusement pas trouvé à ce jour, dans la littérature, d'étude sur la propagation d'un signal dans le béton armé.

Un autre point important est la consommation énergétique de notre système. Le capteur étant enfoui au sein de la plaque, il doit être autonome sur le plan énergétique. En effet le capteur est inséré lors de la fabrication de la plaque de béton armé et aucun changement de batterie ou autre source d'alimentation ne pourra être envisagé au cours de la durée de vie du produit.

### **1.1.2. Choix de conception du lien**

Cette partie vise à préciser notre représentation des caractéristiques que doit respecter le lien entre le nœud sensitif et le nœud communicant par certaines hypothèses de conception de ce dernier.

De par les contraintes explicitées précédemment, nous savons que la technologie de transmission que nous cherchons à employer doit permettre au nœud sensitif de pouvoir fonctionner sans batterie, il doit pouvoir être, dans la mesure du possible, autosuffisant. Il faut également que la propagation dans le béton armé puisse se produire ainsi que le changement de milieu béton armé, air. La portée doit être telle que le nœud sensitif puisse transmettre des données au nœud communicant situé sur sa plaque. Nous sommes donc dans un besoin de portée de l'ordre d'une dizaine de mètres.

Il reste cependant certains choix de conception à faire, particulièrement en termes de débit, en effet nous allons maintenant devoir définir les capacités du nœud sensitif en termes d'envoi d'information sachant que nous sommes limités par la contrainte énergétique. Le nœud sensitif peut se contenter de servir de capteur des paramètres élémentaires de la structure tels que l'humidité ou encore la température.

La prise de mesures ne nécessiterait ni un nœud sensitif d'une grande complexité ni que ce dernier ne réalise de nombreux calculs, ce qui permettrait une économie d'énergie certaine. De plus la quantité de données à envoyer serait faible, nous pourrions donc nous contenter d'émissions à débits faibles sur une courte période de temps minimisant encore la consommation d'énergie par le nœud sensitif.

Si notre objectif était de récupérer un plus grand nombre d'informations, notamment pour faire de la détection ou de la localisation de fissures pour surveiller l'état de la structure, il faudrait pouvoir réaliser des études fréquentielles donc avoir un plus grande capacité de calcul et de prise d'informations sur le nœud sensitif qui consommerait donc plus d'énergie. Par la suite il faudrait acheminer cette plus grande quantité de données vers le nœud communicant, il faudrait donc trouver un compromis entre la durée d'émission et le débit pour optimiser la consommation d'énergie.

Nous parlerons des contraintes sur les nœuds communicants dans la partie suivante tout en gardant à l'esprit que sur ce premier lien, le nœud communicant se contente d'être le récepteur de données provenant de plusieurs nœuds sensitifs, tous les nœuds de sa plaque.

## **1.2. Lien de communication entre nœuds communicants**

Dans ce deuxième cas, nous allons traiter la situation où des nœuds communicants, qui en adéquation avec l'hypothèse de la partie précédente sont situés en surface de la structure préfabriquée, sont amenés à communiquer.

### **1.2.1. Les contraintes inhérentes au lien entre nœuds communicants**

Les différents nœuds communicants d'un même bâtiment doivent pouvoir communiquer entre eux. Comme ces derniers sont situés en surface des plaques, le signal doit être suffisamment fort pour traverser de possibles obstacles situés entre les nœuds communicants (principalement d'autres plaques de béton armé).

On émet l'hypothèse qu'un nœud communicant n'a besoin de communiquer qu'avec ses plus proches voisins et non pas avec l'ensemble des nœuds du bâtiment. Cela nous permet de faire la seconde hypothèse que la distance de communication nécessaire peut être limitée à une dizaine de mètres.

Au niveau des nœuds communicants, nous sommes sur une topologie maillée où la communication multi sauts est envisageable. Cela signifie d'une part qu'un nœud peut être connecté à plusieurs autres nœuds à sa portée radio et d'autre part que les différents nœuds vont pouvoir communiquer entre eux par l'intermédiaire d'autres nœuds même s'ils ne sont pas directement reliés. Sachant qu'il y a un nœud communicant par plaque de béton armé, il serait judicieux de rechercher une portée comprise entre une dizaine et une centaine de mètres.

### **1.2.2. Choix de conception du lien**

Dans le cas du lien de communication entre les nœuds communicants, nous sommes plus libres au niveau des contraintes puisqu'il s'agit d'une communication dans l'air, c'est à dire le cas le plus standard. De plus comme le nœud est situé à l'extérieur de la structure en béton armé, nous sommes moins contraints en termes d'énergie car même une technologie avec des nœuds fonctionnant sur batterie est envisageable. En effet, il n'est pas impensable de pouvoir changer une batterie dans le cas des nœuds communicants étant donné qu'ils sont accessibles.

Nous choisissons l'hypothèse selon laquelle les nœuds communicants peuvent posséder une batterie, qui peut être changée au bout d'un certain temps. Cela nous permet d'envisager un nœud avec une plus grande capacité de calcul et de traitement de données puisqu'il va recevoir des données venant de plusieurs nœuds sensitifs d'une part et également d'autres nœuds communicants. La batterie ne doit cependant pas être changée ni rechargée trop souvent, elle doit avoir une durée de vie raisonnable.

En termes de débit nous allons tenter de privilégier la technologie qui nous offrira le plus grand débit possible tout en respectant les contraintes et les hypothèses formulées précédemment.

Enfin, une des réquisitions du projet est que l'on puisse suivre et traquer les éléments lors de la construction. Pour cela, nous faisons l'hypothèse d'un nœud communicant qui puisse être identifiable, permettant ainsi de connaître sa position, donc de savoir s'il est encore en entrepôt ou sur la zone de construction.

Une fois les spécificités de chaque niveau de communication posées, il faut maintenant chercher les technologies existantes sur le marché qui pourraient répondre aux besoins de notre projet.



## 2. Différentes possibilités de technologies sans fil

Cette partie présente les différentes technologies sans fil existantes qui pourraient être envisagées dans le cadre de notre projet. Nous définirons leurs fonctionnements et leurs spécificités.

### 2.1 Technologie RFID

#### 2.1.1 Présentation des tags RFID

Comme le définit le Centre National de référence RFID [2], la *Radio Frequency Identification* est une technologie “sans-contact” qui permet l’identification par rayonnement radio fréquence d’un objet. Cette technique permet d’identifier des objets possédant une étiquette RFID (appelé aussi tag RFID ou transpondeur) quand ils sont approchés d’un interrogateur RFID (appelé aussi station de base). [2]

Les tags RFID [3] peuvent être de trois types différents selon qu’ils possèdent ou non un émetteur RF (Radio Fréquence) :

- **passif** : les informations sont transmises par rétrodiffusion, l’interrogateur émet une onde qui est réfléchiée et modulée par le transpondeur afin de transmettre l’information. Il n’intègre pas d’émetteur RF et ne fonctionne donc qu’en lecture seule. L’interrogateur doit également se trouver à proximité.
- **semi-actif** : fonctionne également par rétrodiffusion du signal mais il possède une alimentation embarquée supplémentaire (pile ou batterie) qui lui permet d’alimenter tout autre circuit ou capteurs connectés à son circuit initial de manière autonome. Il ne possède pas d’émetteur. Cette technologie est utilisée pour les applications nécessitant une capture d’information (température, lumière, etc.)
- **actif** : possède une source d’énergie embarquée et un émetteur RF qui permet à la puce de transmettre elle-même un signal vers un lecteur RFID sans que celui-ci ne l’ait interrogé. Elle permet également une lecture à plus grande distance.

Il existe plusieurs types de tag RFID :

- **SAW (Surface Acoustic Wave)** : connu sous le nom de code à barres RF, il ne comporte pas de circuits intégrés. C’est un transpondeur à lecture seule.
- **transpondeur 1 bit** : système passif possédant un seul bit qui permet d’indiquer ou non la présence du tag. Il est principalement utilisé pour les systèmes d’antivol.
- **à circuits intégrés** : composé d’une antenne permettant d’émettre et recevoir et d’une puce qui contient les informations d’identification de l’objet. Cet identifiant est inscrit en dure dans le circuit électronique. L’identifiant ne peut être modifié ultérieurement, il ne peut qu’être lu. C’est le tag le plus répandu.

Certains tags RFID à circuits intégrés peuvent posséder une zone mémoire supplémentaire modifiables, d’une taille de quelques bits à une dizaine de kilobits.

Dans le cas de notre projet il apparaît que seul le tag RFID à circuit intégré pourrait être une solution pour le capteur, avec une zone mémoire afin de stocker les informations collectées,

bien que le volume d'informations reste très réduit. Nous allons donc nous concentrer sur cette technologie dans la suite de cette partie.

### 2.1.2 Bandes de fréquences

La RFID utilise des bandes fréquentielles appartenant à la bande ISM (*Industrial-Scientific-Medical frequency range*) libre de droit. Cette bande est néanmoins soumise à des réglementations, en accords avec celles-ci les bandes de fréquences utilisées sont les suivantes [4] :

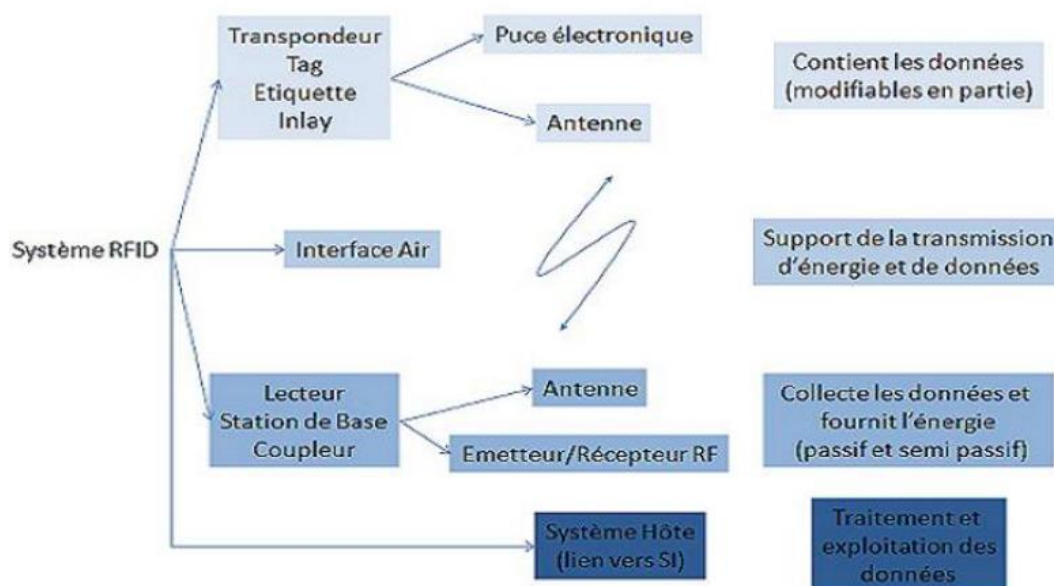
- basses fréquences ou LF (*Low Frequency*) pour les fréquences de 125 à 135 kHz,
- hautes fréquence ou HF (*High Frequency*) pour les fréquences autour de 13.56 MHz,
- ultra-hautes fréquences ou UHF (*Ultra High Frequency*) de 860 à 960 MHz,
- micro-ondes ou SHF (*Super High Frequency*) pour les fréquences autour de 2.45 GHz.

La fréquence utilisée par les interrogateurs dépend du type d'application visé et les performances recherchées. Par exemple les distances de lecture vont de 10 à 50cm en Basse Fréquence et d'environ 10 mètres en Supra Haute Fréquence.

Les fréquences influencent également le débit de transmission. L'UHF permet un transfert de données à 112 Mbits/s, plus rapide que la LF ou la HF limité à 424 Kbits/s.

### 2.1.3 Fonctionnement des systèmes RFID

Nous avons vu que le système RFID est constitué d'un transpondeur (tags RFID à circuits imprimés dans notre cas) et d'un ou plusieurs interrogateurs (stations de base) permettant de transmettre de l'énergie et des données à distances.

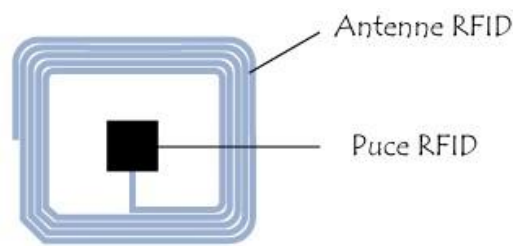


#### Fonctionnement du système RFID<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Renvoie à la référence [2] dans la table des illustrations

**L'interrogateur RFID** est un composant actif qui émet des ondes électromagnétiques à une fréquence donnée, choisie selon le besoin. Le signal transmis permet d'activer les tags RFID en leur fournissant l'énergie nécessaire pour fonctionner. Il permet par exemple d'interroger le tag quant à son identification numérique. Le tag renvoi alors l'information demandée.

**Un tag RFID** est un dispositif récepteur placé sur l'élément à identifier. Il est composé d'une puce contenant l'information, reliée à une antenne permettant de transmettre les échanges d'informations. Le type d'antenne est choisi en fonction de la bande de fréquences utilisée pour la transmission.



**Schéma d'un tag RFID<sup>3</sup>**

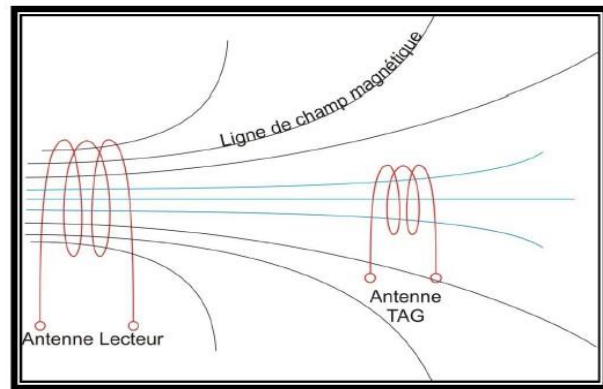
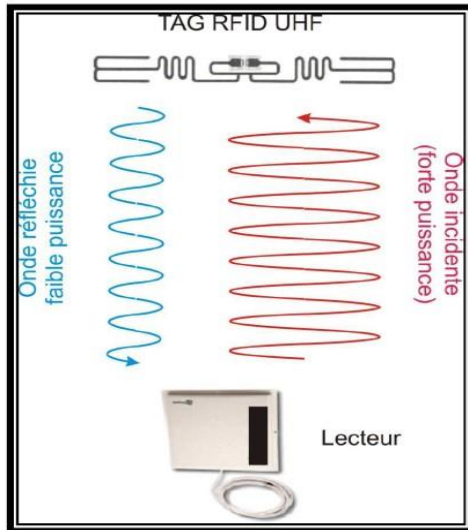
Lors de la communication entre l'interrogateur et le tag RFID, on parle de couplage entre les deux composants.

Dans un champ proche, de quelques centimètres à 1.5 mètre, le couplage est magnétique et se fait sur les bandes de fréquences LF (basses fréquences) et HF (hautes fréquences). Les antennes RFID utilisées sont alors des boucles inductives.

Dans un champ lointain, jusqu'à 10 mètre, le couplage est électrique et se fait sur les bandes de fréquences UHF (Ultra Hautes Fréquences) ou SHF (Super Hautes Fréquences). Les antennes RFID sont alors des antennes dipôles ou patchs. [5]

---

<sup>3</sup> Renvoie à la référence [3] dans la table des illustrations



Couplage Electrique  
UHF et SHF  
Champ lointain

Couplage Magnétique  
HF et LF  
Champ proche

### Couplages de communication en RFID<sup>4</sup>

Cependant la RFID n'intègre pas ou peu de sécurité. Des problèmes peuvent se poser, par exemple dans le cas d'éventuelles interceptions ou écoutes du signal transmis. De plus les tags basiques ne nécessitent pas d'authentification du lecteur pour communiquer (utilisation de lecteur malveillant).

## 2.2 Technologie NFC

### 2.2.1 Définition du NFC

Comme le définit le Centre National de référence RFID [6], le NFC (Communication en Champ Proche) est un standard de communication par radiofréquence basé sur les principes du RFID. Cependant il ne fonctionne qu'en champ proche (distance de communication de quelques centimètres) et utilise la bande HF (Haute Fréquence) à 13.56 MHz.

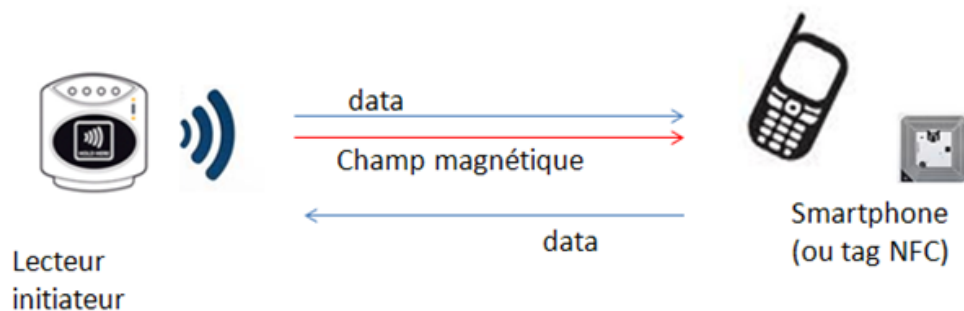
Cette spécificité répond à un critère de sécurité quant à la communication entre deux appareils électroniques. Elle permet également une faible consommation énergétique. Les débits de transmissions sont de 106, 212 ou 424 kbit/s.

<sup>4</sup> Renvoie à la référence [4] dans la table des illustrations

### 2.2.2 Fonctionnement d'un système NFC

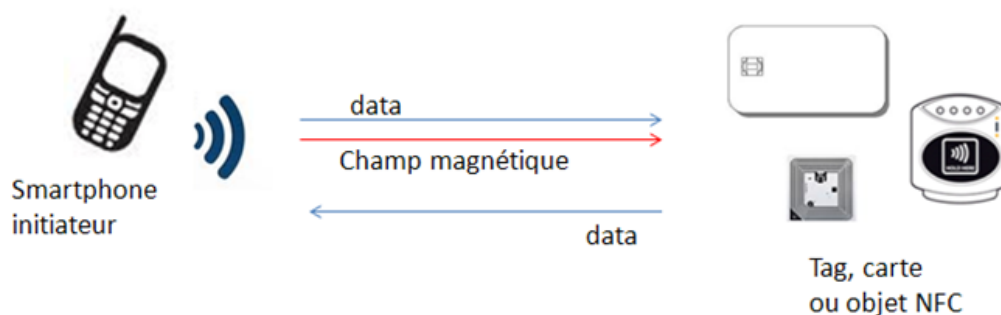
Un système NFC, appelé aussi “*NVC Device*”, comporte trois modes de communications qui lui permettent de s'adapter : émulation de carte, lecteur et Peer-to-Peer. En fonction du contexte le système choisi le mode le plus pertinent quant à l'application [7].

Dans le mode émulation de carte le *NFC Device* fonctionne comme un tag RFID en mode passif et communique ainsi par rétrodiffusion du signal reçu. Cependant, à l'instar du tag RFID qui fonctionne uniquement grâce à l'énergie transmise par l'interrogateur, le tag NFC peut demander plus d'énergie pour communiquer.



**Schéma du fonctionnement du mode émulation de carte<sup>5</sup>**

En mode lecteur le *NFC Device* se comporte comme un lecteur RFID (appelé aussi interrogateur). La communication est initiée par l'émission d'un champ magnétique par le NFC, qui peut ensuite envoyer une commande à la cible. Cette dernière répond alors par rétrodiffusion de l'onde incidente. La cible peut être un tag mais également un autre *NFC Device* en mode émulation de carte.



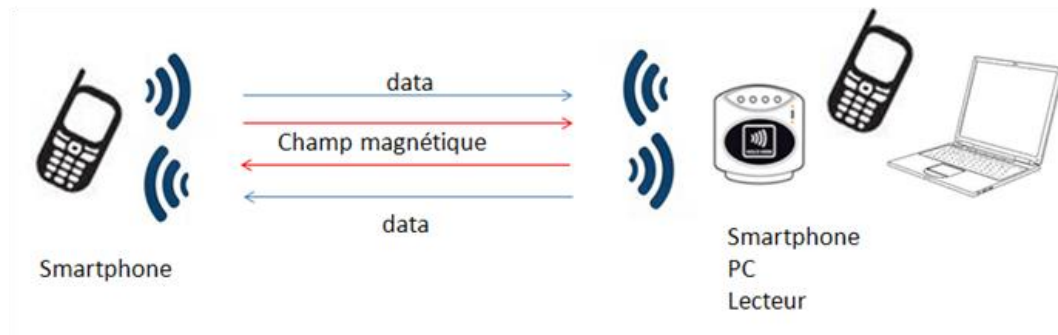
**Schéma du fonctionnement du mode lecteur<sup>6</sup>**

Le mode *Peer-to-Peer* permet à deux *NFC Devices* semblables (même niveaux de performance) d'échanger mutuellement des informations, en émettant ou recevant tour à tour de l'information.

<sup>5</sup> Renvoie à la référence [5] dans la table des illustrations

<sup>6</sup> Renvoie à la référence [6] dans la table des illustrations

Ce mode demande cependant un protocole de communication plus lourd que les modes lecteur/émulation de carte, avec l'ajout de la gestion de la répartition des rôles entre les deux *NFC Device*. Cela a pour conséquence un débit plus faible et une communication plus lente.



**Schéma du fonctionnement du mode Peer-to-Peer<sup>7</sup>**

Pour conclure, par rapport au RFID, le NFC intègre de la sécurité dans son système. De plus il possède plusieurs modes, chaque composant NFC n'est ainsi pas restreint à un seul rôle comme en RFID. L'envoi de requête peut être bidirectionnelle.

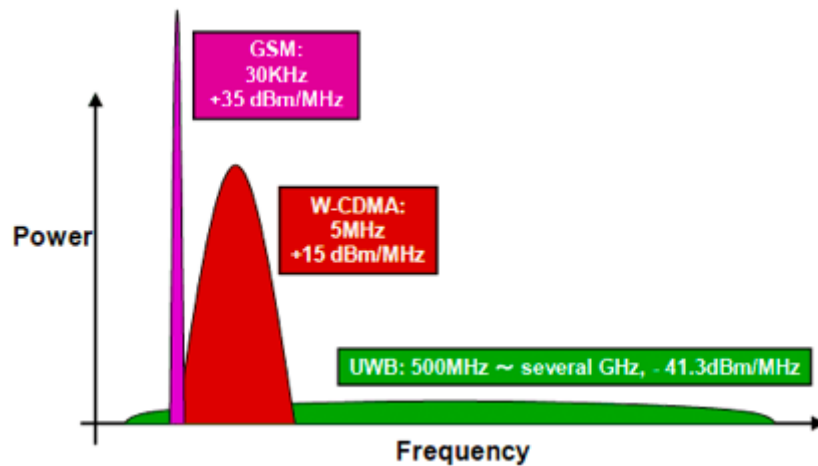
## 2.3 Technologie Ultra Wide Band

### 2.3.1 Définition de l'*Ultra Wide Band*

L'*Ultra Wide Band* (UWB), en français Ultra Large Bande définit un type de transmission qui occupe une large bande passante de l'ordre de plusieurs GigaHertz et qui permet une transmission de données à un débit très élevé [8, p1-2]. Les systèmes UWB sont ainsi définis par la *Federal Communications Commission* (FCC) [9, p106] comme « *tout système émettant un signal dont le rapport largeur de bande sur la fréquence centrale est supérieur à 20 % ou dont la largeur de bande est supérieure à 500MHz.* ». Le fait d'utiliser une bande passante très large permet d'obtenir une faible densité spectrale de puissance.

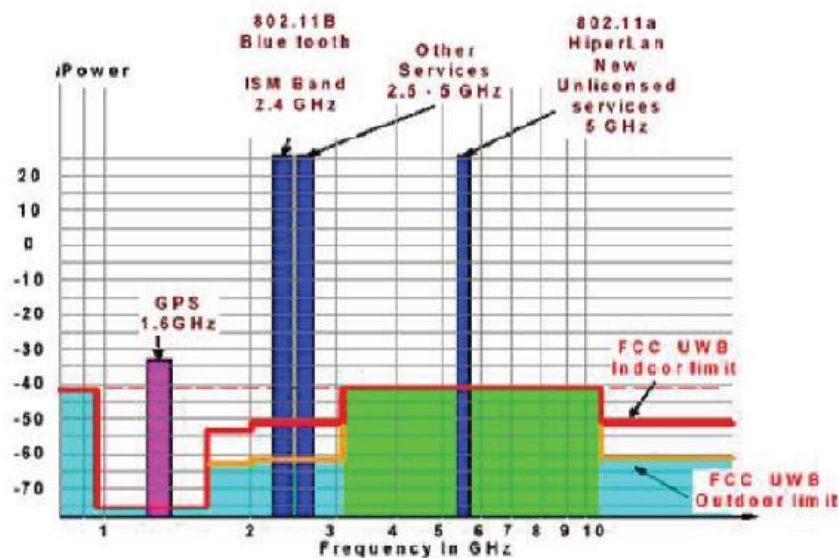
---

<sup>7</sup> Renvoie à la référence [7] dans la table des illustrations



### Energies de trois techniques sans fil en fonction de leurs bandes passantes<sup>8</sup>

Nous voyons sur la figure ci-dessus que la technologie UWB chevauche les bandes de fréquences de plusieurs autres technologies, donc pour éviter tout risque d'interférences, la puissance limite utilisable en UWB est très encadrée par des organismes régulateurs tels que la FCC aux Etats-Unis et l'*Electronic Communications Committee* (ECC) en Europe. Le premier définit un masque de puissance pour les dispositifs UWB et le second fixe des règles par bande qui sont plus strictes que l'organisme américain. Ceci vient notamment du fait qu'en Europe un signal est considéré comme non perturbateur à partir du moment où le rapport Interférence sur Bruit (I/N) est inférieur à -20dB alors qu'aux Etats-Unis il suffit d'un rapport inférieur à 0dB [10, p8-10]. Ainsi fait, l'UWB permet de passer sous le seuil du bruit et donc de ne pas interférer avec les autres types de réseaux présents sur les mêmes bandes de fréquences.



### Masques des puissances autorisées par la FCC<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Renvoie à la référence [8] dans la table des illustrations

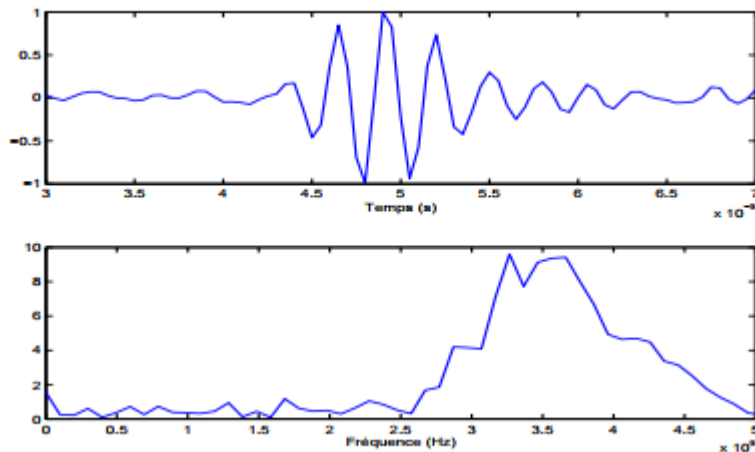
<sup>9</sup> Renvoie à la référence [9] dans la table des illustrations



### 2.3.2 L'UWB à Impulsion en Séquence Directe et l'UWB multibandes

Il existe deux grandes technologies UWB sans fil, la technologie d'impulsion radio (IR : *Impulse Radio*) préconisée par l'UWB Forum (pour la partie séquence directe) et la *Multiband Orthogonal Frequency-Division Multiplexing* (MB-OFDM) soutenue par l'alliance WiMedia [8, p25-35].

La technologie d'impulsion radio est une technologie sans porteuse qui consiste en l'émission d'une série d'impulsions en bande de base. Les impulsions sont très courtes, généralement sous la nanoseconde et de faible énergie. Leurs durées très faibles font d'elles des impulsions larges bandes [11, p 117-119], [12].



#### Représentation temporelle et spectrale d'un pulse élémentaire<sup>10</sup>

Pour coder les informations à transmettre, il y a plusieurs types de modulations des impulsions envisageables dont les trois plus connues sont la Modulation de la Position de l'Impulsion -PPM (*Pulse Position Modulation*) -, la modulation Tout ou Rien - OOK (*On Off Keying*) - et la modulation à deux états de phase - BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

La PPM consiste à coder les différents symboles grâce à un décalage temporel de la position de l'impulsion. La modulation OOK est quant à elle une modulation d'amplitude qui selon le symbole à transmettre va émettre l'impulsion au moment prévu ou non. La modulation BPSK consiste à multiplier l'impulsion par 1 ou par -1 en fonction du symbole à transmettre. La modulation PPM est intéressante au niveau de la périodicité qu'elle permet généralement d'éliminer ce qui permet une meilleure répartition de la puissance sur toute la bande de fréquence. C'est également une modulation assez simple et qui permet en même temps de distinguer un grand nombre d'états donc de symboles différents. La modulation OOK permet également de s'affranchir de la périodicité du signal et il s'agit également d'une modulation simple à mettre en place aussi bien en émission qu'en réception. Elle a par rapport à la PPM la possibilité de multiplier par 2 la puissance des impulsions tout en gardant une même puissance moyenne ce qui facilite la détection des impulsions en réception. Dans le cas de la dernière modulation nous pouvons aussi nous défaire de la périodicité du signal, de plus nous pouvons nous contenter d'un rapport Signal/Bruit supérieur à celui en PPM et enfin comme la position de l'impulsion ne varie pas, la synchronisation de toute la chaîne d'émission/réception et

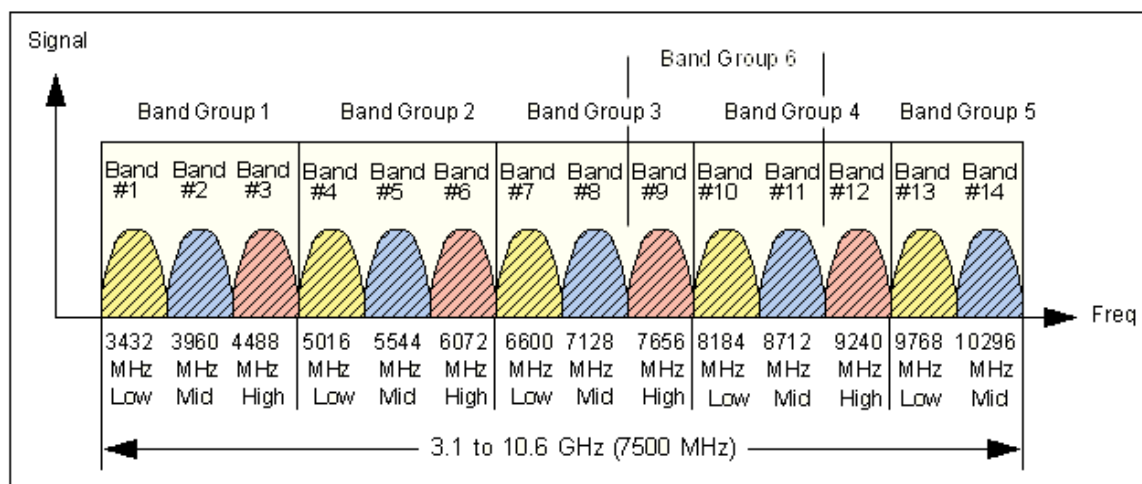
<sup>10</sup> Renvoie à la référence [10] dans la table des illustrations



facilitée. Cependant, cette modulation est limitée en termes d'états possibles, et donc en nombre de symboles codables [10, p16-17].

Parmi les techniques d'impulsion radio, nous trouvons deux techniques multi utilisateurs très utilisées, l'Ultra Large Bande à Séquence Directe -DS-UWB (*Direct Sequence Ultra Wide Band*) - et l'Ultra Large Bande à Saut Temporelle - TH-UWB (*Time Hopping Ultra Wide Band*). Le saut temporel se fait par la transmission des impulsions à des instants définis en une séquence pseudo-aléatoire et en modulant chaque impulsion à l'aide d'une des modulations précédentes en particulier la modulation PPM. L'accès multiple se fait ensuite par l'attribution de codes différents à chaque utilisateur. Quant à la séquence directe il s'agit d'envoyer les impulsions au taux le plus élevé possible afin de créer un train de bits. Une des modulations les plus utilisées en séquence directe est la modulation BPSK. Des codes de séquences directes peuvent également être appliqués à la transmission comme pour le saut temporel [11, p 117-119, 126,127], [13], [14, p 541,542].

Dans le cas du MB-OFDM, la bande de fréquences réglementée par la FCC comme utilisable pour les technologies UWB qui est la bande de 3.1 GHz à 10.6 GHz, soit 7500 MHz est divisée en 14 bandes de fréquences complètement disjointes de 528 MHz chacune. Ces bandes de fréquences sont elles-mêmes regroupées en 6 groupes de 3 bandes chacun [15], [8, p55,56].



### **Bandes de fréquences dans le MB-OFDM<sup>11</sup>**

Chaque bande fournit une fréquence de porteuse et permet donc une transmission simultanée des porteuses multiples. Le MB-OFDM permet de s'adapter à des zones où il y a de fortes interférences puisqu'il est possible de dynamiquement éteindre une certaine porteuse et ainsi respecter les réglementations [11, p123].

Si nous comparons les deux technologies, le MB-OFDM demande des efforts en termes de synchronisation et de complexité de l'émetteur, de plus, nous sommes face à des pics d'énergie qui sont plus élevées qu'avec l'IR. Ce dernier présente une plus grande simplicité, un faible coût de mise en place et une plus faible consommation d'énergie [11, p126-127].

<sup>11</sup> Renvoi à la référence [11] dans la table des illustrations

### 2.3.3 Caractéristiques techniques principales de l'Ultra Wide Band

Nous allons présenter ici un récapitulatif des caractéristiques de l'UWB en termes de débit, de distance de propagation et de consommation d'énergie afin de pouvoir juger de la pertinence d'utilisation de cette technique de communication sans fil avec l'un ou l'autre des aspects de notre projet - communication nœud sensitif-nœud communicant ou nœud communicant-nœud communicant.

	MB-UWB	DS -UWB
Fréquences	<b>3.1GHz-10.6GHz</b> réparties en 14 bandes disjointes formant 6 groupes de bandes de fréquences	3.1GHz-10.6GHz séparées en 2 bandes, une obligatoire de <b>3.1 à 4.9 GHz</b> dite bande basse et une bande optionnelle de <b>6.2 à 9.7 GHz</b> dite bande haute.
Débit	<b>200 Mbps à 480 Mbps</b> en fonction de la portée et du codage	<b>220 Mbps à 1320 Mbps</b> en fonction de la portée et du codage
Consommation d'énergie	à 200 Mbps puissance de <b>transmission de 93mW</b> , puissance en <b>réception de 169mW</b> et puissance en cours de <b>sommeil de 15μW</b>	faible énergie d'émission sur une faible portée, puissance de pic plus faible qu'en MB-UWB
Interférences	<b>Flexibilité spectrale</b> en éteignant une porteuse pour limiter les interférences. Possible <b>interférences inter-porteuses</b> . Si non capture de l'énergie du <b>multi trajet</b> possible détérioration des performances	Sur une <b>large bande</b> , donc <b>multiples interférences</b> mais en même temps la densité spectrale est plus basse donc <b>moins d'interférences causées aux autres systèmes</b> .
Portée	<b>entre 3 et 10 mètres</b>	<b>entre 2 et 13 mètres</b>

**Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de l'UWB<sup>12</sup> [11], [15], [16], [17, p 491]**

## 2.4 Sigfox

### 2.4.1 Définition de la technologie de Sigfox

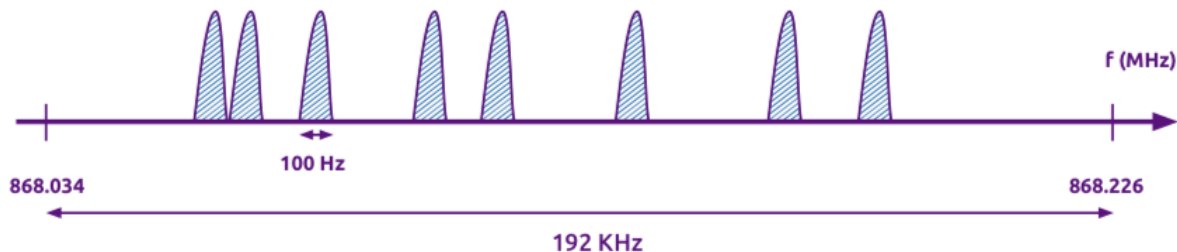
Sigfox [18] est une société qui a créé le premier réseau d'objets connectés sans fil dont les fonctions complexes ne sont pas réalisées au sein des objets (par exemple des capteurs) mais dans le *Cloud*. Ceci permet une consommation d'énergie plus faible et un coût des objets moindre. Sigfox fonctionne sur un modèle d'abonnement de chaque objet connecté. Pour être relié au réseau, il faut s'abonner par Sigfox. La technologie employée pour permettre ces

---

<sup>12</sup> Renvoie à la référence [12] dans la table des illustrations

communications longues distances et à faible coût énergétique s'appelle LPWAN - *Low Power Wide Area Network*.

Les transmissions Sigfox se font sur des bandes de fréquences radio publiques et libres, les bandes ISM (Industriel, Scientifique et Médical) 868 MHz en Europe et 902 MHz aux Etats-Unis [19].



### **Technologie Sigfox UNB<sup>13</sup>**

#### 2.4.2 Caractéristiques techniques d'un système Sigfox

Les stations et les objets appartenant au réseau Sigfox possèdent un identifiant qui permet d'identifier leurs messages sur le réseau [20]. Sigfox propose une haute qualité de service, une forte résistance aux interférences, une haute efficacité énergétique, une longue portée et une bonne capacité de réseau [19], [21].

Ainsi, les émissions se font en utilisant la technique de bande ultra étroite ou UNB (*Ultra Narrow Band*), avec des émissions de 100 Hz de large en Europe sur des bandes de fréquences de 200 kHz, ce qui en prenant une marge de 10% pour éviter les collisions permet une transmission simultanée de 200 messages sur le réseau sur qui démontre une bonne capacité du réseau. Cependant la réglementation veut que chaque objet ne puisse pas communiquer plus de 1% du temps ce qui est équivalent à environ 30 secondes par heure ou encore 6 messages par heure. Cela constitue une limitation de la capacité du réseau.

La haute qualité de service promise vient en partie de la topologie en étoile du réseau. En effet, il est pensé de telle sorte que les objets soient connectés à plusieurs stations de base qui vont toutes recevoir les messages diffusés par l'objet. De plus, il y a également la mise en place d'une diversité temporelle et fréquentielle permettant d'acquérir une redondance supplémentaire. C'est cette redondance qui va permettre de prétendre à une haute qualité de service.

Pour les mêmes raisons, Sigfox est résistant aux interférences. De fait, Sigfox opère sur des bandes ISM donc il doit coexister avec toutes les technologies déployées sur ces bandes de fréquences. Les diversités temporelle et fréquentielle qui voient les données transmises dans trois trames radio consécutives par différentes sous porteuses aléatoires ainsi que la diversité spatiale, la transmission du message à plusieurs stations, permettent de lutter contre les interférences. De plus, l'utilisation de l'UNB permet une concentration de puissance dans une petite bande de fréquences permettant de ne pas tenir compte d'autres signaux à spectres plus étalés puisque le signal Sigfox apparaîtra alors plus puissant pour le récepteur dans la limite de la portée.

La sensibilité des stations de base qui vont recevoir les transmissions dépendent de la modulation utilisée et du débit. Pour une modulation simple DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) et un débit de données faible, la sensibilité de la station de base est très haute ce

<sup>13</sup> Renvoie à la référence [13] dans la table des illustrations

qui permet d'augmenter la portée. Sigfox, avec un débit très faible de 100 bits par seconde nous donne une station de base avec une sensibilité de -142dBm. La portée est comprise entre 10 kilomètres en milieu urbain jusqu'à 30 ou 50 kilomètres en milieu rural.

Finalement, au niveau de la consommation énergétique, Sigfox a réfléchi à un protocole permettant d'envoyer des messages courts en limitant le surdébit protocolaire afin de participer à la réduction de la consommation d'énergie.

Fréquences	Débit	Consommation d'énergie	Portée	Interférences
Bandes ISM  <b>868-869 MHz</b> <b>902-928 MHz</b> selon les régions	<b>De 100 bps à 600 bps</b> selon la région du monde	Faible durée du vie d'une batterie 2000 mAh <b>90 mois</b> soit environ 8 ans	<b>10 km</b> en milieu urbain  <b>30 à 50 km</b> en milieu rural	<b>Diversité temporelle</b>  <b>Diversité fréquentielle</b>  <b>Diversité spatiale</b>  <b>UNB</b>

Tableau récapitulatif des propriétés techniques de Sigfox <sup>14</sup>[20], [21], [22]

## 2.5 LoRaWAN et LoRa

### 2.5.1 Réseau LoRaWAN et technologie radio LoRa : définitions et fonctionnements

Quand on parle de LoRa il faut faire la distinction entre le réseau sans fil LoRaWAN, protocole développé par LoRa Alliance et la technologie radio LoRa utilisée dans la couche physique de celui-ci et développée par SEMTECH. Contrairement à Sigfox, LoRa permet de déployer son propre réseau mais nécessite donc de déployer des antennes ou de s'aider de réseaux préexistants.

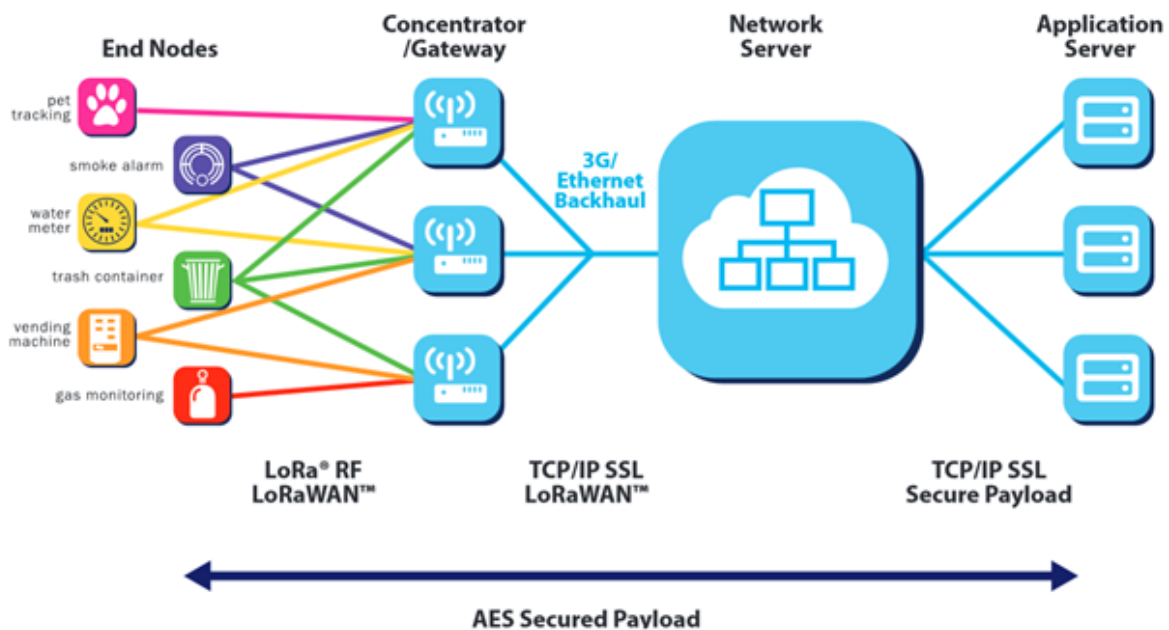
LoRa (Long Range) représente la couche physique du réseau LoRaWAN ou encore la modulation sans fil à l'origine de la communication longue distance. La modulation est basée sur une modulation à spectre étalé à compression d'impulsions - *Chirp Spread Spectrum* ou CSS. Cette modulation est adéquate pour les applications nécessitant un faible débit de données et une faible consommation d'énergie. LoRa permet un débit de données variables par l'utilisation de facteurs d'étalement orthogonaux. Un facteur d'étalement élevé réduit le débit et l'autonomie de la batterie sur une bande passante donnée. Cela permet de prendre des décisions en termes de ce qui est à privilégier, c'est à dire le débit, la portée ou encore la gestion de l'énergie [23].

<sup>14</sup> Renvoi à la référence [14] dans la table des illustrations

LoRaWAN désigne le protocole de communication et l'architecture de réseau qui utilise la technologie radio précédente. C'est un réseau de faible puissance qui couvre une large zone plus communément appelé LPWAN ou *Low Power Wide Area Network*. Un réseau LoRaWAN est un réseau en étoile étendue (*star of stars*). LoRa fonctionne sur la bande Industrielle, Scientifique et Médicale (ISM) [24], [25].

### 2.5.2 Caractéristiques techniques de LoRa et LoRaWAN

La modulation LoRa est une modulation à enveloppe constante. C'est une technologie très robuste et résistante face aux interférences. L'impulsion *chirp* est assez large bande pour permettre de limiter l'impact des multi-trajets et de l'évanouissement [25].



#### Architecture d'un réseau Lora<sup>15</sup>

Dans un environnement LoRaWAN, les nœuds ne sont pas associés à une *gateway* spécifique mais transmettent généralement leurs informations à plusieurs d'entre elles. Les données sont ensuite transmises au serveur [25].

Il existe plusieurs classes de nœuds terminaux qui servent différentes applications. Ces nœuds se distinguent par les caractéristiques techniques qu'ils privilégient entre la durée de vie de la batterie et la latence sur le lien de communication descendant. En effet les nœuds de classe A sont les nœuds bidirectionnels les plus économiques en terme d'énergie mais qui ne dispose du lien de communication dans le sens descendant que 2 fois brièvement après une transmission dans le sens montant. Ils sont considérés comme des capteurs. Les nœuds de classe B sont également bidirectionnels, ils fournissent un équilibre entre l'efficacité énergétique et les temps de réception, d'écoute des données. Ils sont considérés comme des actuateurs. Enfin les nœuds de classe C sont également bidirectionnels mais sont particulièrement concentrés sur la réception de slot, en effet ils sortent de la position d'écoute uniquement pour transmettre. Ce sont également des actuateurs mais qui doivent cette fois être branchés sur secteur et ne peuvent plus fonctionner sur batterie [24], [25].

<sup>15</sup> Renvoie à la référence [15] dans la table des illustrations

Avec cette technologie, nous disposons d'une très bonne capacité de pénétration en intérieur, donc une capacité de se propager à l'intérieur des murs, et donc potentiellement du béton armé.

Un aspect également intéressant de la technologie LoRa et du protocole LoRaWAN est la possibilité de localiser les capteurs grâce à des applications à faibles coûts énergétiques.

	Fréquences	Débit	Consommation d'énergie	Interférences	Portée
Europe	<b>867-869 MHz</b> 10 canaux de 125 ou 250 kHz en voie montante et 125 kHz en voie descendante	<b>Entre 250 bps et 50kbps</b>	Durée de vie d'une <b>batterie de 2000mAh : 105 mois.</b> Puissance d'émission voie montante et voie descendante : 14 dBm	<b>Très haute immunité</b> aux interférences	De <b>2 km à plusieurs dizaines de km</b> en champ libre
Amérique du Nord	<b>902-928 MHz</b> (64 +8 +8) canaux de 125 ou 500 kHz en voie montante et 500 kHz en voie descendante	<b>Entre 980 bps et 21.9 kbps</b>	<b>Durée de vie d'une batterie de 2000mAh : 105 mois.</b> Puissance d'émission voie montante : 20 dBm voie descendante : 27 dBm	<b>Très haute immunité</b> aux interférences	De <b>2km à plusieurs dizaines de km</b> en champ libre

**Tableau récapitulatif des propriétés techniques principales de LoRa et LoRaWAN<sup>16</sup> [20], [26], [27]**

## 2.6 Technologie *Bluetooth*

### 2.6.1 Définition du *Bluetooth*

*Bluetooth* est un standard de communication par onde radio fonctionnant sur la bande de fréquence UHF (*Ultra High Frequency*) à 2,4 GHz, appartenant à la bande ISM [28]. Il permet à deux appareils électroniques de communiquer sans liaison filaire au sein d'un réseau local. Il est cependant limité à une courte distance (rayon d'une dizaine de mètres en propagation libre). Le réseau local créer peut intégrer jusqu'à 7 appareils au maximum [29].

<sup>16</sup> Renvoie à la référence [16] dans la table des illustrations

Sa consommation énergétique est faible, notamment par rapport au Wi-Fi qui fonctionne sur la même bande de fréquence. Pour une même tâche, le *Bluetooth* utilise seulement 3% de l'énergie nécessaire au Wi-Fi. Mais sa portée et son débit reste également plus faible avec un débit maximal de 2 Mbit/s.

Il existe trois classes de protocole *Bluetooth* [28] :

- niveau 1 : puissance de 100 mW (20 dBm), portée de 100m
- niveau 2 : puissance de 2,5 mW (4 dBm), porté de 10 à 20m, c'est la classe la plus répandu
- niveau 3 : puissance de 1 mW (0 dBm), portée de quelques mètres

Attention cependant, les portées sont données à titre indicatif dans un contexte idéal (pour une propagation dans l'air et dans un milieu sans obstacle). Ce n'est pas le cas dans le contexte de notre projet. Cependant il n'existe aujourd'hui pas d'étude de propagation dans le béton armé.

## 2.6.2 Fonctionnement et caractéristiques du *Bluetooth*

L'échange de données entre deux appareils *Bluetooth* nécessite qu'ils soient appairés au moyen d'un échange de code. Ce code peut être libre et doit être rentré par les deux appareils, ou il peut être fixé par l'un et doit être saisi par le second. Diverses techniques d'associations existent et permettent de renforcer la sécurité selon les besoins de l'application.

Une interface *Bluetooth* possède trois états : un état actif, un état de semi-sommeil et un état de sommeil profond. Les deux derniers états sont des états d'économie d'énergie. L'état actif est l'état dans lequel se trouve l'appareil lorsqu'il communique via *Bluetooth*, il est n'est activé que lors du transfert.

Dans l'état de semi-sommeil l'appareil n'est pas en communication mais l'interface *Bluetooth* est toujours connectée ce qui permet de la réactiver rapidement en cas de transmissions de données.

Enfin l'état de sommeil profond est l'état dans lequel la consommation d'énergie est la plus faible, l'interface est déconnecté. La consommation en état de veille est moins d'un quart de celle consommée dans l'état actif ce qui représente un réel gain en énergie lorsque l'appareil n'a pas besoin d'émettre ou d'être en écoute de manière permanente [31, p220-232].

Nous avons vu l'aspect sécurité [32] au niveau de l'association des appareils, le protocole *Bluetooth* intègre d'autres mécanismes de sécurité :

- authentification de chaque appareil
- association des appareils selon la méthode choisie
- création et modification des clés
- chiffrement des données

## 2.7 Technologie *ZigBee*

### 2.7.1 Définition de la technologie *ZigBee*

*ZigBee* est un standard des réseaux sans fil de type WPAN (*Wireless Personal Area Network*) qui vise un débit de données faibles et une consommation d'énergie minimale. *ZigBee*



est défini par le standard de l'IEEE 802.15.4. Les applications de *ZigBee* sont du type du contrôle d'une lumière à l'envoi d'une température soit des opérations simples. *ZigBee* a pour objectif d'être utilisé comme un réseau sans fil de surveillance et de contrôle c'est pourquoi le débit faible nécessaire pour développer une technologie à faible coût et faible consommation d'énergie n'est pas un problème [9, p113-118].

*ZigBee*, à la différence du *Bluetooth*, n'est pas spécialisé dans les communications point à point. C'est une technologie où de 2 à des milliers de nœuds peuvent être connectés ensembles dans un réseau maillé multi sauts.

### **2.7.2 Propriétés techniques de la technologie *ZigBee***

La technologie *ZigBee* évolue dans 3 bandes de fréquences différentes, toutes appartenant aux bandes de fréquences sans licence ISM, en Europe, selon la bande de fréquences utilisée, le débit offert est différent. En Europe, sur la bande de 868.3 MHz, le débit offert est de 20 Kbit/s, sur un canal. En Amérique du nord, sur la bande de 902 à 928 MHz, le débit est de 40 Kbit/s pour les 10 canaux. Et enfin, la bande de 2.4GHz offre dans le monde entier un débit de 250 Kbit/s pour 16 canaux [33].

Avec la technologie *ZigBee* nous sommes sur une portée d'une centaine de mètres en extérieur et d'une dizaine de mètres en intérieur.

Quant à l'énergie consommée par un équipement, elle est de 10 mW maximum en transmission et de 0.1 mW maximum en veille, ce qui permet des durées de vie de batterie de l'ordre de plusieurs années [9, p115-118].

*ZigBee* se veut un réseau sans fil hautement fiable pour cela, il y a plusieurs spécifications de *ZigBee* telles que l'utilisation du *Carrier Sense Multiple Access - Collision Avoidance* ou CSMA-CA, d'un Contrôle de Redondance Cyclique ou CRC de 16 bits, l'envoi d'un acquittement à chaque saut, le réseau maillé qui permet de trouver une route sûre et enfin l'envoi d'un acquittement pour s'assurer que les données sont bien arrivées à destination. Une autres des spécifications qui fait de *ZigBee* un standard fiable est l'implémentation sur le standard IEEE 802.15.4 avec une modulation O-QPSK (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*) sur la bande de 2.4GHz et l'étalement de spectre à séquence directe (DSSS : *Direct Sequence Spread Spectrum*).

Le fait de s'appuyer sur un standard de l'IEEE robuste et dont les techniques de modulation et d'étalement de spectre sont parfaitement adaptés aux environnements à faible rapport signal sur bruit permet à *ZigBee* d'offrir une certaine fiabilité.

L'utilisation du CSMA-CA, c'est à dire l'écoute du canal de communication avant d'émettre permet d'éviter la corruption de données qui peut survenir si deux émetteurs transmettent en même temps. Le CRC quant à lui permet de vérifier si les bits de données sont corrects.

Enfin, le maillage du réseau apporte des propriétés de fiabilité non négligeables à *ZigBee* notamment en termes de découverte du meilleur chemin de données et d'assurance de la délivrance des données. En effet, le fait que le réseau soit un réseau maillé permet la transmission des données d'un nœud à plusieurs nœuds différents, les routes empruntées par les données peuvent donc changer en cas de problèmes de performance ou de maintenance sur une route. De plus, deux nœuds peuvent entrer en communication quelle que soit leur distance à condition qu'il existe des nœuds intermédiaires entre eux à leur portée radio [34, p4-10].

### **2.7.3 Récapitulatif des caractéristiques techniques principales de la technologie *ZigBee***



Ci-dessous, vous trouverez un tableau rappelant les propriétés de la technologie *ZigBee* en termes de bande de fréquences exploitées, de débit, de consommation d'énergie et de portée.

Fréquences	Débit	Consommation d'énergie	Portée
1 bande <b>868 MHz</b> 1 canal	<b>20 à 250 Kbps</b>	<b>20mA ; &lt;10 mW en transmission</b>	<b>10m en intérieur</b>
1 bande <b>915 MHz</b> 10 canaux		<b>&lt;0.01mA ; &lt;0.1 mW en veille</b>	<b>100m en extérieur</b>
1 bande <b>2.4GHz</b> 16 canaux			

**Tableau récapitulatif des caractéristiques techniques du ZigBee<sup>17</sup> [8, p113-118]**

## 2.8 Technologie par ondes sonores

La startup *Morphosense* propose une solution de maintenance prédictive basée sur un réseau de capteurs MEMS (Microsystèmes électromécaniques) comme nœuds sensitifs installés autour d'armatures métalliques en béton armé. Ces nœuds sensitifs envoient leurs informations aux nœuds communicants par des ondes sonores qui se propagent dans les armatures. Mais cette solution est une licence "savoir-faire" exclusive et nous n'avons pas pu avoir plus d'amples informations à ce jour [35].

## 3. Choix des technologies pour les deux niveaux de communications

Dans cette dernière partie, nous allons proposer la ou les technologies qui nous semblent les plus adéquates pour la réalisation de notre projet parmi les technologies exposées précédemment. C'est à dire les solutions qui permettent de répondre au mieux aux contraintes et conditions émises dans la première partie.

### 3.1 Technologie proposée pour le lien de communication entre nœuds sensitifs et nœud communicant

<sup>17</sup> Renvoi à la référence [17] dans la table des illustrations

Dans cette partie, nous allons proposer les technologies qui nous semblent respecter au mieux les contraintes. Nous allons commencer par brièvement rappeler ces contraintes puis exposer les technologies que nous avons choisies.

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la technologie de transmission envisagée doit répondre à deux contraintes principales, le nœud sensitif doit pouvoir communiquer avec le nœud communicant à l'extérieur de la dalle, nous avons donc besoin d'une portée d'une dizaine de mètres environ. Le nœud sensitif étant enfoui dans le béton armé, il doit être autosuffisant en énergie car la batterie ne peut être changée sans détruire la structure.

Pour répondre à ces contraintes nous avons opté par défaut pour la technologie RFID, qui a une portée maximale d'une dizaine de mètres en champ lointain. De plus, et c'est là le plus important pour nous, lors de l'interrogation du tag RFID, le tag reçoit l'énergie nécessaire pour émettre.

C'est donc une antenne dipôle RFID que nous mettons en avant pour ce niveau de communication.

Cependant nous sommes bien conscients, que cette technologie est très limitée pour notre application, notamment au niveau du débit. Si nous choisissons la RFID, nous nous restreignons à une surveillance de la structure très basique (température, humidité, ...).

Nous avons quand même choisi de prioriser une technologie autosuffisante en termes d'énergie.

## **3.2 Technologie(s) adéquate(s) pour le lien de communication entre les nœuds communicants**

Le lien entre nœuds communicants a pour objectif de permettre aux nœuds placés en surface de la plaque d'échanger des informations. Ces informations sont de deux types : localisations du nœud (encore en entrepôt ou arrivé sur site) et transmission des informations récupérées par le capteur enfoui dans la plaque.

On rappelle les contraintes principales : dans la phase de stockage en entrepôt le nœud n'as pas accès à une source d'énergie. On doit donc pouvoir le tracer sans que cela lui nécessite de l'énergie. Une fois arrivée sur site nous n'avons plus de contraintes énergétiques, le nœud étant raccordé au réseau électrique du bâtiment, qui lui servira d'alimentation.

Une fois installé sur site le nœud doit pouvoir communiquer avec ses plus proches voisins ainsi qu'avec un éventuel agent à proximité qui souhaiterait récupérer directement des informations (contrôle sur site).

Pour ce qui est de la localisation une étiquette NFC présente les bonnes caractéristiques : autonome en énergie elle permet de tracer le cycle de vie de notre plaque de béton armé. On peut ainsi imaginer que le tag NFC placé lors de la fabrication contiendra un numéro d'identification unique et le statut de la plaque. En sortie de fabrication, une fois le contrôle de qualité passé, le tag portera le statut "en-stockage". Puis lorsqu'elle sera sortie pour acheminement, un agent utilisera un lecteur pour modifier le statut et passer à "en-cours d'acheminement". Une fois installé sur site le tag passera en statut "opérationnel". Un logiciel de suivi de l'ensemble des plaques, auquel sont reliés les lecteurs, est nécessaire pour assurer une base de données contenant les informations sur chacune des plaques fabriquées.

Pour transmettre les informations recueillies par le nœud sensitif (capteur enfoui dans la plaque) on utiliserait l'UWB (*Ultra Wide Band*). Cette technologie permet un débit entre 200 Mbps et 480 Mbps avec une portée de 3 à 10 mètres, ce qui semble correct au vu des deux usages spécifiés (contrôle par agent et communications avec les nœuds voisins).

De plus, et c'est notamment ce point qui nous a permis de choisir l'UWB, sa consommation d'énergie est faible par rapport à d'autres technologies. De l'ordre d'une centaine de mW, l'UWB présente une basse consommation pour la transmission d'information et une consommation presque nul en veille (lorsqu'elle n'envoie pas de données). De plus en cas de coupure électrique, éventuellement possible en cas de tremblement de terre par exemple, on peut embarquer une batterie rechargeable dans le nœud. Cela représente une sécurité supplémentaire. Cette caractéristique de faible consommation nous semble importante pour le consommateur qui souhaite minimiser l'impact du système sur sa consommation électrique. Le système ayant une durée de vie égale à celle du bâtiment, on parle sur le long terme d'une quantité significative d'énergie.

Pour conclure l'UWB et le NFC sont les deux technologies qui, dans le cas de la communication entre nœuds communicants, semble le meilleur compromis entre un débit suffisant et une consommation énergétique raisonnable sur le long terme.

# Conclusion

Cet état de l'art avait pour but d'établir une liste des technologies sans-fil existantes qui pourraient être utilisées dans la réalisation de notre projet. Nous avons défini deux niveaux de communications dans notre système de capteur, chacun impliquant des contraintes spécifiques que nous avons définies dans une première étape. Cela nous a permis d'orienter ensuite nos recherches vers des communications sans fils et de les limiter par les contraintes établies dans chaque niveau de communication.

L'ensemble des technologies détaillées dans ce rapport est une liste non exhaustive, nous avons sélectionné celles applicables au vu de notre contexte et des conclusions tirées de la première étape d'investigation. Nous n'avons pas abordé certaines technologies comme le Wifi ou les réseaux mobiles considérée comme non pertinents au vu des contraintes de consommation imposées. Bien qu'elles présentent de bon débit et une distance acceptable pour le transfert de données, elles sont beaucoup plus énergivores que les technologies proposées dans ce rapport.

Après différentes comparaisons et réflexions entre les technologies envisageables, ce rapport termine sur nos propositions de solutions pour les deux niveaux de communications que nous aimerions mettre en place : RFID pour le premier niveau de communication et NFC - UWB pour le second niveau.

Nous avons été néanmoins limités dans nos recherches et réflexions par l'absence d'étude sur les caractéristiques de propagation des ondes dans le béton armé. Il faudra donc, au cours de la deuxième partie applicative de ce projet, tester en conditions réelles nos solutions pour une utilisation dans le béton armé. Une autre piste intéressante, dont nous avons pu prendre connaissance pendant nos recherches même si nous avons préféré nous concentrer sur d'autres aspects est la possibilité de développer nos propres protocoles sur certains réseaux afin de les rendre plus économe en énergie. Ceci qui nous permettrait d'élargir nos perspectives de technologies de communication sur nos liens et donc de capacité notamment en termes de débit.

# Références bibliographiques

- [1] « La composition du béton ». [Online]. Disponible sur : <http://www.guidebeton.com/composition-beton>. [Consulté le : 2- févr-2018].
- [2] « Introduction à la RFID ». [Online]. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/introduction-a-la-rfid-article-15-fr-ruid-17.html>. [Consulté le : 20-déc-2017]
- [3] « Classification des tags RFID ». [Online]. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/classification-des-tags-rfid-article-19-fr-ruid-17.html>. [Consulté le : 20-déc-2017]
- [4] « Les gammes de fréquences RFID ». [Online]. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/les-gammes-de-frequences-rfid-article-16-fr-ruid-17.html>. [Consulté le : 20-déc-2017]
- [5] « Fonctionnement d'un système RFID ». [Online]. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/fonctionnement-dun-systeme-rfid-article-17-fr-ruid-17.html>. [Consulté le : 20-déc-2017]
- [6] « Introduction au NFC ». [Online]. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/introduction-au-nfc-article-132-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 28-déc-2017]
- [7] « Comment fonctionne le NFC ? » [Online]. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/comment-fonctionne-le-nfc-article-133-fr-ruid-17.html>. [Consulté le : 28-déc-2017]
- [8] Emeric Guéguen, « Etude et optimisation des techniques UWB haut débit multibandes OFDM ». Thèse de doctorat en Electronique sous la direction de Jean-François Héliard, Rennes, INSA de Rennes, 2009 [Online]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00361467v1/document>. [Consulté le : 28-déc-2017]
- [9] H. Chaouchi, G. Pujolle, « Réseaux sans fil émergent : standard IEEE Traité IC2 série Réseaux et Télécoms », in *Réseaux sans fil émergent : standard IEEE Traité IC2 série Réseaux et Télécoms*, Lavoisier., 2008, p. 79-112.
- [10] Jean Schower, « Etudes et implémentation d'une couche physique UWB impulsionnelle à bas débit et faible complexité ». Thèse de doctorat en Electronique sous la direction de Ghais El-Zein, Bernard Uguen, Benoît Miscopain, Rennes, INSA de Rennes, Université Rennes 1, 2006 [Online]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00638640/document>. [Consulté le : 5-jan-2018]
- [11] R. P. Homayoon Nikookar, « Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications », in *Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications*, Springer Science & Business Media., 2008, p. chapitre 2 et 7.

- [12] « DS UWB - Direct sequence ultra wideband : Radio-Electronics.Com ». [Online]. Disponible sur : <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/uwb/ds-uwb.php>. [Consulté le : 5-jan-2018]
- [13] A. ELABBOUBI, F. ELBAHHAR, M. Heddebaut, et Y. Elhillali, « DS-UWB and TH-UWB Energy Consumption Comparison », *Journal of Telecommunications and Information Technology*, vol. 2016, n° 1, p. 101-109, 2016.
- [14] B. A. Fette *et al.*, *RF & Wireless Technologies*, Newnes., 2007
- [15] « MB-OFDM Modulation Overview (MB-OFDM) ». [Online]. Disponible sur : [http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/mbofdm/content/mbofdm\\_modoverview.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/mbofdm/content/mbofdm_modoverview.htm). [Consulté le : 5-jan-2018]
- [16] A-L Beylot, « UWB et les standards IEEE 802.15.3 ». [Online]. Disponible sur : <http://irt.enseeiht.fr/beylot/enseignement/UWB.pdf>. [Consulté le : 6-janv-2018]
- [17] G. Pujolle, « Les réseaux personnels », in *Les réseaux : éditions 2014*, Eyrolles., 2014, p. 487-491.
- [18] « Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT) ». [Online]. Disponible sur : <https://www.sigfox.com/en>. [Consulté le : 01-févr-2018]
- [19] « Radio Technologie Keypoints ». [Online]. Disponible sur : <https://www.sigfox.com/en/sigfox-iot-radio-technology>. [Consulté le : 28-janv-2018]
- [20] Robert Vivanco Salcedo, « Comprendre les technologies LPWA (SIGFOX et LoRa) », [Online]. Disponible sur : <https://fr.slideshare.net/RobertVivancoSalcedo/comprendre-les-technologies-lpwa-sigfox-et-lora>. [Consulté le : 1-févr-2018]
- [21] « Sigfox Global Network Key Features ». [Online]. Disponible sur : <https://www.sigfox.com/en/sigfox-global-iot-network>. [Consulté le : 1-févr-2018]
- [22] « Les technologies de communication des objets connectés », SMART GRIDS-CRE [Online]. Disponible sur : <http://www.smartgrids-cre.fr/index.php?p=objets-connectes-technologies>. [Consulté le : 2-févr-2018]
- [23] « AN1200.22 LoRa Modulation Basics ». [Online]. Disponible sur : <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>. [Consulté le : 20-janv-2018]
- [24] « lora-alliance | Technology », *lora-alliance*. [Online]. Disponible sur : <https://www.lora-alliance.org/technology>. [Consulté le : 20-janv-2018]
- [25] « LoRaWAN What is it ? : A technical overview of LoRa and LoRaWAN ». [Online]. Disponible sur : [https://www.tuv.com/media/corporate/products\\_1/electronic\\_components\\_and\\_lasers/TUeV\\_Rheinland\\_Overview\\_LoRa\\_and\\_LoRaWANtmp.pdf](https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf). [Consulté le : 01-févr-2018]

- [26] « Les protocoles LoRa et LoRaWAN — Documentation Réseau IoT Expérimental de l'Eurométropole de Strasbourg ». [Online]. Disponible sur : <http://iot-strasbourg.stratagem.com/lora-lorawan.html>. [Consulté le : 01-févr-2018]
- [27] Franck Moine, « Réseau Low Power Wide Area », [Online]. Disponible sur : <https://fr.slideshare.net/Reseauxetservicestpa/rs-10-juin-2015-lora-franck>. [Consulté le : 01-févr-2018]
- [28] X. Lagrange, L. Rouillé « Technologie Bluetooth ». [Online]. Disponible sur : <http://197.14.51.10:81/pmb/COURS%20ET%20TUTORIAL/Informatique/Cours%20sur%20les%20Reseaux%20Informatiques/RESEAUX%20LOCAUX%20ET%20RESEAUX%20SANS%20FIL/te7410%20Technologie%20Bluetooth.pdf>. [Consulté le : 01-févr-2018]
- [29] « Topology Options ». [Online]. Disponible sur : <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/topology-options>. [Consulté le : 29-jan-2018]
- [30] « Consommation d'énergie : Wifi vs Bluetooth », *Routeur 4G*. 14-sept-2017 [Online]. Disponible sur : <http://routeur-4g.com/consommation-denergie-wifi-vs-bluetooth/>. [Consulté le : 29-jan-2018]
- [31] T.Pering, Y.Agarwal, R. Gupta, R. Want, « CoolSpots: Reducing the Power Consumption of Wireless Mobile Devices with Multiple Radio Interfaces ». [Online]. Disponible sur : [https://www.usenix.org/legacy/events/mobisys06/full\\_papers/p220-pering.pdf](https://www.usenix.org/legacy/events/mobisys06/full_papers/p220-pering.pdf). [Consulté le : 30-janv-2018]
- [32] « Specification of the Bluetooth System ». [Online]. Disponible sur : [http://grouper.ieee.org/groups/802/15/Bluetooth/profile\\_10\\_b.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/802/15/Bluetooth/profile_10_b.pdf). [Consulté le : 30-jan-2018]
- [33] J. Francomme, F. Virolleau, J. Pang, Y. X. Phang, et T. Val, « ZigBee, de la théorie à la pratique : création d'un réseau ZigBee avec transmission de données », *3EI*, vol. 71, p. 1-18, 2013.
- [34] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. Newnes, 2008.
- [35] « Technologie mise en réseau capteurs MEMS – accéléromètres de pointe ». [Online]. Disponible sur : <http://morphosense.com/technologie-capteurs-mems/>. [Consulté le : 2-févr-2018]

# Table des illustrations

- [1] Schéma de principe de notre système. [Schéma]. Damien Nicolas.
- [2] Fonctionnement du système RFID. [Schéma]. In : Portail du CNRFID. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/fonctionnement-dun-systeme-rfid-article-17-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [3] Schéma d'un tag RFID. [Schéma]. In : Portail du CNRFID. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/fonctionnement-dun-systeme-rfid-article-17-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [4] Couplages de communication en RFID. [Schéma]. In : Portail du CNRFID. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/fonctionnement-dun-systeme-rfid-article-17-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [5] Schéma du fonctionnement du mode émulateur de carte. [Schéma]. In : Portail du CNRFID. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/comment-fonctionne-le-nfc-article-133-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [6] Schéma du fonctionnement du mode lecteur. [Schéma]. In : Portail du CNRFID. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/comment-fonctionne-le-nfc-article-133-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [7] Schéma du fonctionnement du mode Peer-to-Peer. [Schéma]. In : Portail du CNRFID. Disponible sur : <http://www.centrenational-rfid.com/comment-fonctionne-le-nfc-article-133-fr-ruid-17.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [8] Energies de trois techniques sans fil en fonction de leurs bandes passantes. [Graphe]. In : Portail de Jean-François Mainguet sur les Technologies de Liaison. Disponible sur : <http://liaison.mainguet.org/uwb.htm>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [9] Masques des puissances autorisées par la FCC. [Graphe]. In : Anas Hanaf, Projet de fin d'études « Etude et conception d'un émetteur / récepteur UWB-IR », Master 2 Réseaux et Télécommunications, Nancy, Université de Lorraine. Disponible sur : <http://docplayer.fr/36643590-Etude-et-conception-d-un-emetteur-recepteur-uwb-ir-je-dedie-ce-travail-a.html>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [10] Représentation temporelle et spectrale d'un pulse élémentaire. [Graphe]. In : Jean Schower, « Etudes et implémentation d'une couche physique UWB impulsionnelle à bas débit et faible complexité ». Thèse de doctorat en Electronique sous la direction de Ghais El-Zein, Bernard Uguen, Benoît Miscopain, Rennes, INSA de Rennes, Université Rennes 1, 2006 [Online]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00638640/document>. [Consulté le : 2-févr-2018]



- [11] Bandes de fréquences dans le MB-OFDM. [Graphe]. In : Portail Keysight Technologies. Disponible sur : [http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/mbofdm/content/mbofdm\\_modoverview.htm](http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600b/webhelp/subsystems/mbofdm/content/mbofdm_modoverview.htm). [Consulté le 2-févr-2018].
- [12] Tableau récapitulatif des caractéristiques physiques de l'UWB. [Tableau]. Axelle Aloïsi.
- [13] Technologie Sigfox UNB. [Graphe]. In : Portail Halberd Bastion. Disponible sur : <https://halberdbastion.com/technology/iot/iot-protocols/sigfox-unb>. [Consulté le 2-févr-2018].
- [14] Tableau récapitulatif des propriétés techniques de Sigfox. [Tableau]. Axelle Aloïsi.
- [15] Architecture d'un réseau LoRa. [Schéma]. In : « LoRaWAN What is it ? : A technical overview of LoRa and LoRaWAN ». [Online]. Disponible sur : [https://www.tuv.com/media/corporate/products\\_1/electronic\\_components\\_and\\_lasers/TUeV\\_Rheinland\\_Overview\\_LoRa\\_and\\_LoRaWANtmp.pdf](https://www.tuv.com/media/corporate/products_1/electronic_components_and_lasers/TUeV_Rheinland_Overview_LoRa_and_LoRaWANtmp.pdf). [Consulté le : 01-févr-2018].
- [16] Tableau récapitulatif des propriétés techniques principales de LoRa et LoRaWAN. [Tableau]. Axelle Aloïsi.
- [17] Tableau récapitulatif des caractéristiques techniques du *ZigBee*. [Tableau]. Axelle Aloïsi.