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

Dimensionnement d'un réseau
LoRa pour une application de
"stationnement intelligent"

Alexandre Boyer
Alexandre.boyer@insa-toulouse.fr
www.alexandre-boyer.fr

INSA de Toulouse

Mars 2022

I. Enoncé du projet

Afin de simplifier le stationnement sur le campus de Rangueil, réduire le temps de recherche et la pollution associée, une solution de "stationnement intelligent" est étudiée. Cette solution est basée sur un réseau LoRa (LoRaWAN). L'ensemble des places de parking de la zone à couvrir sont équipées de capteurs détectant la présence d'un véhicule. Ces capteurs ou nœuds sont connectés à un réseau LoRa et transmettent l'information sur le statut d'une place de parking (libre ou occupée) à chaque arrivée ou départ d'un véhicule au(x) stations de base ou gateways du réseau. Celles-ci collectent ces données et les transmettent au serveur de l'application via une connexion IP. Les conducteurs abonnés au service cherchant une place de parking sur la zone reçoivent sur leur smartphone en temps réel une carte des places de parking disponibles. Les nœuds transmettent aussi quotidiennement une trame de vérification de bon fonctionnement, avec un rapport d'occupation de la place de parking, ainsi qu'une trame de statut batterie lorsque la pile embarquée est déchargée. Inversement, la ou les stations de base transmettent un signal vers les nœuds à des fins de configuration ou pour vérifier leur bon fonctionnement. Les nœuds et gateways utilisent le module radio LoRa SX1272 de Libelium, basé sur le transceiver LoRa SX1272 proposé par Semtech (annexe E).

Le projet proposé est une étude de faisabilité, portant uniquement sur les aspects radio. L'objectif de cette étude est de déterminer les performances de l'application notamment en terme de couverture radio, et de réaliser une première étude de dimensionnement, qui consiste à déterminer les sites d'installation, leur configuration, le nombre de ressources spectrales nécessaires, le nombre de capteurs supportés. Des paramètres par défaut ont été envisagés, ils sont décrits dans l'annexe D.

Le travail s'effectuera en équipe de 3 à 4 étudiants. Le planning du projet est décrit ci-dessous.

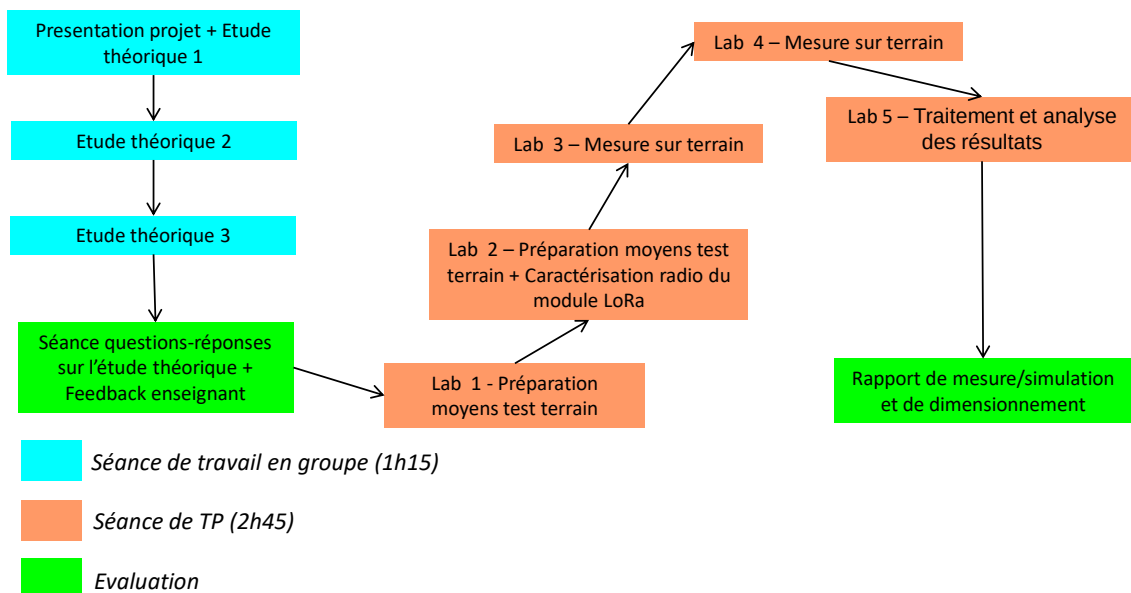


Figure 1 - Planning du projet

Celui-ci est découpé en deux grandes parties :

1. Etude théorique de LoRa : l'objectif est de vous familiariser avec le fonctionnement de l'interface radio LoRa. Un ensemble de questions, données à l'annexe C, vous sont posées. A

l'issue de cette partie, il vous est demandé de rédiger une présentation powerpoint donnant les éléments de réponse à ces questions. Celle-ci vous servira de support lors de la séance questions-réponses avec l'enseignant.

2. Séances pratiques (Lab) : vous serez amenés à réaliser des mesures sur terrain pour évaluer les performances futures du réseau LoRa. Le but des mesures sur terrain est d'établir un modèle de propagation représentatif du site d'installation. Le matériel utilisé à cet effet est présenté à l'annexe F. Lors des deux premières séances de travaux pratiques, vous configurerez le matériel et préparerez le protocole de mesure. Une séance sera prévue pour réaliser quelques tests de caractérisation radio du module (Lab 2). Les séances 3 et 4 seront dédiées aux mesures sur terrain, dont les résultats seront traités lors de la séance 5. Une fois le modèle établi, des calculs de dimensionnement seront effectués à l'aide de ce modèle lors de la dernière séance de groupe. A l'issue de cette partie, vous rédigerez un rapport présentant les méthodes de mesure utilisées, les résultats obtenus et les conclusions tirées pour une future installation de l'application. Le rapport devra suivre le template Template_Rapport_LoRa.doc.

Le modèle de propagation sera empirique, c'est-à-dire construit directement à partir des résultats de mesure obtenus lors des séances Lab 3 et 4. Pour être pertinent, il nécessite donc suffisamment de points de mesure, dans des situations variées en terme de valeurs de paramètres d'entrée. Il vous appartient donc de préparer vos campagnes de mesure pour disposer d'un nombre conséquent d'échantillons de mesure de qualité. C'est notamment le but des séances Lab 1 et 2. Qu'attend-on de ce modèle ?

- il sera représentatif d'une zone urbaine, typique de celle de la zone Campus de Rangueil.
- il doit nous permettre de calculer la perte de propagation moyenne en fonction de la distance à l'antenne réceptrice.
- il doit nous permettre de calculer la portée radio. Sachant que la portée est une grandeur aléatoire, on considérera qu'un point est hors portée si la probabilité de recevoir correctement le signal est inférieure à 90 %.
- il doit intégrer l'effet de la variabilité temporelle et spatiale du canal radio (fading).
- il doit enfin permettre d'identifier une stratégie d'attribution des caractéristiques radio (SF).

A l'issue de cette étude, on souhaite répondre aux questions suivantes :

- L'installation initiale (un point d'accès, une fréquence, paramètres radio) est-elle suffisante pour atteindre les objectifs de couverture et de nombre de capteurs ?
- Comment pourrait-on améliorer la portée radio ?
- Le risque de collisions est-il acceptable ? Si non, comment réduire ce risque ?

La présentation et le rapport seront rendus par e-mail à l'adresse alexandre.boyer@insa-toulouse.fr, avec les dates limites respectives : **vendredi 17 mars** et **vendredi 13 mai**.

II. Annexe A - Objectifs d'apprentissage

- ✓ Connaître les termes techniques associées à une interface radio (ex : RSSI, spreading factor, SNR ...)
- ✓ Expliquer le fonctionnement de l'interface radio d'une technologie de réseau sans fil
- ✓ Identifier et intégrer les réglementation radio associées à une technologie de réseau sans fil et les contraintes associées
- ✓ Déterminer les performances radio d'une technologie de réseau sans fil (portée, sensibilité, débit, BER/PER), par calcul ou mesure
- ✓ Proposer des choix de configurations de l'interface radio (antennes, installation, modulation, puissance ...) afin d'atteindre les performances attendues
- ✓ Tester les performances radio d'un module d'émission-réception (portée, PER)
- ✓ Evaluer les scénarios d'interférences inter et intrasystèmes

III. Annexe B - Liste des mots-clés

A la fin de ce projet, vous devrez connaître et savoir définir les termes techniques ci-dessous.

Chip	
CR	Coding Rate
CSS	Chirp Spread Spectrum modulation
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
EMC	Electromagnetic Compatibility
ERP / PAR	Effective radiated power / Puissance apparente rayonnée
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FEC	Forward error coding
FHSS	Frequency hopping spread spectrum
Gateway	
IoT	Internet of Things
LPWA	Low Power Wide Area (network or technology)
PER	Packet Error Rate
PG	Processing gain
RED	Radio Equipment Directive
RSSI	Radio Signal Strength Indicator
SF	Spreading Factor
SNR	Signal to Noise Ratio
TOA	Time On Air

IV. Annexe C - Liste des questions pour l'étude théorique

Ci-dessous vous sont posés un ensemble de questions qui vous permettront de mieux comprendre le fonctionnement de l'interface radio LoRa, l'architecture générale d'un réseau LoRa(WAN) ainsi que les réglementations radio associées. A l'issue des trois premières séances, vous construirez un document au format powerpoint illustrant vos réponses (idéalement une slide par question) et le transmettez à l'enseignant. La séance suivante sera un échange autour de cette étude théorique.

1. Quelles sont les principales performances attendues d'une technologie dite LPWA ?
2. Quelles sont les bandes de fréquence utilisables par LoRa en Europe ? Quelles sont les limitations associées (puissance, rapport cyclique, dwell time, FHSS) ? Sont-elles identiques partout dans le monde ?
3. Quel standard harmonisé faut-il suivre pour la certification CEM d'un module radio LoRa en Europe ? Identifier les principales exigences pour ce module.
4. LoRa est-il protocole de couche physique ou de couche MAC ? Décrire la topologie d'un réseau LoRa(WAN). Quelles sont ces avantages pour une application IoT ?
5. Qu'est-ce qu'une DSSS ? Que représente le gain de traitement (processing gain) ?
6. Quel est le principe de fonctionnement de la modulation utilisée par LoRa ?
7. Dans le cadre de la modulation LoRa, comment distingue t-on un bit d'un symbole transmis et d'un chip ? Quel est le gain de traitement ?
8. Quelle est la structure d'un paquet LoRa ? Détailler chaque champ.
9. Comment déterminer le débit binaire transmis ? Le TOA ? A titre d'exemple, quels sont les paramètres pour assurer un débit binaire de l'ordre de 500 bits/s ?
10. Comment augmenter le débit binaire ? Améliorer la sensibilité ? A puissance d'émission constante, comment réduire la consommation électrique du module ?
11. Quelle est la sensibilité typique d'un récepteur LoRa ? On prendra comme référence le transceiver SX1272.
12. Deux nœuds d'un même réseau LoRa(WAN), un gateway LoRa peut-il recevoir deux signaux de même fréquence simultanément ? Comment devrait-on attribuer les valeurs de SF dans un réseau LoRa(WAN) ?
13. Comment augmenter la capacité d'un réseau LoRa(WAN) ?

V. Annexe D - Paramètres par défaut du réseau LoRa pour l'application parking intelligent

1. Zone à couvrir – Campus de Rangueil

- Surface de l'aire de service = 2.92 km²
- On estime le nombre de places de parking sur la zone de service à 4000.
- On estime le taux de rotation à 4 véhicules par place de parking et par jour.

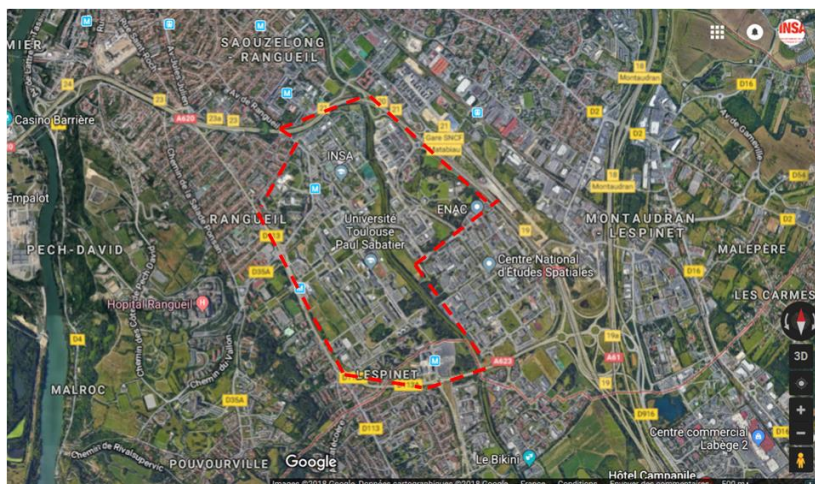


Figure 2 - Zone de service à couvrir

2. Position des sites d'installation des stations de base

Initialement, une seule station de base est prévue, placée sur le toit du département de génie électrique et informatique de l'INSA de Toulouse, dans un but expérimental.

3. Objectifs de couverture et d'interférences intra-systèmes

- 100 % des zones de stationnement couvertes, avec une probabilité de 90 %.
- Le risque de collision doit être inférieur à 90 %.

4. Caractéristiques générales interface radio LoRa

- Bandes de fréquence : trois canaux avec les fréquences centrales suivantes : 868.1 MHz, 868.3 MHz, 868.5 MHz. Initialement, une seule bande de fréquence est envisagée, celle à 868.1 MHz.
- PIRE max : à déterminer
- Bande passante : 125 kHz
- Spreading factor : de 7 à 12
- Coding rate : 4/5
- Préambule : 12 symboles
- Header : mode explicite

Les terminaux suivront le protocole LoRaWAN (qui ne sera pas étudié dans ce BE). Les nœuds communicants seront de classe A.

5. Caractéristiques des antennes

Les nœuds sont équipées d'antennes omnidirectionnelles, dont le gain par défaut est supposé égal à 0 dBi. Par défaut, on supposera que les stations de base sont équipées d'antennes omnidirectionnelles du même type.

6. Caractéristiques des trames

On supposera que toutes les trames transmises contiennent 12 octets de données utiles (payload).

VI. Annexe E - Présentation du transceiver LoRa Semtech SX1272

Le transceiver radio LoRa utilisé dans ce bureau d'étude est le modèle SX1272 développé par Semtech. Il s'agit d'un transceiver radio fonctionnant sur la bande 860 - 1000 MHz, en modulation (G)FSK, (G)MSK, OOK ou LoRa, capable de délivrer une puissance RF configurable de -1 dBm à +14 dBm par pas de 1 dB sur une antenne adaptée 50 Ω . En mode LoRa, sa sensibilité peut atteindre -137 dBm. La mesure du RSSI présente une dynamique de 127 dB. En mode veille, son courant de consommation atteint 10 nA. Ce composant intègre toute la couche physique nécessaire à un réseau LoRa. La figure ci-dessous décrit le schéma-bloc de ce circuit. Le transceiver nécessite une antenne externe et son réseau d'adaptation. Il peut dialoguer avec un microcontrôleur externe supportant les couches MAC et applicatives via une liaison de type SPI (broches MISO, MOSI, SCK et NSS). Plus d'informations sur ce transceiver sont disponibles à l'adresse suivante : <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1272/>.

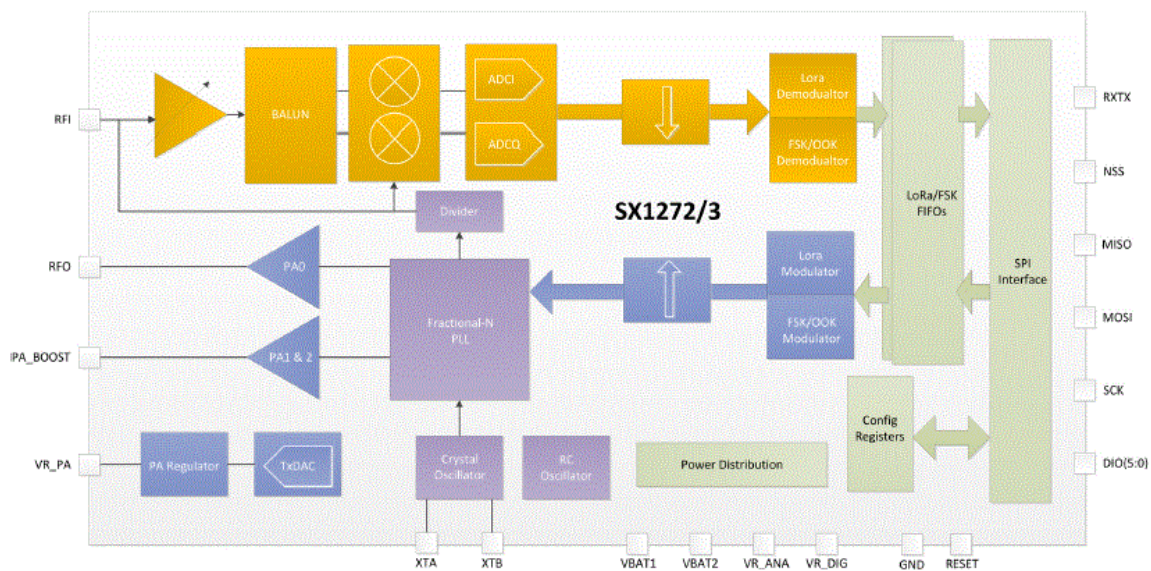


Figure 3 - Schéma-bloc du transceiver LoRa Semtech SX1272

Dans le cadre de ce bureau d'étude, ce transceiver est monté dans un module radio élémentaire, développé par Libelium et appelé SX1272 RF board, afin de servir de point d'accès LoRa. Celui-ci intègre le transceiver, le réseau d'adaptation de la sortie RF, l'oscillateur à quartz, un connecteur RP-SMA pour une antenne externe, et deux rangées de connecteurs afin de le monter sur une carte mère. L'oscillateur à quartz, servant à la synthèse des fréquences, est de 32 MHz. La résolution fréquentielle est de 61.035 Hz (voir p. 108 datasheet SX1272).

Le module a été conçu pour être compatible avec des cartes Arduino ou Raspberry-Pi. Le module n'intégrant aucun microcontrôleur assurant les couches MAC ou applicative, le module n'est pas compatible LoRaWAN. La Figure 4 présente une version simplifiée du brochage de ce module, avec les broches indispensables au bon fonctionnement du module. La librairie de configuration et pilotage du SX1272 compatible Arduino Uno-Mega est donnée dans le fichier zippé sx1272_INSAT.zip, disponible sur www.alexandre-boyer.fr.

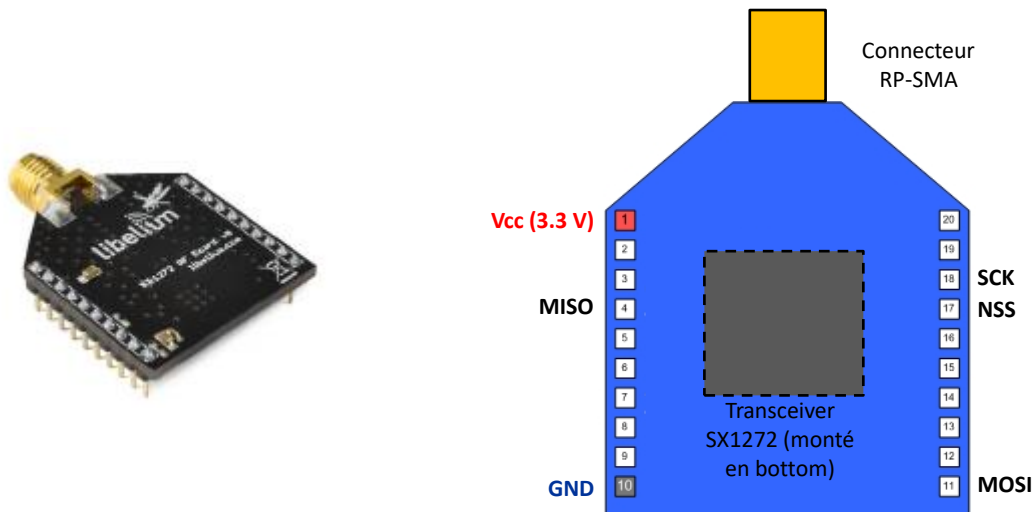
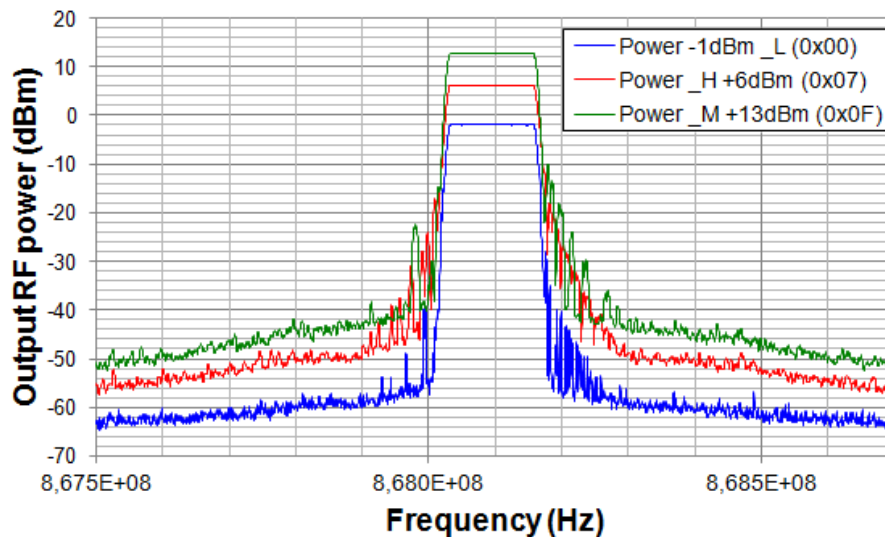


Figure 4 - Module radio LoRa Libelium et brochage simplifié (vue de dessus)

Les figures ci-dessous donnent quelques résultats de caractérisation radio des modules SX1272 Libelium.

Mesure de la puissance de sortie RF :

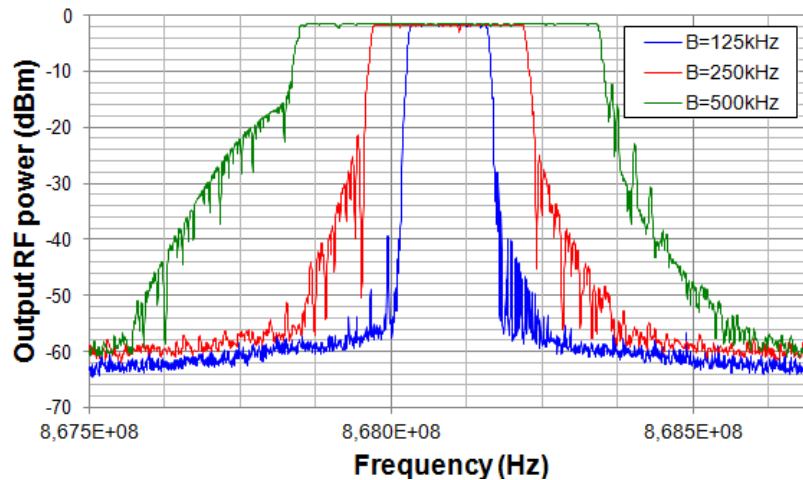
La sortie RF du module radio LoRa est connectée sur un analyseur de spectre (impédance d'entrée 50 Ω). Le spectre du signal de sortie est mesurée pour trois niveaux de puissance de sortie différentes. . La fréquence centrale est configurée à 868.1 MHz, la bande passante à 125 kHz, le spreading factor à 12, le coding rate à 4/5. L'analyseur de spectre est configuré en mode Max Hold, RBW = 10 kHz, VBW = 3 kHz.



Mesure de la bande passante :

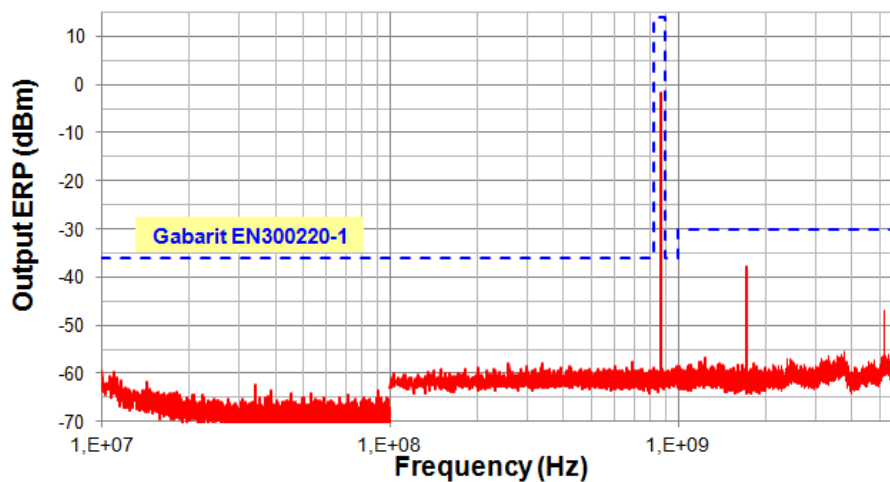
La sortie RF du module radio LoRa est connectée sur un analyseur de spectre (impédance d'entrée 50 Ω). Le spectre du signal de sortie est mesuré pour trois valeurs de bande passante différente. La fréquence centrale est configurée à 868.1 MHz, la puissance de sortie au minimum (-1 dBm), le

spreading factor à 12, le coding rate à 4/5. L'analyseur de spectre est configuré en mode Max Hold, RBW = 10 kHz, VBW = 3 kHz.



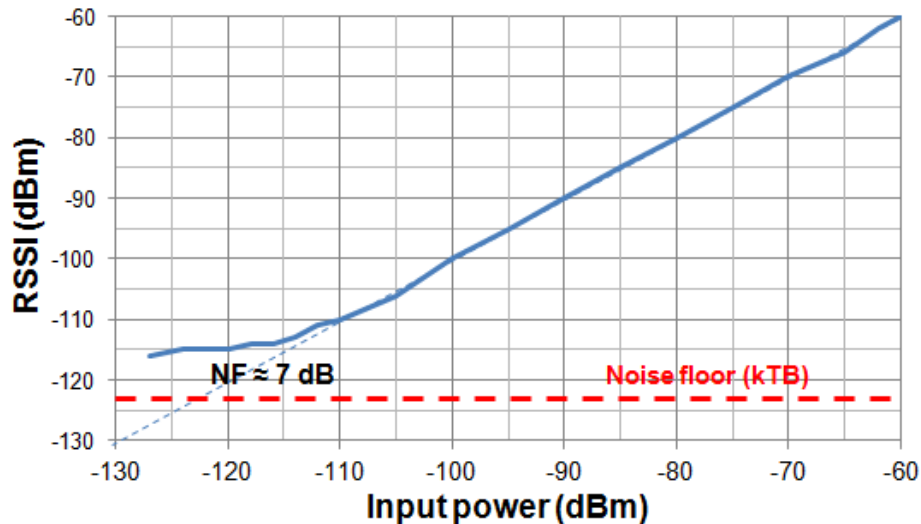
Mesure de l'émission spurieuse sur la sortie RF :

La sortie RF du module radio LoRa est connectée sur un analyseur de spectre (impédance d'entrée 50 Ω). Le spectre du signal de sortie est mesuré entre 10 MHz et 6 GHz afin d'identifier des émissions dites *spurious*. La fréquence centrale est configurée à 868.1 MHz, la puissance de sortie au minimum (-1 dBm) la bande passante à 125 kHz, le spreading factor à 12, le coding rate à 4/5. L'analyseur de spectre est configuré en mode Max Hold, RBW = 3 kHz et VBW = 10 kHz jusqu'à 100 MHz, RBW = 10 kHz et VBW = 30 kHz au-dessus de 100 MHz.



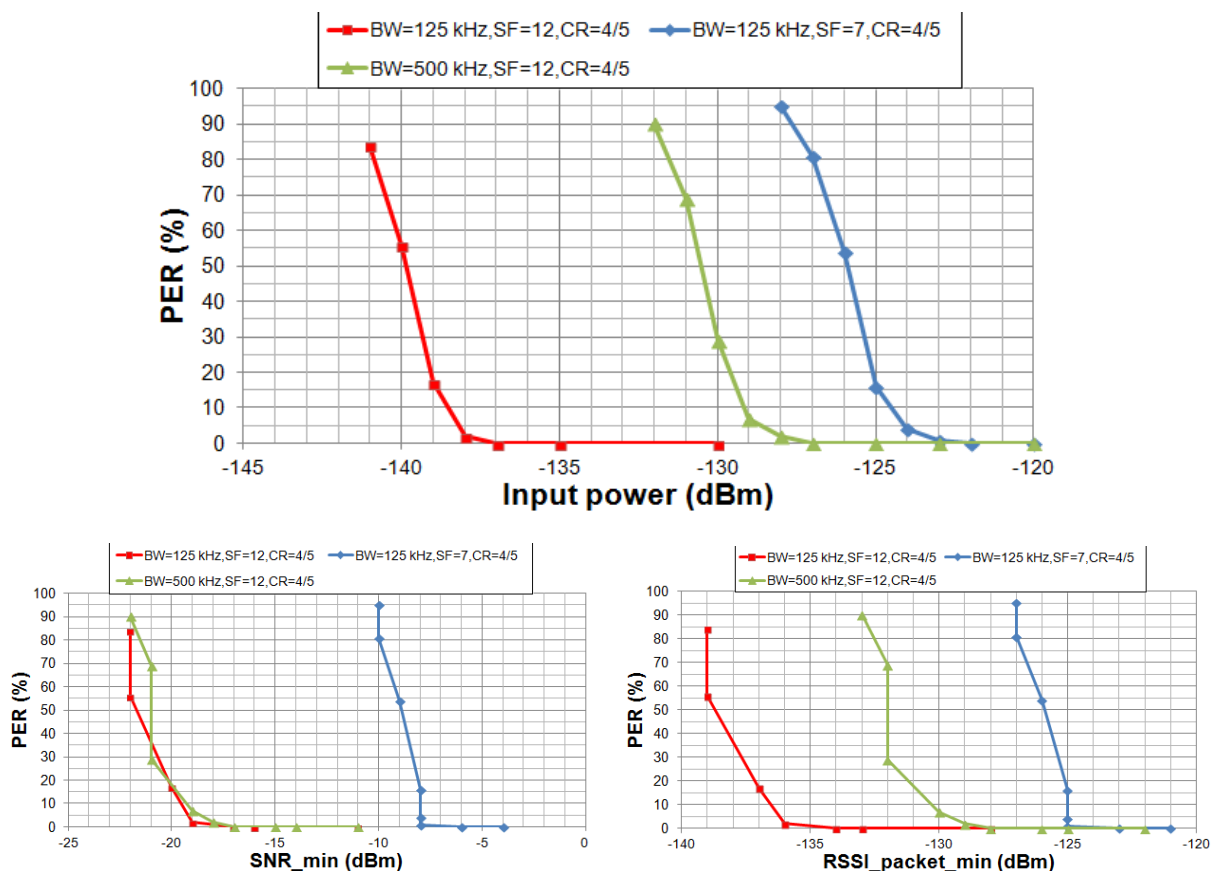
Evaluation de la linéarité du RSSI et du facteur de bruit (NF) :

Un signal sinusoïdal à 868.1 MHz est injecté en continu sur l'entrée RF du module radio SX1272. La bande passante est configurée à 125 kHz, le spreading factor à 12, le coding rate à 4/5. La puissance du signal injectée est mesurée et on relève le RSSI indiqué par le composant. Le seuil de bruit est calculé à température ambiante (300 °K).



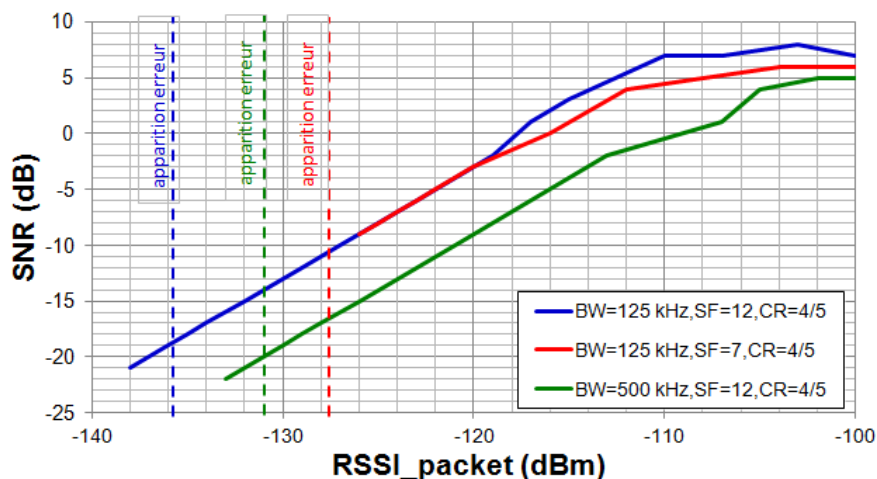
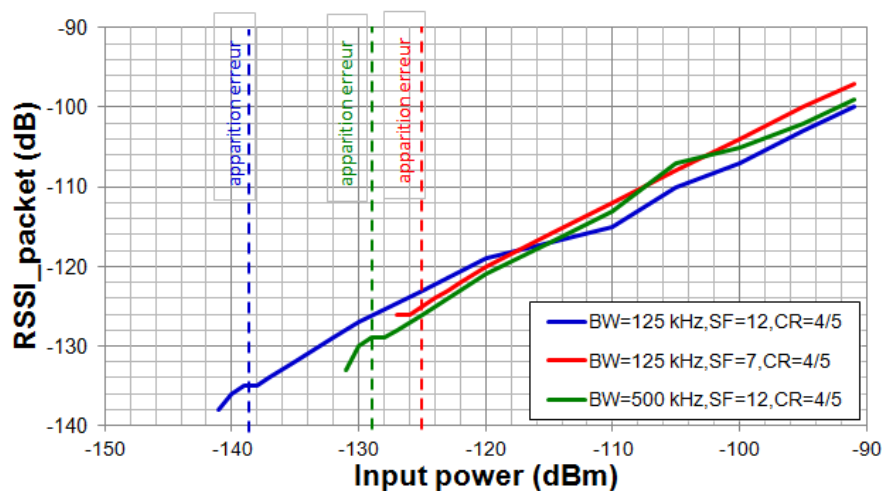
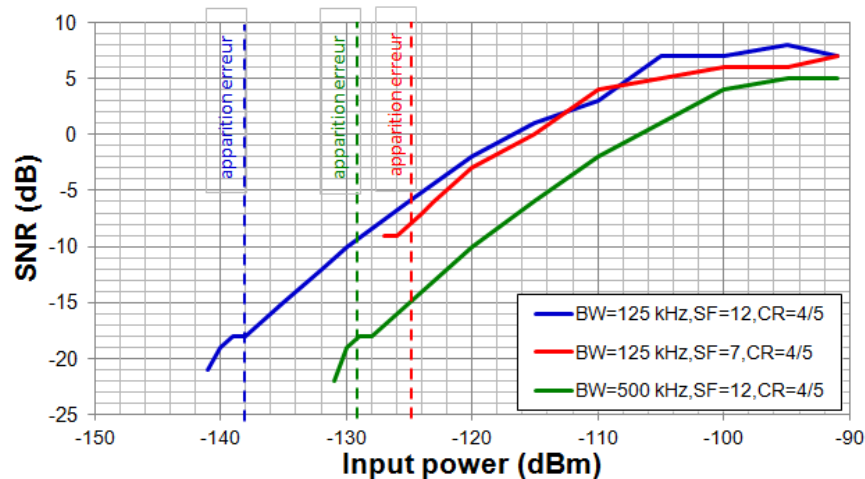
Evaluation de la sensibilité :

On envoie une série de cent trames modulées en entrée du module radio SX1272, dont on contrôle la puissance. On mesure le nombre de trames perdues ou erronées en fonction de la puissance du signal reçu par le module, et on en déduit le *packet error rate* (PER). Cette mesure est faite pour différentes configurations de bande passante et spreading factor. La fréquence centrale est de 868.1 MHz. Le résultat est aussi tracé en fonction des indicateurs RSSI_packet et SNR relevés par le module radio.



Relation entre puissance reçue, SNR et RSSI_packet

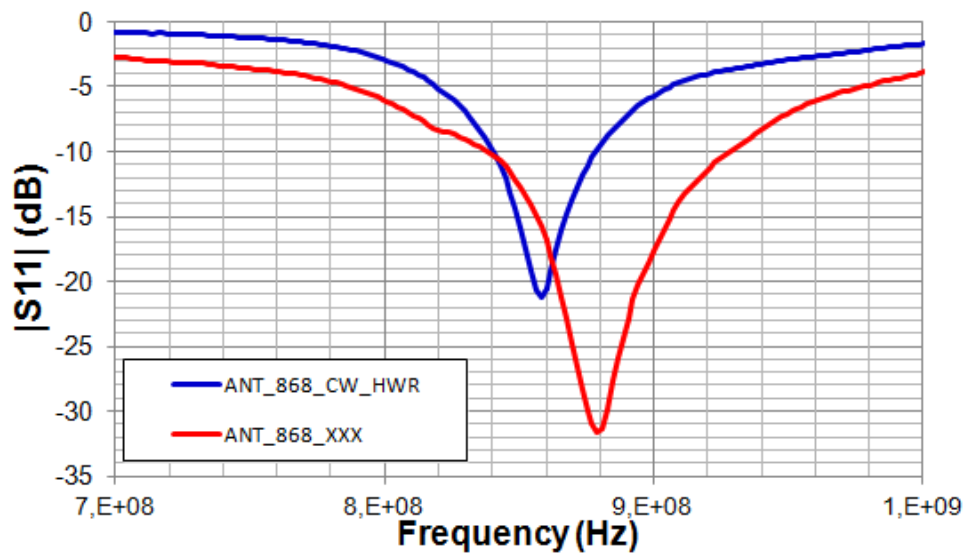
On transmet continuellement des trames modulées au module radio SX1272, dont on contrôle la puissance. On relève les valeurs de RSSI_packet et SNR indiquées par le module radio en fonction de la puissance du signal reçu. On indique aussi à partir de quel niveau de puissance les premières erreurs de réception apparaissent. Ces mesures sont faites pour une fréquence centrale de 868.1 MHz et différentes valeurs de bande passante et de spreading factor.



Dans le cadre de ce bureau d'étude, deux antennes fouet demi-onde seront utilisées, de modèles ANT_868_CW_HWR et ANT_868_XXX, développées par Linx. Ci-dessous, les caractéristiques mesurées de ces antennes.

Coefficient en entrée des antennes

On mesure à l'analyseur de réseau vectoriel les coefficients de réflexion en entrée des modèles d'antennes ANT_868_CW_HWR et ANT_868_XXX.



Estimation des gains (omnidirectionnel dans plan horizontal)

ANT_868_CW_HWR : -0.5 dBi

ANT_868_XXX : +2.5 dBi

VII. Annexe F - Présentation du matériel pour les mesures sur terrain

1. Station de base

L'installation de la station de base LoRa utilisée pour les mesures sur terrain est décrite à la Figure 5. Celle-ci est située sur le toit du département de génie électrique et informatique. Le module radio est installé dans un boîtier étanche, son antenne (ANT_868_CW_HWR) est placée sur un mât à 2.5 m du sol. Elle est connectée au module radio via un câble coaxial de 5 m de long et présentant 1.4 dB de pertes à 868 MHz.

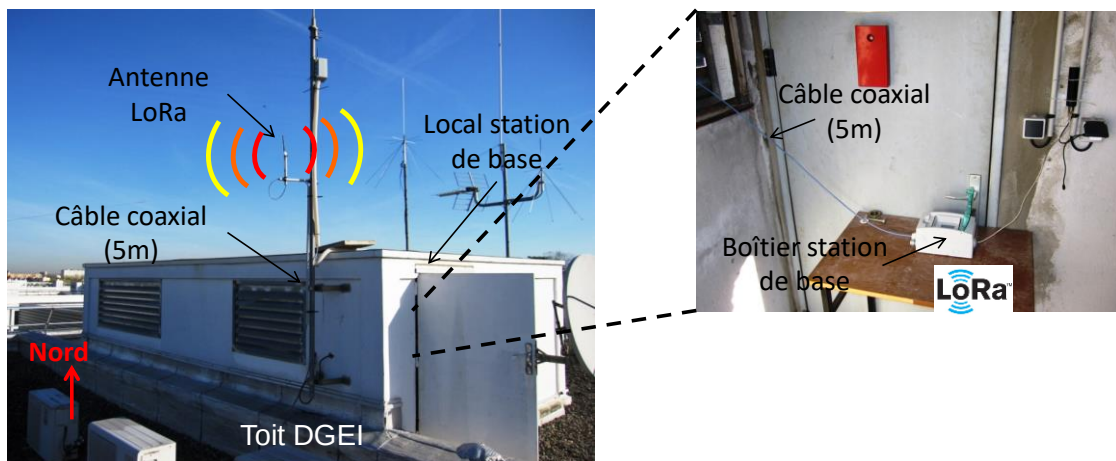


Figure 5 - Installation de la station de base LoRa sur le toit du département de génie électrique et informatique

- puissance d'émission conduite sur charge $50 \Omega = 14 \text{ dBm}$
- Fréquence centrale : 868.1 MHz
- BW = 125 kHz, CR = 4/5, SF = 12
- CRC activée, explicit header, préambule de 12 symboles
- Adresse de la station de base = 1
- Transmission en mode broadcast d'un message de 12 octets = "4IR-RT/INSAT"
- Pour les besoins de la mesure sur terrain, émission périodique toutes les 5 secondes

2. Nœud de mesure LoRa

Afin de déterminer la portée radio de la station de base, des mesures seront réalisées avec les nœuds LoRa, bâtis autour d'une carte Arduino MEGA 2560, d'un module radio LoRa Libelium, d'un module GPS (Adafruit Ultimate GPS Breakout v3), le tout interconnecté par une carte d'interconnexion. Ces quatre cartes et la manière dont elles sont assemblées sont décrites à la Figure 6. Le microcontrôleur ATMEGA2560 de la carte Arduino embarquera le programme de mesure, le module GPS servira à relever les positions des points de mesure et le module LoRa à capturer les trames LoRa et relever la puissance du signal reçu. Lorsqu'une carte Arduino MEGA 2560 est utilisée, les deux cavaliers doivent être mis dans la position 'M', comme indiqué ci-dessous. La carte d'interconnexion est aussi compatible avec une carte Arduino Uno, à condition de mettre les deux cavaliers dans la position 'U'.

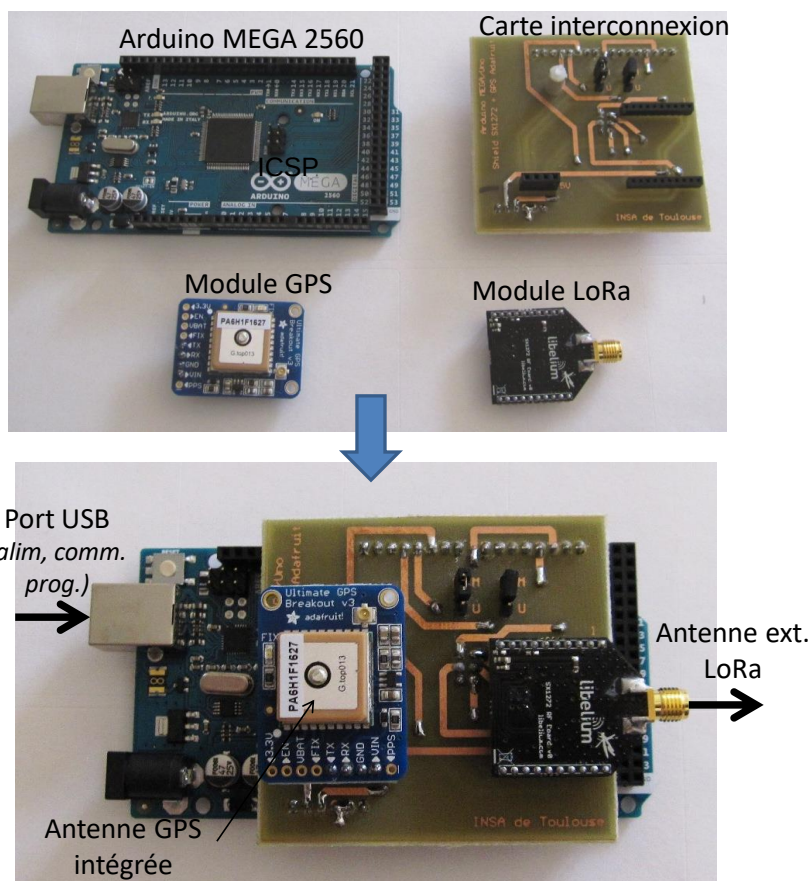


Figure 6 - Cartes constituant le nœud de mesure LoRa (en haut) et leur assemblage (en bas)

Les informations sur la carte Arduino MEGA 2560 sont disponibles sur <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>. Celles sur le module GPS sur <https://learn.adafruit.com/adafruit-ultimate-gps/downloads>. Le tableau ci-dessous liste les connexions entre les broches de la carte Arduino avec les modules GPS et LoRa.

Broches carte Arduino MEGA 2560	Broches module GPS	Broches module LoRa
3.3 V		1. Vcc
5 V	Vin	
GND	GND	10. GND
2		17. NSS
18. TX1	RX	
19. RX1	TX	
ICSP. MISO		4. MISO
ICSP. SCK		18. SCK
ICSP. MOSI		11. MOSI

La liaison entre la carte Arduino et le module LoRa est assurée par un lien SPI, dont la plupart des signaux passe par le connecteur ICSP décrit ci-dessous.



Figure 7 - Connecteur ICSP (carte Arduino MEGA 2560)

Le développement des applications embarquées sur Arduino nécessite l'installation de l'outil Arduino IDE disponible sur <https://www.arduino.cc/en/main/software>. La plupart de librairies requises sont pré-installées. L'utilisation du module LoRa nécessite la librairie `sx1272_INSAT.h / sx1272_INSAT.cpp`, disponible dans le dossier zippé `Exemples_codes_sources_Arduino_LoRa_GPS .zip`, téléchargeable sur www.alexandre-boyer.fr/enseignements. L'utilisation du module GPS nécessite la librairie `Adafruit_GPS.h / Adafruit_GPS.cpp`, disponible sur <https://github.com/adafruit/Adafruit-GPS-Library/archive/master.zip>, mais aussi dans le dossier zippé `Exemples_codes_sources_Arduino_LoRa_GPS .zip`. Selon la version d'Arduino IDE, il est possible que la librairie `arduinoUtils.h` ne soit pas installée. Elle est aussi fournie dans le dossier zippé, dans le dossier `arduino-api`. **Pour installer ces différentes librairies, copier les fichiers dans des répertoires séparés puis copier les dans le répertoire `\Arduino\libraries\`, avant le lancement d'Arduino IDE.** A chaque nouveau démarrage d'Arduino IDE, l'outil fait le tour de l'ensemble des librairies présentes dans le répertoire `\Arduino\libraries\`. Vous pourrez contrôler les librairies installées depuis l'IDE dans le menu `Croquis > Inclure une bibliothèque > Gérer les bibliothèques`.