

Bureau d'étude dimensionnement d'interface radio pour réseaux mobiles

Alvaro PASCUAL LEGIDO, Paul CHARAYRON, Julien COUSTILLAS, Fatoumata THERA

Résumé—Ce bureau d'étude a pour but d'effectuer une étude théorique sur le réseau LoRa de manière générale et ensuite d'évaluer ses performances, à savoir en termes de portée, la puissance reçue en fonction de la distance et de l'environnement ainsi que les pertes.

I. INTRODUCTION

Afin de simplifier le stationnement dans le quartier de Ranguel (en termes de temps d'attente, de pollution), une solution basée sur le réseau LoRa est étudiée. Cette solution prévoit des capteurs, positionnés près des places de parking, et qui transmettent via le réseau LoRa l'état d'occupation des places. Ce document est une synthèse des différentes études effectuées afin d'évaluer les performances du réseau LoRa pour la solution proposée.

Ainsi vous seront présentés dans ce document, dans un premier temps, l'interface radio LoRa, dans un deuxième temps, le cas d'étude, ensuite une étude théorique des performances du réseau LoRa (simulation), puis les résultats des mesures sur le terrain et enfin le choix de dimensionnement du futur réseau LoRa.

II. PRESENTATION DE L'INTERFACE RADIO LORA

Cette partie a pour objectif de décrire certaines des spécificités de la couche physique LoRa. Les éléments les plus importants seront évoqués pour permettre une meilleure compréhension du reste du rapport.

A. LoRa, une technologie LPWA

LoRa est une technologie pour réseaux "Low Power Wide Area" (LPWAN). À ce titre elle doit offrir des performances telles que ce qui suit :

- Basse consommation d'énergie (durée de vie des batteries pouvant atteindre plusieurs années),
- Longue portée (jusqu'à quelques kilomètres),
- "Bas" débit (de 10 bps à quelques kbps),
- Permettant le développement de chipsets et de réseaux de manière rapide et peu onéreuse,
- Liaison totalement sécurisée entre les objets produisant

- les données et les utilisateurs finaux de ces données,
- Autres caractéristiques : objets localisables, protection contre le fading, faciliter le développement d'applications d'analyse de données.

LoRa définit principalement les caractéristiques de la couche physique. Cependant, la LoRa Alliance a aussi proposé une couche MAC associée, LoRaWAN, qui définit le protocole de communication et l'architecture d'un réseau LoRa. Il s'agit d'un réseau à topologie en étoile, avec transmission asynchrone, bidirectionnelle, utilisant un protocole de type ALOHA. Nous avons bien effectué les mesures présentes dans la suite de notre rapport, dans un environnement de ce type (une station de base émettrice sur le toit d'un bâtiment, et nœuds récepteurs sur le campus de Ranguel).

B. Caractérisation technique

Suivant la zone géographique, LoRa peut utiliser différentes bandes de fréquences. En Europe, la technologie LoRa utilise les bandes ISM autour de 868 MHz, en respectant les caractéristiques décrites dans le tableau suivant :

Bandes (MHz)	Bande passante (kHz)	Puissance	Rapport cyclique	Débit binaire
868.1	125	14 dBm par défaut	≤ 1%	300 bps jusqu'à 5 kbps
868.3				
868.5				

Figure 1 - Quelques caractéristiques techniques de la technologie LoRa

La couche physique LoRa utilise une modulation particulière dérivée de la modulation dite "Chirp Spread Spectrum", elle-même faisant partie des modulations à étalement de spectre. Un chirp est un signal sinusoïdal augmentant (up-chirp) (ou diminuant (down-chirp)) linéairement en fréquence et parcourant ainsi une certaine bande de fréquence. En modulation, LoRa, l'information est codée en fonction de l'offset fréquentiel des signaux up-chirps, comme présenté dans la figure ci-dessous.

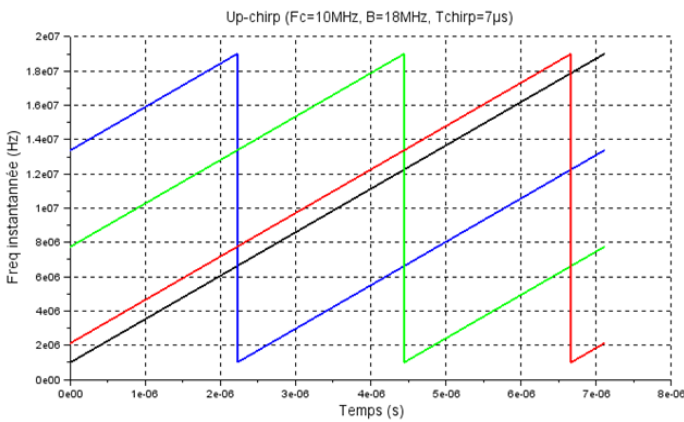


Figure 2 - Différentes valeurs d'offset codent différents symboles

Le nombre de position possible d'offset fréquentiel dépend d'un paramètre : le Spreading Factor (SF), et vaut 2^{SF} (valeurs allant de 0 à $2^{SF}-1$).

Le schéma suivant donne une vision plus globale, mais qui reste simple, du modulateur LoRa.

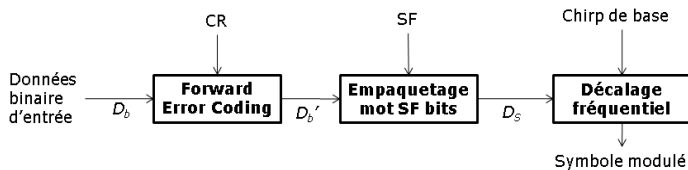


Figure 3 - Schéma du modulateur LoRa

Trois paramètres fondamentaux permettent ainsi d'effectuer des réglages sur la modulation LoRa :

- SF (valeurs comprises entre 5 et 12) (notons que deux signaux utilisant des valeurs de SF différentes sont orthogonaux),
- B, la bande passante du signal chirp (valeurs possibles : 125, 250 et 500 kHz),
- le "Coding Rate" (CR) (valeurs possibles : 4/5, 4/6, 4/7, 4/8).

Leur caractère fondamental tient à ce qu'il est possible de paramétrer en les modifiant. En particulier, il est possible d'augmenter SF afin d'augmenter le gain de traitement (comme l'explique la figure suivante), d'augmenter le nombre de SF différents utilisés dans le réseau pour améliorer la capacité du réseau, ou encore de jouer sur un des trois paramètres pour influencer sur le débit binaire effectif. La figure suivante résume certains des effets que peuvent avoir des modifications des valeurs de ces trois paramètres, et donne deux formules fondamentales expliquant ce que nous venons d'évoquer.

$$G_p = \frac{D_c}{D_b} = \frac{2^{SF}}{SF}$$

$$D_b = \frac{B}{2^{SF} \times SF} \times \frac{4}{CR+4}$$

Paramètres	Débit binaire	Sensibilité	Consommation énergétique
Augmenter B	+	-	-
Augmenter SF	-	+	+
Augmenter CR	-	≈	+
Header Explicite	-	≈	+

Figure 4 - Résumé de quelques effets des modifications faites sur trois paramètres fondamentaux de la modulation LoRa

III. CAS D'ETUDE

L'application visée dans le cadre de ces études est une application de stationnement intelligent basée sur la transmission des informations des places de parking par des capteurs communiquant en LoRa. La zone d'étude est le campus de Rangueil. Par ailleurs, nous avons utilisé un émetteur LoRa de type SX1272, ainsi qu'un module GPS afin d'avoir les coordonnées des points de mesures. Nous avons principalement fait nos mesures dans les rues, derrière les bâtiments, aux alentours du périphérique, et aussi en hauteur (environ 3.5m par rapport au niveau du sol). Nous avons parfois favorisé une direction bien définie afin de voir jusqu'où le signal reçu était décodable par le récepteur.

A. Paramètres du réseau LoRa étudié

Les paramètres du réseau LoRa étudié sont les suivants:

- Localisation: Bâtiment GEI/INSA 135 Avenue de Rangueil 31400 Toulouse
- Hauteur de l'antenne: environ 15m
- Gain de l'antenne: 0 dBi
- Pertes: 1.4 dBi
- Puissance d'émission conduite sur charge 50 Ω: 14 dBm
- Fréquence centrale : 868.1 MHz
- BW = 125 kHz, CR = 4/5, SF = 12
- CRC activée, explicit header, préambule de 12 symboles
- Transmission en mode broadcast d'un message de 12 octets

B. Présentation du module radio LoRa

Le module SX1272 est un transmetteur/récepteur longues distances implémentant le système de modulation en spectre LoRa. Il est utilisé pour de la communication wifi, de la domotique, des systèmes de sécurité, etc.

Ce module est vendu par Semtech, entreprise américaine spécialisée dans les produits électroniques, de télécommunication, de gestion d'énergie, de module wifi ou d'appareils de tests et mesures.

Une version conçue par Libelium est compatible avec la carte Arduino Mega avec laquelle nous travaillerons.

Il possède une limite de sensibilité de -137dBm. Au-delà de cette dernière, les données seront mal restituées ou complètement perdues.

Grâce aux bibliothèques fournies, nous avons pu agir sur de nombreux paramètres tels que :

- La bande passante
- Le taux de codage
- Le Spreading Factor
- La fréquence centrale du canal
- La puissance de sortie
- L'activation ou non du CRC.

Nous pouvons aussi obtenir de nombreuses informations quant à la qualité de la réception telles que la valeur du RSSI ou du SNR du dernier paquet reçu.

C. Présentation de l'outil de planification

Avant de procéder aux mesures de portée sur terrain nous avons réalisé des simulations grâce au logiciel "ICS Telecom". Il s'agit d'un logiciel de planification de réseaux sans fil qui peut prendre en compte différents types de liaisons, différentes applications, s'adapte à différents types d'environnement (indoor, outdoor, zone rurale ou urbaine) . Il propose un grand nombre d'outils pour la simulation de réseaux sans fil, notamment le calcul de bilans de liaison (en fonction des caractéristiques du terrain, et des émetteurs-récepteurs), l'analyse de connectivité à un réseau donnée, ou encore l'étude des interférences entre nœuds d'un même réseau ou provenant de systèmes extérieurs. Pour finir, le logiciel permet d'utiliser plusieurs modèles de propagation, qui permettent de prendre en compte, en accord avec le profil de terrain étudié, les phénomènes de diffraction, diffusion, réflexion/réfraction, etc.

D. Présentation du matériel de mesure sur terrain



Figure 5 - Matériel de mesure utilisé

Les mesures sur terrain ont été faites avec un module LoRa (déjà décrit dans la section III.B) et un module GPS pour mesurer la puissance reçue et les coordonnées où chaque mesure était faite. Ce module est connecté à un ordinateur qui gère le programme écrit en Arduino et qui prend les mesures toutes les 5 secondes.

IV. ETUDE THEORIQUE DES PERFORMANCES DU RESEAU LORA

A. Evaluation de la portée basée sur un modèle de propagation empirique

Afin d'avoir une première estimation de la portée maximale

du signal, nous nous sommes servi du modèle empirique pour la 4G - 3GPP TR 36.942 :

$$Lu(\text{dB}) = 40 \cdot (1 - 0.004H_b) - \log(d) - 18 \log(H_b) + 21 \log(f) + 80 + S$$

- f : fréquence (en MHz)
- d : distance en km entre émetteur et récepteur, quelques centaines de mètres à plusieurs kms. Faible précision du modèle à petite distance.
- H_b : hauteur en m de l'émetteur, de 0 à 50 m, mesurée à partir de la hauteur moyenne des toits
- S correspond à la variabilité par les pertes de masquage (log-normally distributed shadowing). Une valeur de 10 dB est suggérée.

Le résultat est $d = 1,97$ km.

B. Evaluation de la portée basée sur un modèle numérique de terrain

Nous avons ensuite effectué des simulations sous le logiciel ICS Telecom avant de passer aux mesures sur terrain. Nous avons généré une cartographie de la portée sur la zone de Ranguel (cf. figure 6), un tracé du profil de champ entre la station émettrice sur le toit du département GEI et le parking de l'UPS (cf. figure 7). Enfin nous avons choisi de ne pas présenter les résultats de l'analyse de variabilité que nous avons menée (c'est-à-dire de la probabilité que la puissance instantanée reçue soit au-dessus du seuil de réception) car nous obtenions une probabilité égale à 1 sur la majorité du campus de Ranguel, ce qui est improbable, étant donné que l'environnement du canal de propagation hertzien évolue.

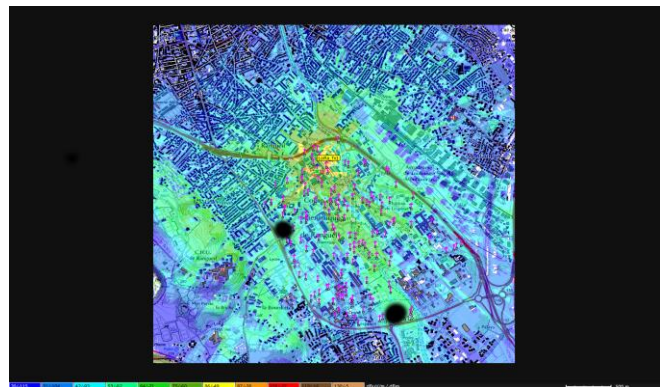


Figure 6 - Couverture d'une gateway LoRa placée sur le toit du GEI/INSA

N.B.: Un défaut du logiciel nous a forcé à multiplier artificiellement la puissance d'émission d'un facteur 100 afin d'intégrer dans la légende des puissances reçues jusqu'à -135 dBm. Une puissance de x dBm sur la légende correspond donc en réalité à une puissance de $x-20$ dBm.

Sur cette carte nous pouvons noter que la couverture de la Gateway LoRa est d'environ 1.99 km (point marqué en noir au

sud) dans l'axe le plus dégagé.

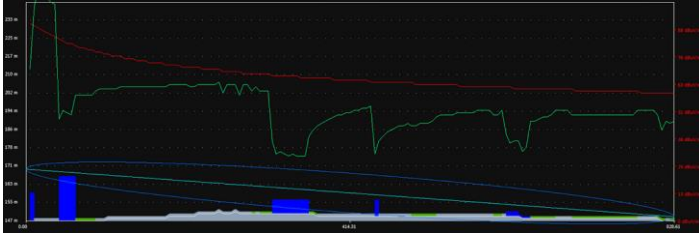


Figure 7 - Tracé du profil de champ entre la station émettrice sur le toit du département GEI et le parking de l'UPS

Sur la figure 7, le tracé en vert montre une légère tendance à l'affaiblissement du signal avec la distance, mais montre surtout l'effet significatif et local des bâtiments les plus hauts se trouvant sur le trajet du signal. En revanche, le tracé en rouge, qui représente la propagation en espace libre montre une évolution du champ électrique de $-60 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ à $-90 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ (à 830 mètres de la station sur le GEI).

N.B.: Les chiffres de cette figure semblent incohérents avec la formule du document d'aide à l'utilisation de ICS Telecom pour convertir un champ en $\text{dB}\mu\text{V/m}$ vers une puissance en dBm. En effet, $-60 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ correspondent au niveau de puissance trop faible suivant :

$$\begin{aligned} P(\text{dBm}) &= E(\text{dB}\mu\text{V/m}) + Gr(\text{dB}) - Lr(\text{dB}) - 77.2 - 20\log(f(\text{MHz})) \\ &= -60 + (-0.5) - 1.4 - 77.2 - 20\log(868.1) \\ &= -197.9\text{dBm} \end{aligned}$$

C. Prédiction des performances du réseau LoRa

Ici nous avons tenté de simuler le nombre de stations de base (comme celle que nous avons utilisée durant nos mesures sur terrain) qu'il nous faudrait déployer pour pouvoir affirmer raisonnablement que le campus de Rangueil est couvert. La cartographie donnée dans la partie précédente avec une seule station ne donnaient pas un service satisfaisant. Avec deux stations, ce n'est toujours pas suffisant, comme le montre la figure 8. Enfin, avec trois stations nous arrivons à couvrir toute la zone (cf. figure 9).

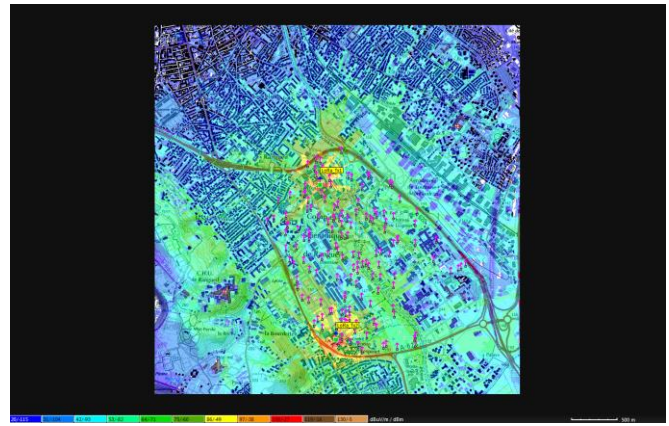


Figure 8 - Couverture zone Rangueil avec deux gateways

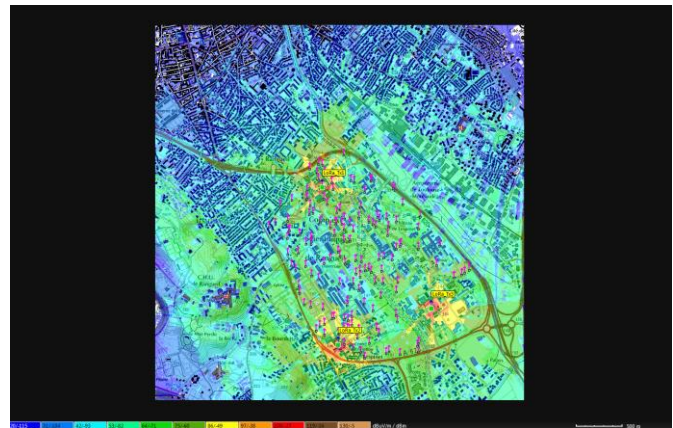


Figure 9 - Couverture zone Rangueil avec trois gateways

V. RESULTATS DES MESURES SUR TERRAIN

Dans cette partie, nous avons regroupé les résultats de nos mesures de portée radio sur terrain. Nous comparons également ces résultats avec ceux prédits par la simulation sous ICS Telecom.

Pour commencer, on peut faire une première comparaison rapide entre la cartographie obtenue en simulation sous ICS Telecom (cf. partie IV.B.) et une carte que nous avons générée sous Google Maps proposant une colorisation des points de mesure en fonction de la puissance reçue en ces points (les points en bleu sont les points où la puissance reçue est la plus élevée, soit -70 dBm , et ceux en rouge indiquent une puissance de réception médiocre, soit -140 dBm , ce qui est inférieur au seuil de sensibilité du module de réception).



Figure 10 - Cartographie des points de mesures et des puissances de réception associées

Ces résultats sont intéressants et sont relativement en accord avec la cartographie générée sous ICS Telecom. En effet, on retrouve des niveaux de puissances en réception cohérents entre les deux cartes. Par exemple, on remarque que le signal devient trop faible au sud du campus de l'Université Paul Sabatier, ou encore devant l'entrée du LAAS.

Dans un second temps, nous avons choisi de comparer les simulations et nos mesures au travers d'un tracé de profil de champ entre deux points : la station émettrice du GEI et le parking du gymnase de l'Université Paul Sabatier. La figure suivante donne ce tracé obtenu avec nos mesures, et est à comparer avec la figure 6 de la partie IV.B.

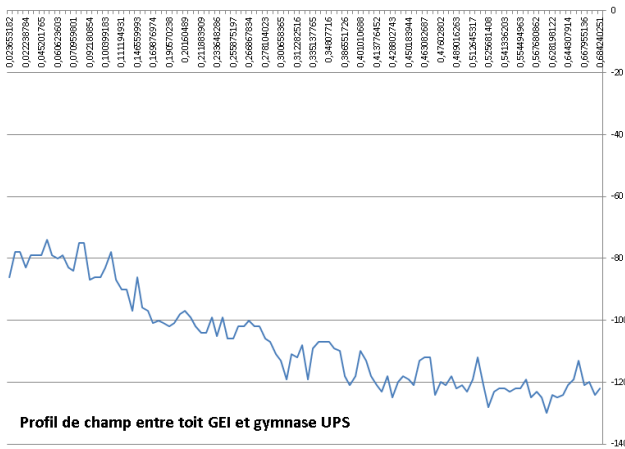


Figure 11 - Tracé du profil de champ entre la station émettrice (toit du GEI) et un nœud récepteur (situé sur le parking du gymnase de l'Université Paul Sabatier)

Pour finir, nous avons pensé intéressant d'effectuer une dernière analyse sur nos résultats de mesures sur terrain. Nous avons tracé un diagramme de la puissance reçue en fonction de la distance et nous avons pu remarquer que nous pouvions alors établir un modèle de propagation empirique, certes simple, mais intéressant, pour la zone de Rangueil. Notre tracé est reporté sur la figure suivante.

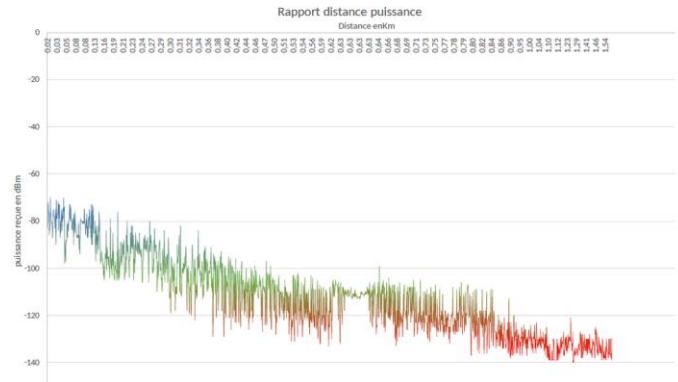


Figure 12 - Évolution de la puissance reçue en fonction de la distance à l'émetteur

À l'aide de ce graphique, voici le modèle de propagation empirique que nous avons pu établir :

« Pour une hauteur constante de l'antenne d'émission et pour une fréquence d'émission constante (868.1 MHz), puissance décroît en fonction de la distance selon la formule suivante :

$$P(\text{dBm}) = - 0.08 * \text{distance} - 80 \gg$$

Pour finir, nous pouvons préciser qu'il aurait été intéressant de faire une analyse théorique de la connectivité à l'aide du logiciel ICS Telecom. Malheureusement, nous avons manqué de temps pour mener à bien ces étapes. Cependant, nous avons réalisé une analyse supplémentaire tout aussi intéressante sur notre tracé en figure 12. En effet, cette courbe permet de donner un résultat très intéressant en ce qui concerne la variabilité de la puissance du signal reçu. On voit que l'écart-type reste relativement constant avec l'augmentation de la distance.

VI. CHOIX DE DIMENSIONNEMENT DU FUTUR RESEAU LORA

Nos mesures sur terrain ont confirmé le constat déjà fait au cours de la simulation sous ICS telecom : une seule station sur le toit du GEI ne permettra pas de couvrir 100% de la zone cible.

La couverture à -137dBm que nous avons déduit de nos mesure est aux alentours de 800m dans l'axe le plus favorable.

Notre puissance d'émission étant déjà dans la norme LoRa, nous proposons de rajouter 2 autres gateways afin d'améliorer la couverture de la zone cible.

Par ailleurs, nous avons remarqué qu'une zone en particulier étant moins bien servie : la zone au Sud-Est du canal. Cela est dû à la position de la gateway sur le toit du GEI, qui se trouve au Nord-Ouest du canal. Il faudra donc en priorité ajouter une station au Sud-Est, près du LAAS, et ensuite en ajouter une au Sud-Ouest de la zone de Rangueil, pour s'assurer une bonne couverture de cette partie.

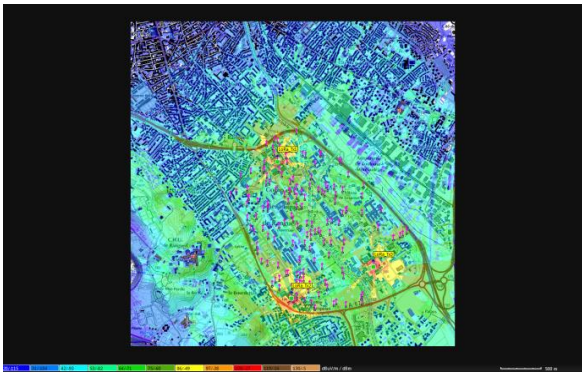


Figure 13 – Couverture de la zone de Rangueil avec trois gateways

L'ajout de ces deux stations aura un autre avantage : celui de limiter les éventuels problèmes de connectivité en cas de surcharge qui pourraient avoir lieu si une seule gateway était utilisée.

Ces gateways devront être placées à une dizaine de mètres minimum afin d'être au-dessus de la hauteur moyenne des bâtiments de la zone et permettre ainsi une meilleure propagation.

VII. CONCLUSION

Dans le cadre de ce projet, nous avons étudié la faisabilité de l'installation de capteurs sur le campus de Rangueil afin d'avoir connaissance en temps réel du nombre de places de parkings libres/occupées.

Suite à l'étude théorique, nous avons supposé que le signal serait utilisable jusqu'à 2 km. Cependant, grâce à nos mesures sur terrain nous avons pu nous rendre compte qu'au-delà d'1 km, le signal est déjà très dégradé. Ceci remet en question l'efficacité du modèle théorique de calcul utilisé lors des étapes préliminaires, et permet de confirmer que pour être fiable, celui-ci devrait être calibré pour l'environnement de la zone de Rangueil.

Nous pouvons cependant dégager un nouveau modèle suite à nos mesures.

Nous avons également pu établir qu'une seule antenne n'est pas suffisante pour couvrir l'ensemble de la zone de Rangueil.

REFERENCES

- [1] SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem - Designer's Guide, Semtech, July 2013.
- [2] « Dimensionnement d'un réseau LoRa pour une application de stationnement intelligent - Etude théorique », document de cours rédigé par Alexandre Boyer, Avril 2017.
- [3] GPS Visualizer. Convert your GPS data for use in Google Earth.[en ligne] Disponible sur : http://www.gpsvisualizer.com/map_input?form=googleearth
- [4] « A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ », The LoRa Alliance, Novembre 2015. Disponible à l'adresse : <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>
- [5] « IoT: The era of LPWAN is starting now », Jean-Paul Bardyn, Thierry Melly, Olivier Seller, Nicolas Sornin, publié dans IEEE Explore le 20 Octobre 2016. Disponible à l'adresse : <http://ieeexplore.ieee.org/document/7598235/?reload=true#full-text-section>

- [6] « AN1200.22 LoRa™ Modulation Basics ». Semtech. Revision 2, Mai 2015
- [7] « A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things ». Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Mark Townsley. Septembre 2016.
- [8] Semtech, SX1272/73 Datasheet. Semtech. Disponible sur : <http://www.semtech.com/images/datasheet/sx1272.pdf>