

Université de Mons
Faculté des Sciences
Département d’Informatique
SERVICE RESEAU ET TELECOMMUNICATION

**Identifying IoT nodes by spying on their
radio signal**

Directeur : M^{me} Bruno QUOITIN

Mémoire réalisé par
Arnaud TULIPPE HECQ

Rapporteurs : M^r Prénom NOM
M^r Prénom NOM

en vue de l’obtention du grade de
Master en Sciences Informatiques



Année académique 2023-2024

Remerciements

Nous remercions ...

Table des matières

Introduction	2
1 Rappels et nomination des technologies	3
1.1 Signal radio	3
1.2 Traitement du signal	4
1.2.1 Modulation	4
1.2.2 Gestion du bruit	8
1.2.3 Transformée de Fourier	8
1.3 LoRa	10
1.3.1 couche physique LoRa	11
1.3.2 LoRaWAN	14
2 Travaux similaires et autres contributions	20
2.1 Identification d'appareils dans l'iot	20
2.1.1 historique et évolution des préoccupation de sécurité dans l'iot	20
2.1.2 Approches d'identification dans l'iot	23
2.2 Analyse de la technologie lora	24
2.3 identification de device lora	24
2.3.1 RFFI avec DCTFs	24
2.3.2 RFFI avec spectrogrammes	25
3 Expérimentations	26
3.1 Matériel	26
3.1.1 radio logicielle	26
3.1.2 Module d'émission Lora	30
3.1.3 Logiciels	32
3.2 Librairie python	37
3.3 Génération et réception d'un signal LoRa	37
3.3.1 analyse avec GQRX	38
3.3.2 analyse avec URH	40

TABLE DES MATIÈRES	1
3.3.3 analyse avec matplotlib	43
3.3.4 Automatisation du signal et preprocessing	44
3.4 Méthode "Constellation traces"	44
4 Résultats	47
4.1 Méthode des constellations Traces	47
4.1.1 paramétrage	47
4.1.2 training phase	47
4.1.3 testing phase	47
4.1.4 résultats	47
Annexes	48
A Première annexe	48
B Deuxième annexe	49

Introduction

L'avènement de *L'Internet of Things* (IoT) a lancé une nouvelle ère d'appareils connectés, ouvrant de nouvelles possibilités de partage de l'information, d'automatisation et de protection. Bien que le concept lui-même soit prometteur, la technologie qui l'accompagne est essentielle. Les premières technologies utilisées pour l'IoT étaient les technologies sans fil déjà présentes comme le Wifi ou le Bluetooth. Elles ont cependant plusieurs limitations : une consommation en énergie élevée, une portée restreinte et parfois même un coût d'infrastructure trop important. Dans ces circonstances est apparu *LoRa*, une technologie développée en particulier pour l'IoT. Sa capacité à gérer les communications longue portée même dans des environnements urbains très densifiés est un grand atout pour le domaine.

L'expansion de L'IoT soulève une nouvelle problématique de sécurité. Entre autres, l'identification des noeuds au sein des réseaux est essentielle. Il a été découvert que des noeuds fabriqués avec les mêmes microprocesseurs et modèles d'émetteurs-récepteurs radio peuvent présenter de subtiles particularités dans les caractéristiques de leurs signaux. Cette variabilité intrinsèque de la transmission des signaux radio peut être exploitable pour distinguer les noeuds d'un réseau. En écoutant leurs signaux radio et en analysant leurs signatures distinctes, il devient possible de les identifier.

Ce travail est structuré en quatre parties. Le premier chapitre sert d'aperçu global du signal radio afin d'y développer et rappeler les concepts de télécommunication de base. Ce chapitre présente également les technologies LoRa et LoRaWAN à travers leurs caractéristiques et leur pertinence dans l'IoT. Le second chapitre rassemble les travaux qui ont déjà été effectués dans ce domaine. Le troisième chapitre est dédié à l'étude expérimentale du sujet. Les aspects pratiques y seront appliqués, notamment l'utilisation de radio logicielle afin de capturer des signaux radio. Ces signaux seront ensuite analysés grâce à diverses méthodes détaillées dans ce chapitre. La dernière partie du travail présentera les résultats obtenus en suivant l'analyse effectuée au chapitre précédent. Enfin, le travail sera achevé en concluant sur de potentielles implications plus larges à ce sujet ainsi que des recherches plus approfondies.

Chapitre 1

Rappels et nomination des technologies

1.1 Signal radio

Un signal est une variation dans l'espace ou dans le temps d'une quantité physique contenant de l'information. Un signal peut être continu ou discret, on le nomme alors respectivement analogique ou numérique. Le type de signal dépend notamment de l'information qu'il contient. Un signal analogique est continue en amplitude, ce qui veut dire qu'il peut contenir un nombre infini de valeur, ainsi que prendre toutes les valeurs possibles, là où un signal numérique contient généralement un nombre fini de valeur (par exemple des 0 et 1). Les deux catégories ne sont pas incompatible car il est souvent nécessaire en télécommunication de pouvoir passer de l'un à l'autre.

L'utilisation de signaux radio en télécommunication confère de nombreux avantages, comme la portée, la vitesse de transmission ou encore le coût de propagation. Pouvoir transporter de l'information sans avoir recours à du support matériel complet (pas besoin de cable, le signal passe dans l'air) réduit considérablement le cout de la transmission. Ajouté à cela, il est possible d'adapter un signal pour le rendre compatible avec diverse canaux de transmission et de réception, grâce à la modulation. La modulation est une technique permettant de modifier les propriétés du signal lui permettant de transporter de l'information.

En télécommunication, les signaux sont des ondes électromagnétiques appelées signal radio. Les signaux comportent de nombreuses caractéristiques qui les déterminent :

la fréquence, mesurée en Hertz (*Hz*). Elle détermine le nombre de cycle qu'accomplit le signal par seconde. Une onde radio possède une fréquence entre 9kHz et 300GHz.

La largeur de spectre, elle dépend de la fréquence car c'est l'écart entre la plus haute et la plus basse fréquence du signal. Une plus grande largeur permet de transmettre plus d'informations, mais consomme plus d'énergie.

L'amplitude. Selon le type de signal l'attribut possède différentes fonctions. Dans le cas d'un signal analogique l'amplitude détermine la magnitude de l'onde pour n'importe quel point dans le temps. Dans un signal numérique l'amplitude est interprétée différemment. Les signaux numériques sont encodés avec des valeurs discrètes, où chaque valeur représente un niveau (par exemple 0 ou 1). L'amplitude permet de faire la distinction entre ses niveaux.

la puissance, mesurée en Watt (W). C'est la force du signal, un attribut important pour la réception du signal notamment. Bien que le Watt soit utilisé pour décrire la puissance à l'émission ou la réception, les variations de puissances sont généralement exprimées en décibels (dB). Le décibel est une unité logarithmique permettant de mesurer plus facilement les relations entre les différents niveaux de puissance.

le *Signal to Noise Ratio* (SNR). Cet attribut mesure la qualité du signal. une valeur élevée indique que le pourcentage de bruit est faible.

le *Bit rate*, ou le taux de transmission mesure la quantité de donnée transmise en bit par seconde. Cet attribut est exclusif aux signaux numériques. On parle de *Baud rate* pour mesurer la quantité de symboles transmises par seconde. Ce n'est pas exactement l'équivalent du bit rate car un symbole peut contenir plusieurs bits, mais le Baud rate est utilisé pour les signaux numériques et analogiques.

1.2 Traitement du signal

1.2.1 Modulation

La réception d'un signal radio nécessite une antenne dont les dimensions dépendent de la longueur d'onde du signal. La longueur d'onde d'un signal représente la distance entre deux points consécutifs de même phase dans l'onde. La longueur d'onde s'obtient par la formule suivante :

$$c = f * \lambda \quad (1.1)$$

où c est la vitesse de la lumière,
 f est la fréquence,
 λ est la longueur d'onde.

Il est donc possible d'adapter les caractéristiques d'un signal pour le rendre compatible à différentes antennes, via la modulation. La modulation est le procédé par lequel un ou plusieurs attributs du *baseband signal* (le signal modulant, contenant l'information à transmettre) vont être altéré par le *carrier signal* (un signal porteur, utilisé pour être combiné avec le signal modulant) pour devenir un signal modulé, le *modulated signal*.

En plus de sa compatibilité, un signal modulé a l'avantage d'être facilement transmissible sur une grande portée sans perdre en puissance.

Parmis ces différents attributs, certains sont utilisés pour effectuer une modulation. Les trois modulations les plus utilisées sont basées sur les attributs de la fréquence, l'amplitude et la phase. La modulation en fréquence (*Frequency modulation, FM*) consiste à encoder l'information en faisant varier la fréquence en maintenant l'amplitude constante. La modulation en amplitude (*Amplitude modulation, AM*) est le procédé inverse, c'est à dire encoder l'information en faisant varier l'amplitude tout en gardant la fréquence constante. La modulation en phase (*Phase Modulation, PM*) fait varier la phase de la porteuse proportionnellement à l'amplitude instantanée du baseband signal.

La modulation en amplitude est plus ancienne et est encore utilisée dans beaucoup de systèmes. Cette technique possède moins de contrainte et est notamment plus simple à implémenter.

Soient $u(t)$ un baseband signal et $v(t)$ un carrier signal, la modulation en amplitude s'effectue en multipliant les deux signaux pour obtenir le signal modulé

$$s(t) = u(t).v(t) \quad (1.2)$$

Prenons par exemple

$$u(t) = \sin(2\pi f_u t) \text{ avec } f_u = 5 \text{ Hz},$$

$$v(t) = \cos(2\pi f_c t) \text{ où } f_c = 50 \text{ Hz}.$$

La Figure 1.1 montre le signal modulé $s(t)$ via la modulation en amplitude.

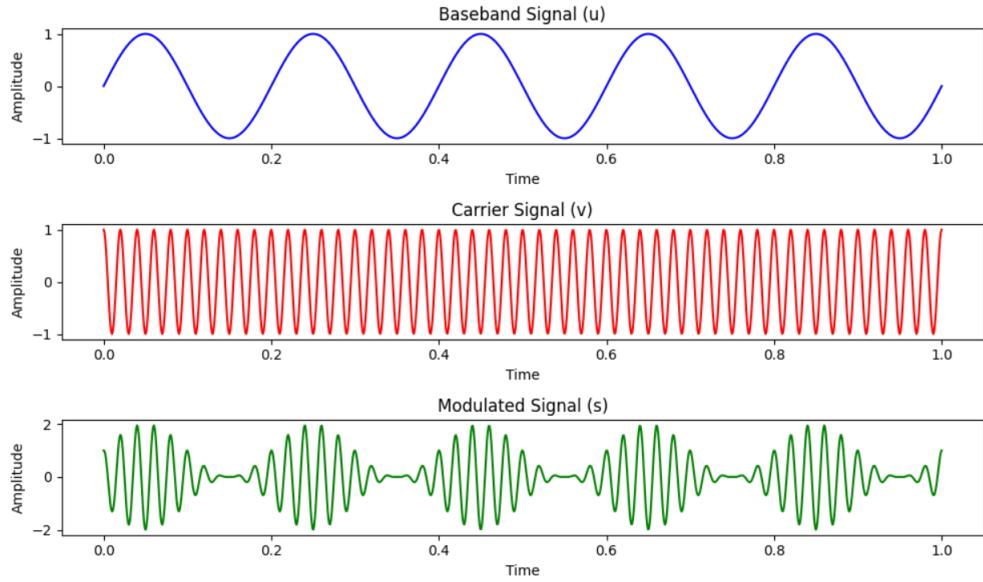


FIGURE 1.1 – Exemple de modulation en amplitude

La modulation en fréquence permet d'obtenir des transmissions de meilleures qualités plus résistantes à leur environnement tout en gardant une puissance d'émission constante.

Soient $u(t)$ un baseband signal et $v(t)$ un carrier signal, le signal modulé en fréquence $s_{fm}(t)$ est le résultat suivant :

$$u(t) = \sin(2\pi f_u t) \quad (1.3)$$

$$v(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \quad (1.4)$$

$$s_{fm}(t) = \cos(2\pi f_c t + \Delta f \cdot u(t) \cdot t + \phi_c) \quad (1.5)$$

Prenons par exemple

$$u(t) = \sin(2\pi f_u t) \text{ avec } f_u t = 5 \text{ Hz},$$

$$v(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \text{ où } f_c t = 50 \text{ Hz}.$$

La Figure 1.2 montre le signal modulé $s_{fm}(t)$ via la modulation en fréquence pour une phase initiale du carrier signal $\phi_c = 0$ avec une dérivation en fréquence $\Delta f = 10 \text{ Hz}$.

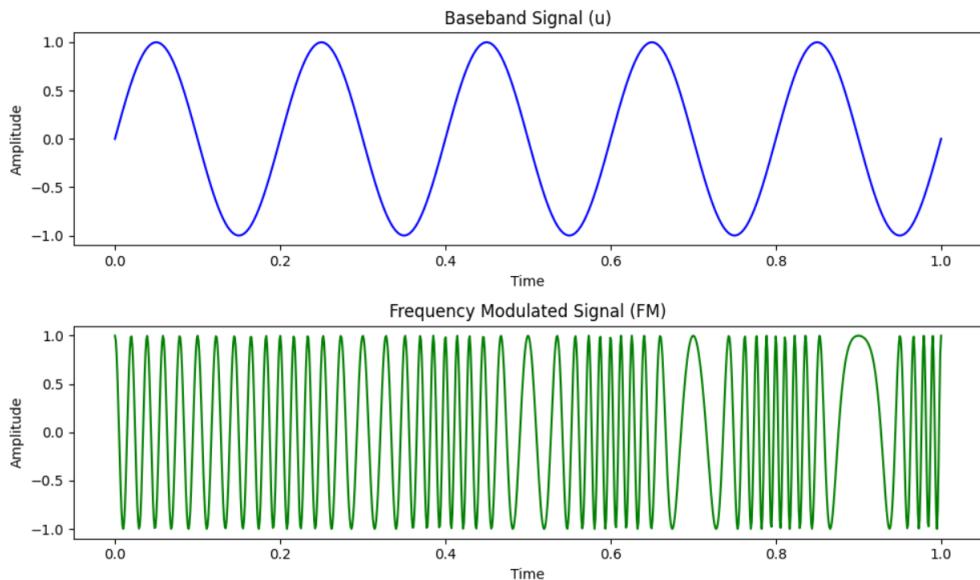


FIGURE 1.2 – Exemple de modulation en fréquence

La modulation en phase permet généralement d'obtenir une meilleur utilisation de la bande passante que les autres modulations car les variations de phase peut encoder plus d'informations, ce qui augmente la quantité de données transmises.

Soient $u(t)$ un baseband signal et $v(t)$ un carrier signal, le signal modulé en phase $s_{pm}(t)$ est le résultat suivant :

$$u(t) = \sin(2\pi f_u t) \quad (1.6)$$

$$v(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \quad (1.7)$$

$$s_{pm}(t) = \cos(2\pi f_c t + K_p \cdot u(t)) \quad (1.8)$$

Prenons par exemple

$$u(t) = \sin(2\pi f_u t) \text{ avec } f_u t = 5 \text{ Hz,}$$

$$v(t) = \cos(2\pi f_c t + \phi_c) \text{ où } f_c t = 50 \text{ Hz.}$$

La Figure 1.3 montre le signal modulé $s_{pm}(t)$ en phase pour une phase initiale du carrier signal $\phi_c = 0$ avec un index de modulation de phase $K_p = 8$.

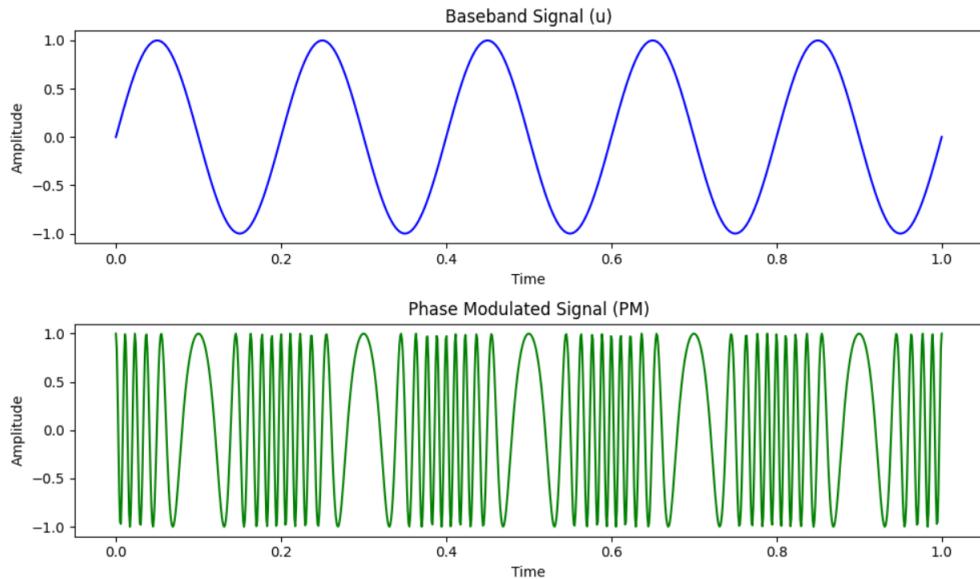


FIGURE 1.3 – Exemple de modulation en phase

1.2.2 Gestion du bruit

L'un des attributs cités concerne le bruit. Un signal est toujours affecté de petites fluctuations plus ou moins importantes, et dont les origines peuvent être diverses. Ces perturbations, appelée bruit ou *noise* en télécommunication se définissent par l'altération non souhaitée de l'intégrité d'un signal. Le bruit peut prendre différentes formes, des perturbations essentiellement impulsionales engendrées par des commutations de courants ou alors du bruit de fond généré dans les câbles et les composants électroniques en raison des mécanismes statistiques de la conduction électrique. Il est possible de réduire voir éliminer l'influence des perturbations impulsionales. En revanche, le bruit de fond est lui irréductible. Tout signal sans bruit n'existe pas, même à l'émission. Il est cependant possible que le bruit devienne invisible si son niveau est très faible. L'attribut SNR est donc un critère de la qualité du signal.

1.2.3 Transformée de Fourier

Pour effectuer une analyse de signal, sa représentation est capitale. Les Figures 1 et 2 représentent des signaux en fonction du temps écoulé. Il est possible de représenter des signaux selon une autre composante, la fréquence.

La transformée de Fourier est un outil fondamental utilisé pour analyser et décomposer des signaux complexes en composantes fréquentielles. En trans-

formant un signal dans le domaine temporel en sa représentation dans le domaine fréquentiel, la transformée de Fourier révèle les différentes composantes fréquentielles présentes dans le signal. En fonction du type de signal, la transformée de Fourier est adaptée.

Pour les signaux continus, la *CFT* (Transformée de Fourier continue) convertit une fonction du temps en fonction de la fréquence en intégrant le signal par rapport aux sinusoïdes de toutes les fréquences possibles. Cette transformation fournit les informations d'amplitude et de phase pour chaque composante de fréquence présente dans le signal.

Pour les signaux discrets et échantillonnés, la *DFT* (Transformée de Fourier discrète) calcule un ensemble fini de composantes de fréquence. Il est calculé à l'aide d'un nombre fini d'échantillons, ce qui donne des composantes de fréquence discrètes. Il existe un méthode simplifiée pour les signaux discrets appelé *FFT* (*Fast Fourier Transform*)[?]. Il s'agit d'un moyen plus rapide de calculer la transformée de Fourier, en particulier pour les signaux numériques comportant un grand nombre de points de données. L'avantage principal de cet algorithme permet de réduire le temps de calcul en divisant la DFT en sous problèmes. La FFT est une méthode très utilisée pour l'analyse de signaux.

1.3 LoRa

LoRa (Long Range) est une technologie de communication sans fil qui permet de transmettre des données sur de longues distances avec une faible consommation d'énergie. Elle a été développée par la société française Cycleo et est maintenant gérée par la fondation LoRa Alliance, qui regroupe plusieurs entreprises et organisations du monde entier.

LoRa est principalement utilisée dans l'IoT. Elle se distingue par sa portée étendue, qui peut atteindre plusieurs kilomètres en milieu urbain et plusieurs dizaines de kilomètres en milieu rural, ainsi que par sa faible consommation d'énergie, qui permet de prolonger la durée de vie des appareils connectés. Une longue portée avec un puissance limitée induit une plus faible bande passante que les autres technologies sans fil (le Wifi, la 4G, Bluetooth etc).

LoRa utilise une bande de fréquences qui varie selon les régions du monde où LoRa est déployée :

- en Europe, la bande de fréquences autorisée est comprise entre 863 et 870 MHz, ce qui correspond à l'*ISM radio band*, un bande dédié aux recherches qui ne nécessite pas de license d'émission.
- aux États-Unis, elle se situe entre 902 et 928 MHz,
- en Chine, la fréquence autorisée varie entre 779 et 787 MHz,
- les régions restantes ont elles aussi une fourchette unique.

La technologie LoRa utilise la modulation appelé *Chirp Spread Spectrum Modulation* (CSS). La modulation CSS utilise un signal chirp, c'est à dire un signal modulé en fréquence linéaire. Ce signal a une amplitude constante mais balaie tout le spectre de la bande passante de manière linéaire dans une période de temps définie. Cette technique de modulation sera détaillée à la section 1.3.1.2

La technologie LoRa utilise également une technique de multiplexage en temps partagé (*Time Division Multiple Access*) pour permettre à plusieurs appareils de partager la même bande de fréquences de manière à maximiser l'utilisation de la capacité de transmission. Elle utilise également une technique de diffusion de données (*multicast*) pour envoyer les mêmes données à plusieurs appareils simultanément, ce qui permet de réaliser des économies de bande passante et d'énergie (source : LoRa Alliance)

En plus de sa portée étendue et de sa faible consommation d'énergie, LoRa se distingue par sa sécurité de transmission, qui est assurée grâce à l'utilisation de codes de sécurité uniques et à la possibilité de chiffrer les données transmises. Lora n'est pas exclusivement lié au protocole LoraWan. Ce protocol sera décrit en détails à la section 1.3.2. Si LoRa opère à un niveau plus bas que la plupart des protocoles réseau, LoRaWan via son infrastructure (notamment les *gateway*

permet entre autre aux appareils LoRa de pouvoir utiliser différents protocoles et d'être compatibles avec un grand nombre de protocoles de communications comme *TCP/IP (transport layer protocol)*, *HTTP (hypertext transfer protocol)* ou *MQTT(message queuing telemetry transport)*.

Toutes ces particularités font de LoRa une technologie complémentaire à celles déjà existantes plutôt que rivale. LoRa se compose de deux éléments principaux : la couche physique de la technologie et LoRaWAN, la couche MAC (*Media Access Control*, une sous couche de la couche liaison de données dans le modèle OSI *Open Systems Interconnection*. la couche physique de LoRa gère la fréquence radio ainsi que la modulation. LoRaWAN gère les aspects réseaux comme la sécurité, la propagation, l'adressage et la sécurité.

1.3.1 couche physique LoRa

1.3.1.1 Découpage de la couche physique

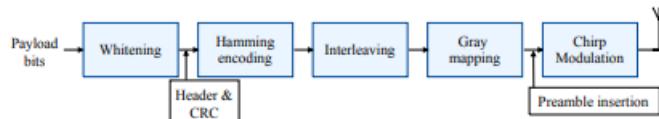


FIGURE 1.4 – Etapes de la transformation des données dans un émetteur LoRa[?]

Les étapes de la conception de l'envoi de données dans la couche physique de LoRa sont montrés dans la figure 1.4 :

- Le codage de canal (*channel coding*) est une technique utilisée dans les systèmes de communication sans fil pour améliorer la robustesse et la fiabilité de la transmission des données. Dans le cas de LoRa, le codage de canal utilise le *Forward Error Correction (FEC)* pour corriger les erreurs causées par du bruit. La méthode FEC ajoute de l'information redondante sur les données.
- Le mélange de canal (*channel interleaving*) suit le codage de canal. Cette technique consiste à réarranger les bits ou les symboles de données en les dispersant sur plusieurs canaux (ici on fait référence à des streams ou à des bandes de fréquences spécifiques plutôt qu'à des canaux physiques). Cela permet de réduire l'impact de *burst errors*, des erreurs consécutives.
- Le blanchiment de canal (*channel whitening*) est la dernière étape avant la modulation du signal. Cette technique consiste à utiliser une transformation aléatoire ou pseudo-aléatoire des données avant de les transmettre, de manière à répartir le spectre des fréquences de la transmission

sur une large gamme de fréquences. C'est une technique mathématique qui consiste à effectuer une transformation linéaire des données avec une matrice de covariance en un nouveau set de données dans la covariance est la matrice d'identité. Le but du blanchiment est de réduire la corrélation entre les différentes composantes fréquentielles et assurer que le signal possède une puissance similaire tout le long de son spectre.

- La modulation CSS est l'étape principale de LoRa. En effet, les étapes précédentes sont communes à de nombreuses technologies, mais la particularité de LoRa provient de la modulation. Cette étape est détaillée dans la section 1.3.1.2.

Chacune des étapes décrites doit être inversément réalisée pour le récepteur. Ainsi pour la récupération de donnée à l'arrivée, l'appareil récepteur gère la démodulation, le déblanchiment, le démellement et de décodage.

Cette analyse a été faite en *Reverse Engineering* par Alexandre Marquet, Nicolas Montavont et Georgios Z. Papadopoulos [?]. Le reverse engineering consiste à analyser un produit ou un système afin de comprendre comment il fonctionne ou d'identifier ses principes de conception. Dans le contexte de LoRa, le reverse engineering examine la technologie derrière LoRa afin de comprendre ses principes de base et sa conception.

1.3.1.2 Modulation CSS

Contrairement aux modulations classiques en amplitude ou en fréquence, la modulation CSS étale le signal sur une large bande de fréquence. La modulation en fréquence est linéaire et utilise des chirps. Un chirp est un signal dont la fréquence change en continu tout en conservant une amplitude constante. Il existe deux types de chirps : les *upchirp* et *downchirp*. Dans un upchirp la fréquence augmente avec le temps tandis que dans un downchirp la fréquence diminue. Soit $s_{chirp}(t)$ un signal chirp avec

$$s_{chirp}(t) = \sin(2\pi(f_0 + (\frac{f_1 - f_0}{T})t)t) \quad (1.9)$$

alors la figure 1.5 montre s_{chirp} en fonction du temps où $f_0 = 10\text{Hz}$, $f_1 = 100\text{Hz}$ et $T = 1$ seconde. On observe que le signal oscille de plus en vite plus vite au fur et à mesure que le temps augmente.

Le signal est donc séparé sur une large bande de fréquence, permettant par exemple plusieurs transmissions sans causer d'interférence. La modulation CSS est l'une des principales contributions au fait que LoRa possède une faible consommation et une longue portée. Cette technique est très bien intégrée aux appareils à faible puissance utilisés par LoRa.

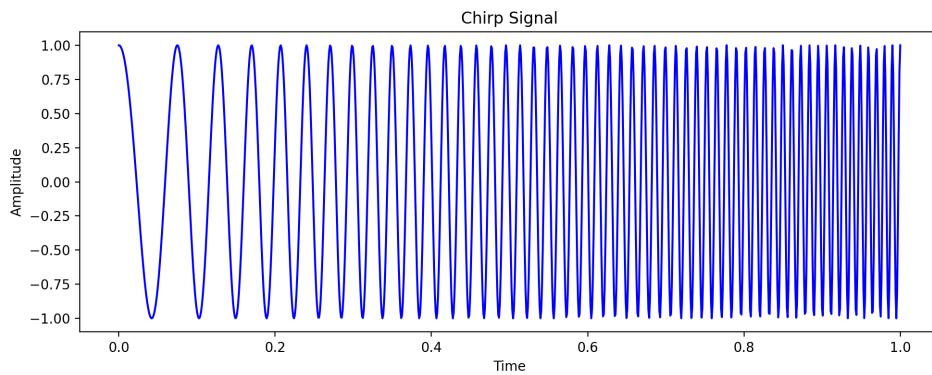


FIGURE 1.5 – Example d'un signal modulé en upchirp en fonction du temps

1.3.1.3 Spreading factor

LoRa permet d'envoyer des paquets sur une longue distance à faible puissance. Selon l'environnement dans lequel les appareils LoRa sont présents, il peut être utile de pouvoir ajuster certaines capacités.

Le facteur d'étalement (*Spreading Factor, SF*) permet de déterminer le taux de variation de fréquence pour un signal. Modifier le spreading factor ajuste différentes propriétés de la communications [?]. Par exemple, si on augmente le spreading factor, les quatre conséquences principales sont :

- l'augmentation de la portée. En effet augmenter le SF réduit le bitrate et augmente le *processing gain* (l'augmentation de la puissance du signal atteint en l'étalant sur une plus large bande).
- Augmentation de la résistance aux interférences. Comme le signal est étalé sur une bande plus largeur, il y a moins de risque de subir des interférences.
- Plus petit débit de données. Le spreading factor contrôle le taux de chirp, et du coup la vitesse de transmission de donnée. Augmenter le spreading factor signifie ralentir la vitesse d'émission des chirps. Pour chaque augmentation du spreading factor, le taux de transmission de donnée est réduit de moitié.
- Plus faible consommation. Les données transmises à un taux plus faible consomment moins d'énergie, ce qui prolonge la durée de vie des appareils dont l'économie d'énergie est une priorité.

Diminuer le spreading factor engendre l'effet inverse [?].

1.3.1.4 Structure d'un paquet LoRa

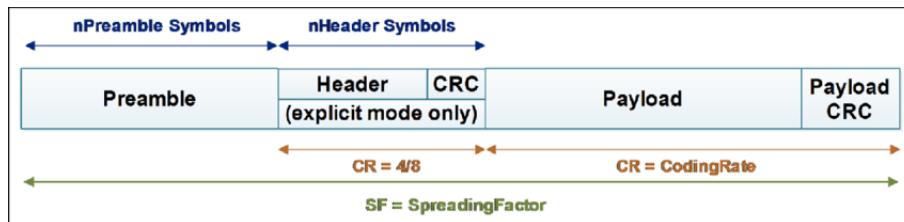


FIGURE 1.6 – Structure d'un paquet Lora[?]

La figure 1.6 montre la structure d'un paquet Lora. Un paquet LoRa contient 3 parties différentes [?] :

- Le *preamble*. La première partie du paquet, composée d'un nombre variable d'upchirps. La valeur par défaut est fixée à 8 upchirps minimum. L'émetteur radio ajoute à cela un peu plus de 4 symboles (4.25), qui contiennent l'identificateur réseau ainsi que deux downchirps de synchronisation de fréquence. Ceci fixe le préambule à 12 symboles.
- Le *header* du paquet. Les informations sur la taille du paquet, le code rate, la présence d'un CRC (*cyclique redundancy check*) et la checksum sont incluses dans l'en-tête.
- Le *payload*. La dernière partie du paquet qui contient les données à transmettre. La taille maximale du payload est de 255 octets. En plus des données, le payload peut également contenir un CRC pour la détection d'erreurs. La longueur du CRC est généralement de 16 bits.

1.3.2 LoRaWAN

LoRaWAN est un protocole de type *Low Power Wide Area Network (LP-WAN)* désigné pour la communication longue portée. Ce protocole opère avec la technologie LoRa et lui fournit une infrastructure capable de maintenir une communication à longue portée et à faible cout dans l'IoT.

1.3.2.1 Aspects généraux de la technologie

LoraWan bénéficie donc d'une faible puissance de consommation et d'une portée accrue. Elle est également efficace dans différents environnements. Le signal est capable de pénétrer diverses terrains et structures. Le déploiement d'une infrastructure LoRa ne nécessite pas de license, et son réseau peut être public ou privé. Les caractéristiques générales de LoraWan sont disponibles sur le site The Thing Network.

Le cœur de LoRaWAN réside sur la gestion de l'énergie, permettant aux appareils de fonctionner avec une consommation d'énergie minimale, prolongeant leur durée de vie tout en garantissant une fonctionnalité à long terme. A cette caractéristique de faible consommation d'énergie s'ajoute ses capacités en termes de portée, capable de pénétrer diverses environnements. Cela rend la technologie efficace aussi bien milieu rural qu'urbain. LoRaWAN opère sur une bande de fréquence qui ne nécessite pas de licence d'émission, par exemple sur la bande ISM pour *Industrial, Scientific, and Medical*. Les bandes ISM, (868 MHz en Europe ou 915 MHz aux USA) sont disponibles pour l'utilisation de différentes technologies, incluant LoraWAN.

LoRaWAN possède des capacités de géolocalisation, permettant au réseau de détecter et de localiser précisément les appareils au sein de son domaine. LoRaWAN utilise différentes méthodes pour localiser ses appareils comme *Received signal strength indication (RSSI)*, *Time difference on Arrival (TDOA)*, une triangulation ou alors une combinaison de plusieurs des méthodes. Certaines de ses méthodes seront détaillées dans la section ??

LoRaWAN utilise des protocoles de sécurité *end-to-end*, aussi bien dans un réseau public intégré que dans un réseau privé. L'architecture LoraWan (décrise en détails dans la section 1.3.2.2) contient plusieurs couches de sécurité. Au niveau des *end devices*, une routine d'identification est imposée avant l'accès au réseau. Seul les appareils de confiance sont donc autorisés à communiquer. Ensuite, une fois la communication commencée, les données sont chiffrées avant d'être transmises dans le réseau. Le framework sécuritaire de Lora ne se limite pas à l'autentification et au chiffrement. LoraWan gère également les mises à jour en continu par les airs, ainsi qu'une supervision continue sur d'éventuelles intrusions.

Avec toutes ces caractéristiques, LoraWan s'est développé dans de nombreux domaines aussi bien environnementaux qu'industriels. Les principales utilisations de LoraWan actuelles sont les suivantes (toutes les applications ici) :

- la surveillance environnementale en général [?]. Lorawan peut être déployé pour surveiller des niveaux de températures, d'humidité, de bruits ou encore d'autres paramètres dans n'importe quel milieu. Une compagnie Hollandaise, Sensoterra, utilise notamment LoraWan pour surveiller la qualité des sols.
- Les *smart cities* [?]. LoraWan est actif sur différents aspects comme la gestion intelligent de l'éclairage, la gestion des déchets, la surveillance, etc.
- l'embarqué industriel [?]. La maintenance et la surveillance de matériel et de l'équipement peuvent être gérée par Lorawan. TataSteel, une compagnie indienne, utilise LoraWan pour ces équipements industriels.
- la prévention de catastrophe naturelle. Que ce soit en prévision[?] ou

après[?] d'éventuelles catastrophes naturelles, la longue portée et la surveillance en temps réel sont des atouts cruciaux pour ce genre d'évènement.

Cependant, toutes ses caractéristiques entraînent un certain nombre de limitations. La restriction de la fréquence en fonction de la région peut rendre le déploiement d'une même infrastructure à différent endroit dans le monde plus difficile. Cela peut aussi entraîner des problèmes de compatibilité entre régions, notamment pour des chaînes logistique ou d'approvisionnement qui en traverse plusieurs.

Une faible consommation de puissance avec une grande portée a un impact sur la taille et la vitesse de l'information. La taille du payload d'un message est limitée entre 51 et 241 octets. La vitesse de transmission est également peu élevée, atteignant un maximum de 5.5kbps sur une largeur de bande de 125kHz.

La communication au sein d'un réseau LoraWan se fait en grande partie de manière asynchrone. La synchronisation dépend de la classe de l'appareils, qui est détaillé dans la section 1.3.2.2. C'est un avantage pour maintenir une grande autonomie de batterie pour les appareils. LoraWan possède un système pour limiter les collisions entre messages si plusieurs appareils communiquent simultanément. Ce système est basé sur une combinaison entre *Listen before talk (LBT)* et des délais aléatoires[?]. Il est néanmoins possible que dans un environnement très dense des collisions puissent encore se produire. La communication asynchrone et le système d'évitement de collision entraîne une augmentation du temps entre les envois et la réception de message.

1.3.2.2 Topologie de Lorawan

La figure 1.7 montre les 4 types d'appareils qui composent la topologie d'un infrastrucure LoraWan. Les end devices sont les noeuds qui collectent les informations à envoyer à travers le réseau. Ils sont catégorisés en trois sous classes : A, B et C. Les appareils de classe A sont les plus économies en énergie. Ils ont été créés pour conserver leur énergie et communiquent exclusivement en communication asynchrone. Les appareils de classe A écoutent les messages provenant des serveurs uniquement après avoir eux-même transmis un message. la classe A regroupe les appareils les moins énergivores. Les appareils de classe B sont assez similaires à ceux de classe A, mais sont occasionnellement synchronisés avec les serveurs du réseau. Ils possèdent des capacités supérieures de réception leur permettant de se synchroniser avec le scheduler des serveurs, ce qui augmente considérablement l'efficacité du temps de réponses dans le réseau. Finalement, les appareils de classe C sont en écoute permanente de messages provenant des serveurs. Ils sont les plus réactifs mais également les plus énergivores. Les end devices sont donc classés selon deux paramètres : leur réactivité et leur consommation

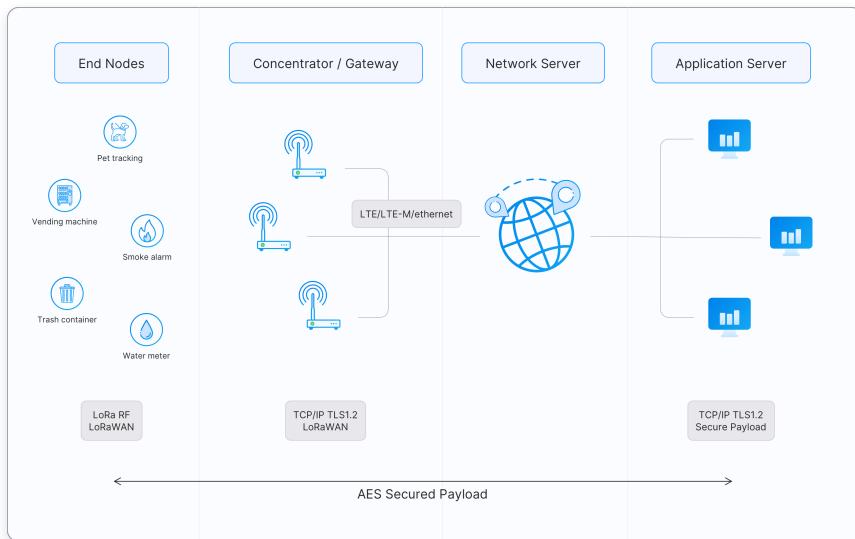


FIGURE 1.7 – Topologie de l’infrastructure LoRaWan (source : The Thing Network)

d'énergie. En fonction de leur classe, ils ont également la possibilité de recevoir des messages server après avoir transmis de l'information. L'envoie d'un message d'un end devices vers les serveurs est appelé *uplink message* et l'envoie d'un message depuis les serveur vers les end devices est appelée *downlink message*.

Les gateways jouent le rôle d'intermédiaire entre les end devices et le serveur réseau. Ils reçoivent les transmissions depuis les end devices dans leur zone de couverture et forward les messages vers le serveur réseau. Les gateways peuvent écouter plusieurs fréquence simultanément (*multichanneling*) là où les end devices n'écoutent qu'une seule fréquence. Les gateway gèrent la communication radio avec les end devices en utilisation la modulation de LoRa.

Le serveur réseau est la composante centrale de l'infrastructure. Il gère tout le réseau, que ce soit les données reçues des gateways, l'identification et l'activation des end devices dans le réseau, le routing ou encore l'adapation du data rate. Le serveur réseau supervise également l'aspect sécurité au sein du réseau en gérant les clés de chiffrement et les protocoles de sécurité.

Le serveur application de LoRaWan reçoit les données forwardées depuis le serveur réseau. C'est l'interface entre le réseau de LoRaWan et les différents services ou applications d'utilisateurs finaux. Les utilisateurs interagissent avec le serveur d'application pour n'importe quelle action à effectuer sur le réseau ou pour la récupération de données du réseau. Les données reçues par le serveur réseau sont traduites par le serveur d'application avant d'être interprétée par l'utilisateur.

final.

1.3.2.3 Sécurité

La sécurité dans l'architecture LoraWan se concentre sur trois axe principaux :

- l'authentification : qui communique avec qui.
- L'intégrité : les données ne sont pas altérées entre l'émetteur et le receveur.
- La confidentialité : les données ne sont visible par personne au sein du réseau hormis l'émetteur et le récepteur.

La sécurité repose sur le chiffrement des données. Les données sont chiffrées en utilisant l'algorithme de cryptographie AES (*Advanced Encryption Standard*). La taille des clés est de 128 bits. Ce choix est motivé par un équilibre entre une sécurité suffisante et une consommation réduite des ressources[?].

Il y a deux types de clés utilisées dans LoraWan. La *root key* est la clé partagée entre un end device et le serveur réseau. Cette clé est utilisée pour l'authentification initiale et l'établissement d'une communication entre deux éléments du réseau. Cette clé n'est jamais transmise par les air, elle est stockée dans un *join server*. Un join server est un serveur dédié au contenu sensible à l'activation du matériel dans un réseau LoRaWAN. Il authentifie le réseau et les applications du serveur. Il gère les root keys. Il génère également le second type de clés de LoraWan, les *session keys*.

Les session keys sont des clés générées dynamiquement par le join server et utilisées durant l'échange de données pendant une session. Il y a deux session keys différentes, la *AppSKEY* pour le chiffrement des payloads d'application, et la *nwkSKEY* pour les fonctionnalités du réseau (le chiffrement à la couche MAC, les vérifications d'intégrité, etc).

1.3.2.4 Session

L'établissement d'une session entre un end device et le réseau LoraWan peut se faire de deux façons différentes.

La première méthode est une méthode dynamique appelée *Over the Air Activation* (*OTAA*) et se déroule de la façon suivante :

- Le device possède initialement deux identificateurs, un DevEUI et un appEUI.
- La requête pour rejoindre le réseau est initiée par le end device. Il en envoie un message *join request* au serveur réseau. La join request contient ses identificateurs, ainsi qu'un nombre aléatoire généré par le device.

- Le serveur réseau accepte (ou décline) la requête et vérifie les identificateurs du device dans ses enregistrements.
- Si la requête est acceptée, le server génère ensuite un nombre aléatoire appelé *DevNonce* et renvoie un message *join accept* contenant le DevNonce, l'adresse du device ainsi que les clés (NwkSKey et appSKey) de session.
- le end device reçoit le message *join accept*. Il extrait les clés envoyées et calcule ses propres clés de session avec ses paramètres (les clés envoyées par le join server ainsi que le devNonce).
- le device fait maintenant parti du réseau. Chaque message que le device va envoyer au serveur sera chiffré avec ses clés.

La seconde méthode est hardcodée et permet à un end device de rejoindre directement le réseau sans passer par l'identification. cette méthode est appelée *activation by personalisation (ABP)*. Voici la procédure de la session :

- Le device possède à l'avance son adresse ainsi que ses clés de session.
- Le device est déployé au préalable dans la zone de couverture du réseau LoraWan.
- Sans devoir initialiser de procedure *join request*, le end device transmet directement ses données au serveur en utilisant ses clés préconfigurées. L'échange de clés avec le serveur n'a pas lieu.

Cette seconde procédure a comme avantage d'être plus rapide à exécuter car toute la partie d'initialisation est passée. Le processus d'initialisation peut être contraignant en ressource ce qui rend la méthode ABP moins énergivore. Cependant l'utilisation de clés hardcodées directement dans les devices est une pratique moins sécuritaire. Comme pour la taille de clés, il y a un équilibre entre consommation d'énergie et sécurité.

Chapitre 2

Travaux similaires et autres contributions

Ce chapitre a pour but d'établir un état de l'art dans le domaine de l'internet of things. Comme l'iot est très vaste, seulement certains aspects seront présentés. Tout d'abord, il est important de comprendre que la sécurité dans ce domaine a évolué autant bien par ces méthodes que par son importance, ainsi un historique est présenté dans la section 2.1.1 de ce chapitre. Ensuite, la seconde section se concentre uniquement sur la technologie Lora. Cette section donne une approche analytique des signaux. Finalement, la dernière partie de ce chapitre se consacre aux approches existantes pour l'identification d'appareils utilisant Lora. Cette section présentera les travaux qui sont au centre des expérimentations de ce travail.

2.1 Identification d'appareils dans l'iot

Avant de s'intéresser à l'identification d'appareils Lora, il est nécessaire d'étendre ce concept à l'iot. L'internet of things a connu une forte évolution depuis les débuts des années 2000, avec des priorités dans son évolution qui ont également changées au fil du temps.

2.1.1 historique et évolution des préoccupations de sécurité dans l'iot

Afin de bien comprendre les enjeux des différentes époques, voici un petit historique des deux décennies précédentes. Les technologies mais également le concept même d'internet of thing ont évolué.

Les premières années de l'iot (*début des années 2000*).

Bien que le concept d'appareils connectés remonte aux années 70, l'avènement de l'internet of thing arrive en fin de milénaire. Ce concept est associé à la technologie RFID *Radio Frequency Identification*[?], qui permet d'utiliser les ondes radios afin d'identifier des objets ou des personnes. Le but initial était de rendre tout objet dans le monde identifiable par un code EPC ou *Electronic Product Code*[?], un peu comme le code barre. Durant ses années, plusieurs entreprises lancent leur première appareils connectés. Tout cet enthousiasme pour la connectivité met au second plan les questions de sécurité. Ainsi la première partie du développement de l'iot se concentre surtout sur la qualité de communication entre les objets plutôt que sur leur sécurité.

Les premières préoccupations sécuritaires (*fin des années 2000, début des années 2010*)

Vers la fin des années 2000, l'augmentation du nombre d'appareils est si grande qu'elle a atteint tous les domaines de la société. Certains domaines étant plus critique que d'autre d'un point de vue sécurité (l'énergie, les transports, la santé, etc), l'intégrité des données, la confidentialité et les accès réseaux deviennent le centre de l'attention. Le concept de certificats x.509, initialement développé pour le world wide web avant les années 2000, a un regain d'attention dans cette période. Plus largement, la structure de la technologie PKI (*Public Key infrastructure*, qui utilise les certificats x.509)[?] a été adaptée pour s'intégrer aux problématiques de l'embarqué. Un certificat est un document digital permettant de vérifier d'identité d'une entité, comme d'un appareil, un utilisateur ou une organisation. Il se base sur la liaison d'une clé public à l'entité établie par une *Certificate Authority (CA)*. La CA agit en temps de tier de confiance et assure la légitimité de l'information grâce au certificat. Ainsi, les trois axes principaux de la sécurité dans l'IoT émergent : l'autentification, l'intégrité des données et la confidentialité.

L'avènement du *Edge Computing*(à partir des années 2010).

Le nombre d'appareils connecté dépasse le nombre d'êtres humains, forçant une transition vers l'*ipv6* tant le nombre d'appareils est élevé et continue d'augmenter. L'information a pris de la valeur, et de l'ampleur. Ainsi, viens se greffer de nouveau enjeux économiques en plus des enjeux sécuritaires. La quantité de données générées nécessite de revoir le stockage de l'information. C'est ainsi que va apparaître le Edge computing[?], qui est une réponse directe aux besoins des architectures de gérer autant de données en périphérie de réseau. Le concept du edge computing vise à effectuer des calculs et des analyses des données directement sur les appareils connectés, plutôt que de les envoyer vers un centre de données centralisé. Cela réduit la latence, améliore l'efficacité du réseau et permet des analyses en temps réel. Le premier malware spécialement centré sur l'iot fait son apparition. Mirai[?] exploite une faille lui permettant de récupérer le mots de passe d'appareils afin de s'en servir pour lancer des attacks *DDoS* (*distribu-*

ted denial of service) à grande échelle. En quelques années l'IoT est passé d'un gadget d'entreprise à un véritable enjeu économique et sécuritaire, centré autour de l'information. Les seules perspectives de législation concernant la sécurité de l'internet of thing n'apparaîtront de traduisement en fin de décennies avec La loi européenne sur le *Réglément générale sur la protection des données*(source : loi RGPD. cette loi ne couvre pas la sécurité des appareils mais plutôt l'utilisation des données sur internet en général.

L'apparition de la *Blockchain*(fin année 2010).

Le stockage et la transmission de données, l'authentification d'appareils ou encore la confidentialité sont au centre des préoccupations. Initialement utilisée dans les cryptomonnaie, la technologie Blockchain est un mécanisme de base de données qui permet un partage transparent des informations au sein d'un réseau. Une base de données Blockchain stocke les données dans des blocs qui sont reliés entre eux dans une chaîne. Les données sont chronologiquement cohérentes, car il n'est pas possible de supprimer ou modifier la chaîne sans le consensus du réseau. Par conséquent, la technologie Blockchain peut servir de livre inaltérable ou immuable pour le suivi des ordres, des paiements, des comptes et d'autres transactions. Le système dispose de mécanismes intégrés qui empêchent les entrées de transactions non autorisées et créent une cohérence dans la vue partagée de ces transactions. L'implémentation de la blockchain pour l'iot confère les avantages suivant[?] :

- l'immuabilité. la blockchain permet de créer un enregistrement immuable de toutes les interactions et communications des appareils. Cet enregistrement peut être utilisé pour détecter et empêcher l'accès non autorisé ou la modification des appareils ou des données dans l'IoT.
- La décentralisation. il est possible de créer un système décentralisé pour l'authentification et la communication des appareils. Chaque appareil IoT se connecte au réseau blockchain et se voit attribuer une identité numérique unique, qui est vérifiée grâce à l'utilisation de signatures numériques ou de contrats intelligents. Cela élimine le besoin d'une autorité centrale pour authentifier les appareils et annule ainsi les risques de *single point of failure*.
- La confidentialité. La technologie Blockchain peut sécuriser la communication entre les appareils IoT grâce à l'utilisation de la cryptographie à clé publique ou asymétrique. Cela permet l'échange sécurisé d'informations entre appareils sans avoir recours à des intermédiaires.

Le *Zero Trust Model*[?](début des années 2020).

les menaces de sécurité sont de plus en plus sophistiquées. Comment faire encore confiance aux infrastructures qui doivent gérer autant d'appareils ? La réponse est de ne plus leur faire confiance. Le zero Trust model est donc un modèle basé

sur l'absence totale de confiance et une vérification constante, que la demande d'accès provienne de l'intérieur ou de l'extérieur du réseau. Dans un modèle de sécurité classique, une fois qu'un utilisateur ou un appareil accède au réseau interne, on lui fait souvent implicitement confiance, ce qui lui permet une grande liberté d'actions au sein du réseau. Le Zero Trust model suppose cependant que des menaces peuvent exister à la fois à l'intérieur et à l'extérieur du périmètre du réseau et nécessite donc une vérification continue de la confiance. Un modèle qui s'applique sur ce principe devrait contenir les éléments suivants[?]:

- La vérification d'identité. Les utilisateur et les appareils doivent subir une authentification avant d'accéder à n'importe quel services ou ressources du réseau.
- Le *Least privilege acces*. les permissions sont accordées de manières limités selon le besoin de l'utilisateur ou de l'appareil.
- La micro segmentation. Diviser le réseau en segments pour limiter son accès par les appareils.
- La surveillance en continue. L'analyse du traffic, du comportement et des activités des appareils.
- le chiffrage des données.

Le *quantum computing*(dans les prochaines années...).

Avec la future arrivée des ordinateurs quantiques, les mécanismes de chiffrement basés sur la complexité mathématique comme RSA ou ECC sont voués à disparaître[?]. La puissance de calcul des ordinateurs quantique est déjà considérée comme une véritable menace pour la sécurité informatique. Fort heureusement, c'est également un nouveau champ de possibilité qui s'ouvre pour la sécurité, avec le développement du *post quantum cryptography*. Un premier protocole résistant aux menaces quantiques, *Quantum Key Distribution* permet d'établir des canaux de communications entre différents appareils dans l'iot. Ce protocole n'est pas encore en service dans l'iot, mais les premiers tests réalisés en laboratoire sont très prometteurs[?].

2.1.2 Approches d'identification dans l'iot

Comme tout appareil au sein d'un réseau, un appareil connecté dans l'iot possède de base différents moyens d'authentification. Son adresse MAC, son adresse IP, des informations relatives à sa manufacture comme un numéro de série par exemple. De manière plus spécifiques, les noeuds au sein d'un réseau LoRaWAN possède un DevEUI, un numéro unique accordé par le réseau à l'appareil. Cependant ses informations peuvent être compromises si appareils sont victimes de *devices spoofing*, c'est à dire qu'un appareil malveillant usurpe l'identité de sa cible, afin d'accéder au sein du réseau. D'autres attaques comme *Man in The*

Middle ou Replay attacks peuvent également compromettre l'identité d'un appareil si on se base uniquement sur ses identifiant classiques[?]. Il faut donc pouvoir identifier les appareils mais sans se fier à leur informations. Il existe diverse méthodes basée sur différentes approches pour pouvoir identifier un appareil.

La première approche possible est de fier non pas à l'appareil directement ni aux données qu'il reçoit car celles-ci pourraient également être compromises, mais à la routine sur sa communication. Cette approche, appelée *Traffic related pattern* où s'intéresse au comportement d'un appareil au sein d'un réseau. L'article publié par H. Kawai, S. Ata et N. Nakamura [?] propose notamment d'analyser via machine learning le *traffic pattern* c'est à dire le comportement du trafic.

Une autre approche s'intéresse à la position géographique d'un appareil. En effet il est possible de mesurer la qualité de la réception d'un signal, le *Received Signal Strength Indicator* ou RSSI. Un étude a été menée sur des appareils LoRa par M. Anjum, MA. Khan et SA. Hassan[?]. L'article utilise le *Path Loss* pour estimer le RSSI. Via machine learning ils sont capables de créer un système de positionnement permettant l'identification d'appareil LoRa.

La dernière approche se concentre sur l'analyse des caractéristiques uniques des fréquences radios. Plutôt que de s'intéresser au routine entre les communications ou la distance d'où elles ont lieu, le *Radio Frequency Finguerprinting* se concentre sur les propriétés physiques des signaux. Différentes techniques sont montrées par N. Soltanieh, Y. Norouzi et Y. Yang[?].

2.2 Analyse de la technologie lora

2.3 identification de device lora

radio frequency finguerprinting identification (RFFI). trouver des caractéristiques hardware pour identifier des devices.

2.3.1 RFFI avec DCTFs

L'analyse suivante est basé sur l'article publié par Yu Jiang, Lining Peng, Aiqun Hu, Sheng Wang, Yi Huang et Lu Zhang [?]. L'objectif de cette analyse est de pouvoir identifier un appareil LoRa uniquement en se fiant à l'analyse des signaux générés par ce dernier.

Cette analyse est séparée en plusieurs étapes.

aquisition des données. On s'intéresse uniquement au préambule du signal car cette partie est fixe peu importe le signal envoyé. Ensuite, on extrait les échantillons IQ du préambule lora.

Preprocessing des données. Si on plot les échantillons tel quel, on n'observe un cercle mais on en apprend pas plus. A cause du CFO (carrier frequency offset), les données dévies et couvre l'information importante sur le graphe. Il faut appliquer une méthode différentielle pour recalculer les données (equation dt).

Une fois que les données sont recalculées, on observe via un gradient coloré une zone dense dans le cercle. On calcule le centre de la manière suivante. On calcule le point le plus dense ainsi que les points au moins 90 pourcent aussi dense. Ensuite, on calcule le centre euclidien entre tous les points éligibles. On répète cette opération pour chaque échantillon.

Une fois qu'on a obtenu le centre pour chaque échantillon, on plot pour chaque module le cluster de points, permettant ainsi d'utiliser une méthode de classification. La méthode kmeans convient pour cette analyse car on connaît à l'avance la valeur de k (le nombre de modules).

2.3.2 RFFI avec spectrogrammes

article sur les spectrogrammes.

Chapitre 3

Expérimentations

3.1 Matériel

3.1.1 radio logicielle

La radio logicielle (*SDR*, pour *Software-DefinedRadio*) est une technologie qui permet de mettre en œuvre des systèmes de radio à l'aide de logiciels plutôt que de matériel.

Dans les systèmes de radio traditionnels, les différentes fonctions de la radio, comme l'accord sur une fréquence spécifique, la modulation et la démodulation du signal, et le filtrage du bruit, sont mises en œuvre à l'aide de composants matériels tels que des oscillateurs, des amplificateurs et des filtres. En revanche, les systèmes SDR utilisent des logiciels pour effectuer ces fonctions, ce qui les rends beaucoup plus flexibles car chaque composante est reconfigurable. Les radios logicielle sont capables d'opérer sur une large portée de fréquence, aussi bien très basse fréquence comme haute fréquence. Les *SDR* peuvent jouer le rôle d'émetteur ou de récepteur ou les deux. Différentes radios logicielles sont testées pour ce travail, ce qui est motivé pour plusieurs raisons. Tout d'abords cela permet d'observer certaines variations (qualité du signal, distance, etc) entre les différents récepteurs pour une même expérience et ainsi définir la SDR la plus adéquate. Ensuite, la diversité de radios logicielles permet d'approfondir l'apprentissage de cette technologie et de comprendre plus aisément le fonctionnement d'une radio logicielle. Une version plus simple permet d'assimiler les bases de la pratique avec une radio, mais pouvoir utiliser des versions plus abouties permets d'expérimenter de manières plus précise les expériences.

3.1.1.1 RTL SDR dvb T

La RTL SDR dvb T est la version la plus low cost des radios utilisées. Cette radio est initialement utilisée pour recevoir des signaux dvb t (*Digital video broadcasting Terrestrial* télévisés). La figure 3.1 montre la radio, qui est essentiellement un device USB qui inclut un *chipset RTL2832U* et un *RF tuner chip*. Le chipset RTL2832U digitalise les signaux RF et les envoie à l'ordinateur. Le tuner permet d'ajuster la fréquence pour couvrir une large portée. La radio est raccordée à l'ordinateur via le port USB.



FIGURE 3.1 – RTL SDR Dvb-T dongle

3.1.1.2 RTL-SDR R820T2

La deuxième radio logicielle utilisée est la RTL SDR R820T2. Il y a deux différences majeures avec la radio dvb-t. L'antenne de cette radio logicielle est de meilleure qualité. Le tuner chip de cette sdr est un r820t2 tuner. Cette version est une version améliorée du tuner qui se trouve dans la dvb-t, ce qui a pour impact une réduction du bruit, une meilleur sensibilité et une couverture de fréquence plus large. La figure 3.2 montre la sdr utilisée.



FIGURE 3.2 – RTL SDR R820T2

3.1.1.3 HackRf One

La dernière radio logicielle utilisée est la HackRf one. Au delà du prix, cette dernière radio est différente des deux autres. Elle est notamment capable de gérer la transmission et la réception de signaux, là où les deux autres sont uniquement des récepteurs. Si la rtl sdr r820t2 offrait déjà une qualité de signal supérieure à la dvb-t, celui de la hack rf est encore plus net. La figure 3.3 montre la sdr hackRf avec l'antenne utilisée posée sur un trepied.



(a) SDR HackRF One

(b) Antenne

FIGURE 3.3 – SDR HackRf One avec son antenne

3.1.2 Module d'émission Lora

3.1.2.1 module RN2483



FIGURE 3.4 – 3 modules RN2483

Le microchip RN2483 est un module de technologie spécifique à LoRa. Bien que Microchip soit une compagnie qui produit de nombreux microcontrôleur, cet appareil n'en est pas un. Le module rn2483 de la figure 3.4 est un simple *transceiver (transmitter and receiver)* radio permettant de communiquer à longue portée et à faible coup. La documentation sur cet appareil est disponible au lien suivant : (lien).

Voici quelques spécificités sur le module :

- Il comprend la technologie de modulation LoRa, ce qui lui donne son atout de faibles consommation et longue portée. Il gère également les modulations *FSK (frequency shift keying)* et *GFSK (Gaussian frequency shift keying)*.
- Une faible consommation induit une faible puissance, le module possède un amplificateur de puissance maximale de 14dBm.
- Les bandes de fréquences disponibles sont compatibles avec la bande ISM. Le module couvre de 863Mhz à 870Mhz pour la région Européenne.
- La data rate maximum en modulant avec LoRa est de 10937 bps (bit par seconde).
- tous les paramètres TX sont configurables.

L'utilisation du module RN2483 est détaillée dans la section 3.3.

3.1.2.2 pycom lopy



FIGURE 3.5 – Un module Pycom Lopy avec une antenne

Ce module pycom est un appareil programmable en micro python, comprenant un microcontrôleur ainsi qu'une série de pins numériques input/output, des composantes de connectivité sans fil et un port micro USB. La figure 3.5 montre le module pycom connecté à une antenne.

3.1.2.3 module arduino

Sur la figure 3.6, on peut voir que le module contient x. L'avantage principal de cet module est qu'il est possible de configurer une largeur de bande bien plus faible que les autres modules. Les modules rn2483 ou lopy ont une largeur de bande minimal de 125KHz, tandis qu'avec l'arduino il est possible de descendre

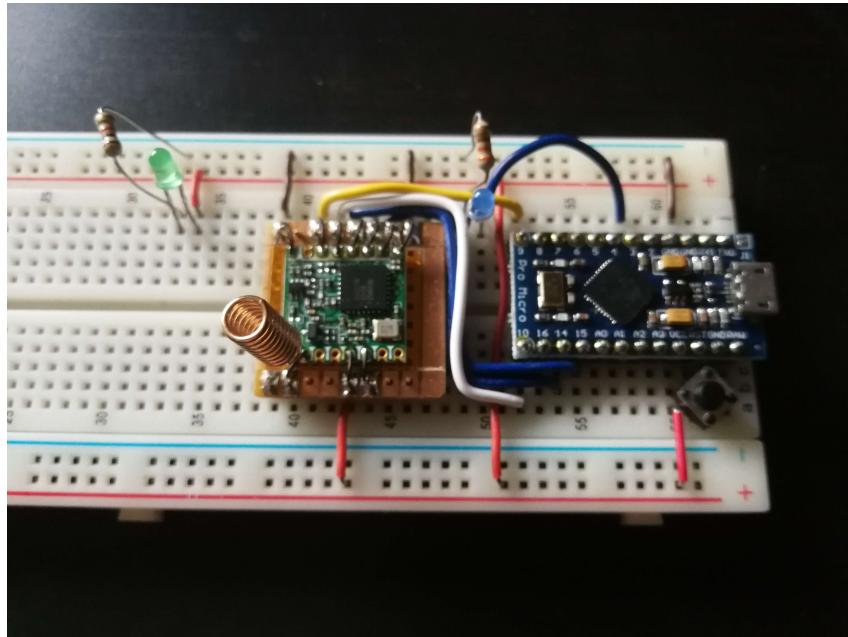


FIGURE 3.6 – Un module Arduino

jusqu'à x KHz. Pour rappel, une largeur de bande plus fiable permet un time on air plus grand, ce qui est utile pour analyser les signaux.

3.1.3 Logiciels

Une fois les différents appareils choisis, il faut les accompagner avec les softwares adéquats. Ainsi il faut des logiciel d'analyse de signaux compatible avec les différents modules et radio logicielles.

3.1.3.1 GQRX

Le premier logiciel choisi est *GQRX*. c'est un logiciel open source d'analyse de fréquence radio pour les SDR. Le fonctionnement du logiciel est assez direct, la figure 3.7 montre comment configurer simplement le logiciel. LA figure 3.7a demande de compléter les paramètres suivants :

- device. Il faut sélectionner la SDR dans la liste des appareils. Le *Device String* fait référence à cet appareil dans gqrx.
- Input rate. Le taux d'échantillonage capturé par la SDR, il apparait plus bas comme *sample rate*.
- Decimation. C'est un procédé qui permet de réduire le nombre d'échantillons générés par le logiciel, pour économiser des ressources.

- Bandwidth. La largeur de bande supplémentaire que peut gérer la SDR.
- *Low Noise Block Local Oscillator (LNB LO)*. ce paramètre est spécifique à la réception satellitaire et représente le frequency offset appliqué par l'oscillateur locale dans un LNB downconverter.
- l'audio output concerne la sortie sonore du signal.

La figure 3.7b ajoute des paramètres pour le récepteur, c'est à dire pour l'interface de GQRX :

- frequency. La fréquence que l'on souhaite écouter.
- Filter Width. Ce paramètre permet de changer la taille de la largeur de bande du filtre appliquée au signal.
- Filter Shape. Contrairement au Filter Width ce n'est pas la taille mais la forme du filtre que l'on peut modifier.
- Mode. Le mode de démodulation.
- Automatic Gain Control (ACG). l'ACG ajuste le gain du récepteur pour maintenir un signal constant.
- Squelch. C'est un trashold qui coupe la sortie sonore si il est franchi.
- Noise blanker. C'est une fonctionnalité qui permet de réduire l'impact des interférence sur le signal.

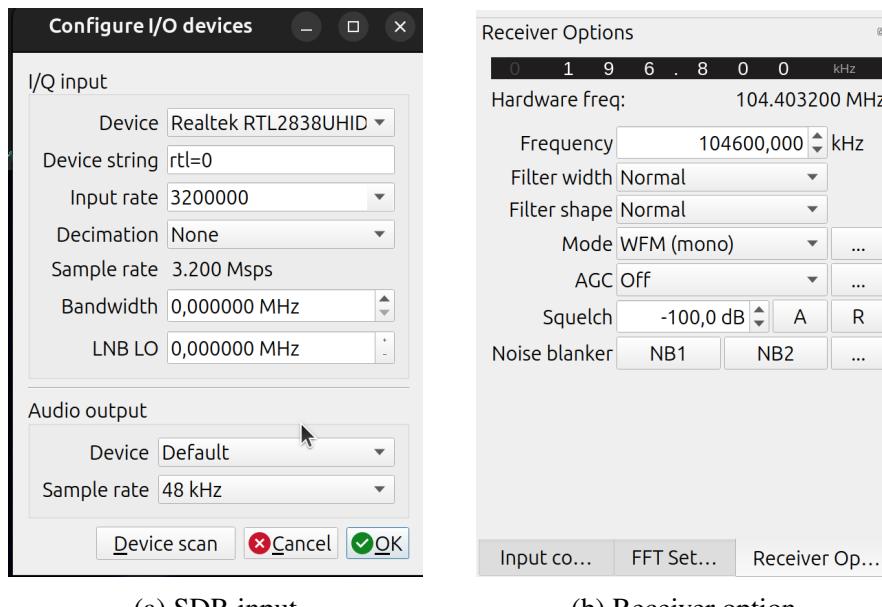


FIGURE 3.7 – Configuration GQRX

La figure montre un exemple de ce qu'on observe quand on écoute la fréquence radio de Classic21. GQRX affiche le signal reçu sous deux formes différentes : en spectre et en cascade.

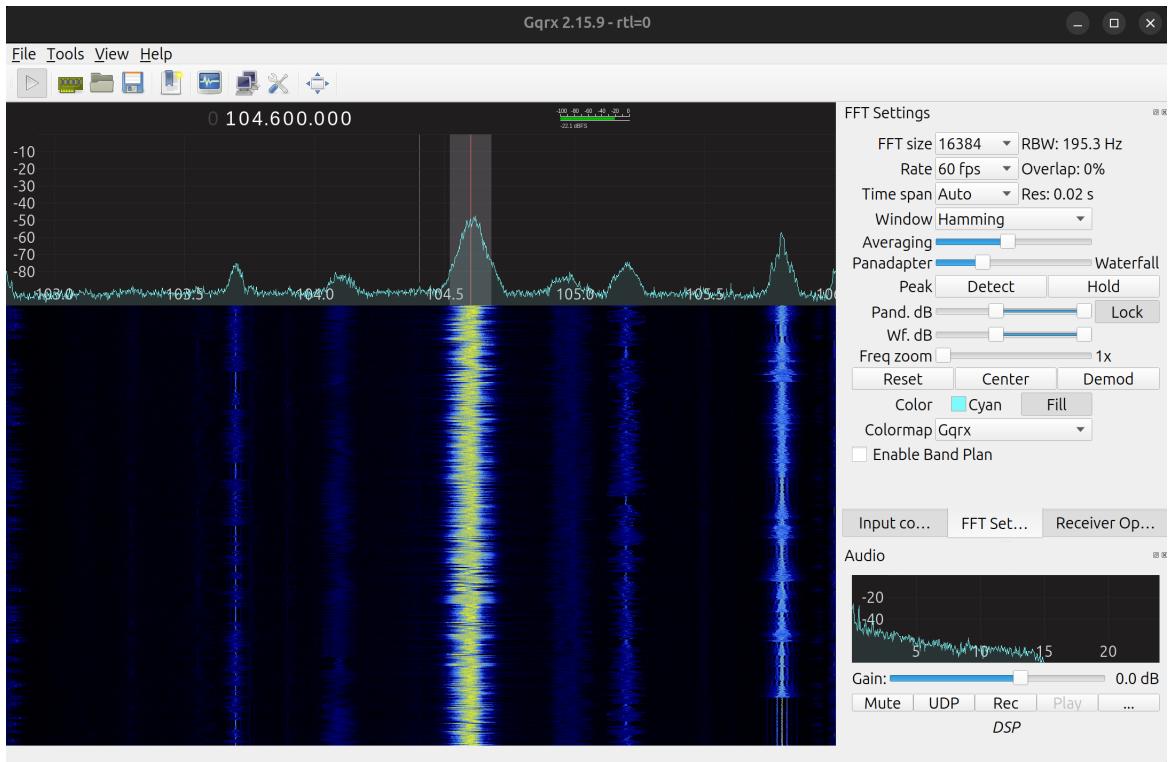


FIGURE 3.8 – Réception de la station radio Classic21

L'affichage du spectre fournit une représentation graphique en temps réel du spectre RF sur une gamme de fréquences. Il montre la puissance du signal de différentes fréquences sur une plage de fréquences spécifiée. L'axe des x représente la fréquence, tandis que l'axe des y affiche la force du signal (mesurée en dB).

L'affichage en cascade est un spectrogramme qui visualise la force du signal au fil du temps. Il montre une série d'instantanés de spectre empilés les uns sur les autres, où l'intensité de la couleur représente la force du signal. Chaque ligne horizontale du tracé en cascade représente une vue du spectre capturée à un moment précis, créant ainsi un enregistrement historique de l'activité du signal. L'axe vertical représente la fréquence et l'axe horizontal représente le temps.

Durant la réception du signal, il est possible de modifier l'affichage. A droite de l'affichage en spectre et en cascade sur la figure 3.8, il y a différents paramètres :

Pour l'affichage en spectre, le paramètre *Panadapter dB* fait référence à l'échelle verticale dans la vue du spectre. Il représente la force du signal des fréquences radio reçues affichées sur l'axe vertical du graphique du spectre. Le réglage du paramètre Panadapter dB modifie l'échelle verticale de la force du signal affichée dans la vue du spectre.

Pour l'affichage en cascade, le paramètre *Waterfall dB* concerne l'intensité

de la couleur ou l'ombrage des fréquences affichées dans le tracé en cascade. Le réglage du paramètre Waterfall dB modifie l'intensité utilisée pour afficher la force du signal dans le tracé en cascade, permettant ainsi d'ajuster le contraste ou la visibilité des signaux plus faibles ou plus forts.

Les paramètres suivants sont communs et affectent les deux affichages :

Le paramètres *FFT size* détermine le nombre d'échantillons utilisé dans chaque calcul de FFT. Une valeur plus large donne un meilleure résolution, mais consome plus de ressources. La valeur est une puissance de deux pour des raisons d'efficacité de calculs.

Le paramètre *rate* détermine le taux de rafraîchissement de l'affichage. Un taux relativement faible avec une taille de frame FFT élevé induit un effet d'overlap, c'est à dire que des frames consécutives partagent des échantillons, ce qui donne un affichage plus lisse du spectre.

3.1.3.2 Universal radio hacker, URH

Universal Radio Hacker est un logiciel open source similaire à GQRX. Son rôle principal est l'analyse de signaux radio. Au delà de l'écoute en temps réel, URH peut sauvegarder des signaux et lire des enregistrements à partir de fichiers. Les fichiers qu'URH peut interpréter ou enregistrer sont au format *.complex*. Ce format est utilisé pour sauvegarder les signaux sous forme d'échantillons *I/Q* (*In phase / Quadrature*). Il existe plusieurs variantes de ce format supporté par URH :

- *.complex* (ou *.complex64*) : c'est le format par défaut. Les échantillons sont représentés par des float de 32bits pour les symboles I et Q respectivement (donc 64 bits au total)
- *.complex16u* : la représentation en utilisant 2 entiers de 8 bits non signés pour I et Q.
- *.complex16s* : la représentation en utilisant 2 entiers de 8 bits signés pour I et Q.
- *.complex32u* : la représentation en utilisant 2 entiers de 16 bits non signés pour I et Q.
- *.complex32s* : la représentation en utilisant 2 entiers de 16 bits signés pour I et Q.

La figure 3.9 montre comment enregistrer un signal. Les paramètres à configurer sont similaires à GQRX (choix de la SDR, fréquence, taux d'échantillonage, largeur de bande et gain). Comme URH est le principal outils d'analyse pour ce travail, les analyse avec ce dernier sont détaillées dans la section 3.3.2.

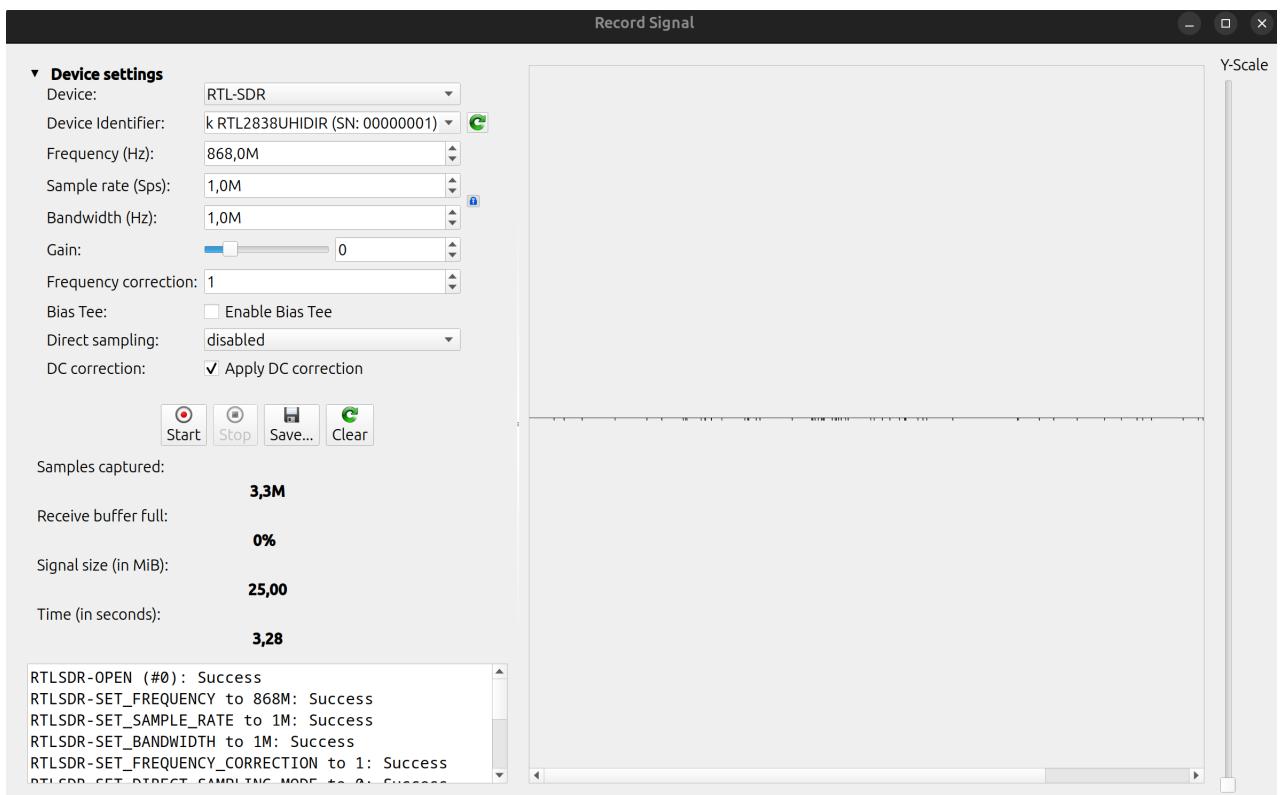


FIGURE 3.9 – Enregistrement d'un signal avec URH

3.1.3.3 Visual Studio Code

L'environnement de travail utilisé est Visual Studio Code (version 1.87.1). Cet IDE est open source et largement populaire ce qui permet un apprentissage pour des travaux spécifique très rapide via Internet.

L'utilisation de VSCode est motivé par son système d'extension, qui contient plusieurs extension qui permettent de manipuler directement les modules d'émission LoRa. Le module Lopy de Pycom est compatible avec VSCode via l'extension PyMakr.

GitHub est également intégré dans VSCode, ce qui permet de simplifier la mise en ligne du travail.

3.1.3.4 IDE Arduino

L'utilisation de l'IDE Arduino 2.2.1 est nécessaire pour la configuration du module Arduino décrit dans la section 3.1.2.3. L'IDE permet d'uploader le code dans le module. Le code est disponible dans l'annexe.

3.2 Librairie python

Le choix du langage pour l'implémentation du travail est Python (version 3.11.4). Python donne l'accès à plusieurs librairie très pertinente pour le signal processing. Voici les principales librairies utilisées :

- Numpy. Cette librairie est fondamentale pour la gestion d'array. Elle contient également de nombreuse fonction et format mathématique utile au projet.
- Matplotlib. Cette librairie permet d'effectuer des plots des données de manières simple et efficace.
- Pyrtlsdr. La librairie PyRTLSR est essentielle pour pouvoir manipuler la SDR R820T2. Il est possible de configurer la SDR sans devoir passer par un software tier comme GQRX ou URH grâce à cette librairie.
- HackRf. L'équivalent de PyRTLSDR mais pour la SDR HackrF One.
- datashader. Cette librairie permet la visualisation améliorée de grande quantité de données via l'ajout de gradient coloré.
- serial. La manipulation des modules rn2483 est possible grave à la librairie serial.

3.3 Génération et réception d'un signal LoRa

La première étape de l'expérimentation consiste à générer via un module un signal LoRa et à le capturer à l'aide d'une radio logicielle. Pour cette première étape, le module d'émission choisi est le module rn2483, car il est le plus facile et rapide à configurer. Via python, il est possible d'utiliser la librairie *Serial* pour se connecter au port usb reliant le module à l'ordinateur. Ensuite, via les différentes commandes, on configure le module en modifiant les paramètres suivant :

- la modulation, en LoRa.
- La fréquence. 868MHz, la fréquence de la bande ISM , la bande d'émission en Europe.
- La largeur de bande choisie est de 125Khz, ce qui est la plus petite valeur possible que permet le module.
- La puissance du module, au maximum (14W).
- Le spreading factor, la valeur la plus grande possible est choisie (SF = 12).
- le coding rate. Il y a 4 valeur possible :s 4/5, 4/6, 4/7 and 4/8. Cela signifie que tout les 4 bits seront codé par 4, 5, 6, 7 ou 8 bits de transmissions en fonction de cette valeur. Plus la valeur st faible (la plus faible étant 4/8), plus le time on air sera élevé, car cela prend plus de temps pour transmettre le message.

Le choix des valeurs pour les différents paramètres est de maximiser le *time on air*. Les commandes relatives à la configuration sont disponibles en annexes.

3.3.1 analyse avec GQRX

Une fois que le module est configuré, il faut paramétrier le récepteur, la radio logicielle. La SDR choisie est la RTL SDR T820R2. Voici les paramètres de la SDR :

- la fréquence. La fréquence d'écoute. Idéalement la même fréquence de celle de l'émetteur (868MHz).
- Le taux d'échantillonage. Il est possible de choisir la quantité d'échantillons traitée chaque seconde. Un taux plus élevé donnera un signal plus complet. Le taux minimal ne doit jamais être inférieur à deux fois la largeur de bande. (Théorème de Nyquist Shannon : $f_e \geq 2f_{\text{max}}$).
- Le gain. Dépendant de la qualité du signal il peut être nécessaire d'ajouter du gain, c'est à dire d'amplifier la force du signal. Un gain trop élevé peut saturer le signal, quand l'amplitude dépasse la portée du récepteur.

La figure 3.10 montre la capture de deux signaux LoRa. On remarque que malgré la configuration des paramètres pour maximiser le TOA, il est difficile d'observer en détails le signal. On observe également que le signal se situe entre la fréquence 867,915MHz et 868,040MHz, ce qui correspond bien à la largeur de bande de 125Khz (0.125MHz) choisie.

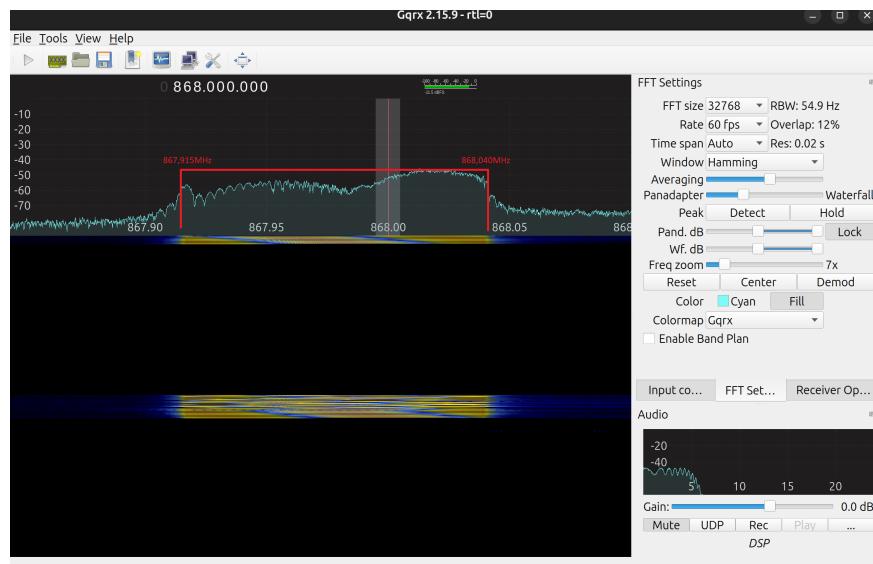


FIGURE 3.10 – capture module rn2483 sur GQRX avec RTLSDR t820r2 Sample rate = 1.8MHz

Le module arduino, contrairement aux autres modules pycom et rn2483, permet d'utiliser une largeur de bande beaucoup plus faible. La figure 3.11 montre la capture d'un signal LoRa émis depuis le module arduino. La largeur de bande choisie est de 7.8Khz, les autres paramètres d'émissions (modulation, fréquence, spreading factor) sont similaires à ceux de la capture précédente. Cette fois ci, on clairement sur l'affichage en spectre un pic à 868,070MHz. Sur l'affichage en cascade, le signal se dessine sous forme de traits (les chirps). Cela correspond bien à la théorie de la modulation LoRa où le signal modulé est composé de up-chirp et downchirp. Il y a de part et d'autres du signals des silhouettes. C'est du à la sensibilité de la SDR, si on observe les pics de fréquences dans l'affichage en spectre, on constate qu'ils sont négligeables car leur échelles de puissances est bien inférieure (environ -60dB plus faible) à celle du pic principal. GQRX permet de visualiser le signal, mais pour pousser l'analyse plus en détails d'utilisation d'Universal Radio Hacker est nécessaire.

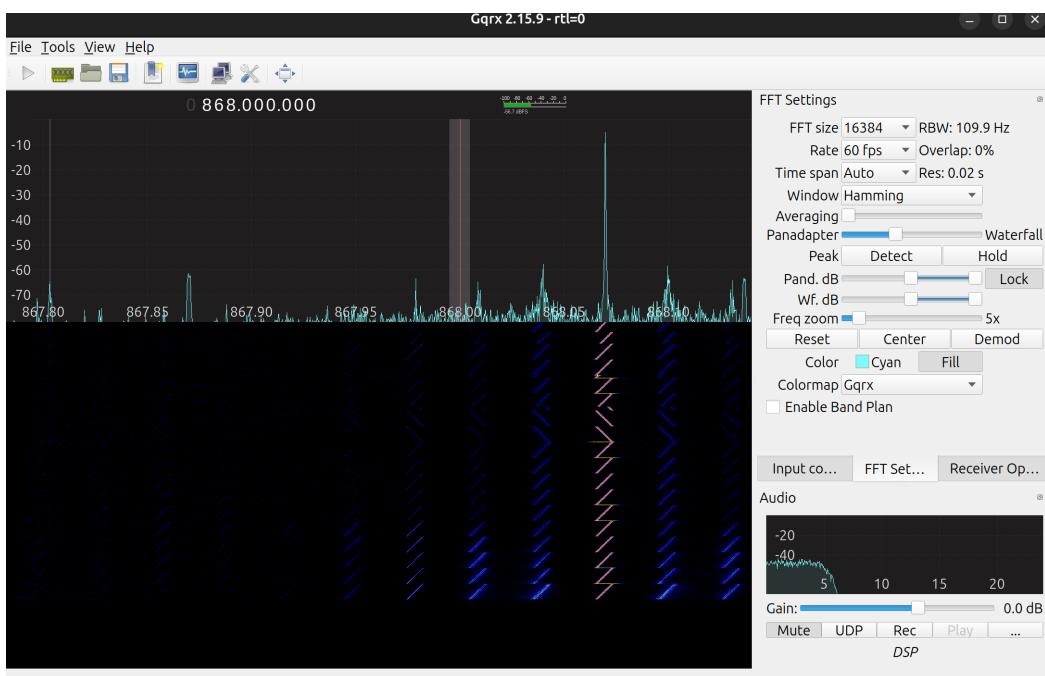


FIGURE 3.11 – capture module arduino Uno sur GQRX avec RTLSDR t820r2
Sample rate = 1.8MHz

3.3.2 analyse avec URH

GQRX permet de zoomer sur les fréquence mais pas sur le temps, ce qui demande donc de générer un signal dont le TOA doit être le plus élevé possible. URH offre plus de flexibilité sur l'analyse ce qui permet de ne pas devoir utiliser des largeur de bande aussi faible que celle du module arduino. Ainsi, pour l'analyse avec URH, les modules pycom et rn2483 sont utilisés. La figure 3.14 montre la capture et la sauvegarde d'un signal LoRa. Le module utilisé est rn2483, la SDR est la R820T2. les paramètres d'émission sont les suivants : BW = 125KHz, SF = 8, freq = 868MHz, Mode = LoRa, cr = 4/8, pwr = 14. Les paramètres du récepteurs sont les suivants : freq = 868MHz, SR = 1.8MHz, gain = 0dB. Pour des raisons de simplicité, le signal capturé avec ses paramètres sera utilisé comme référence pour toute la partie analyse à partir de ce point jusqu'à la fin de la section 3.3.

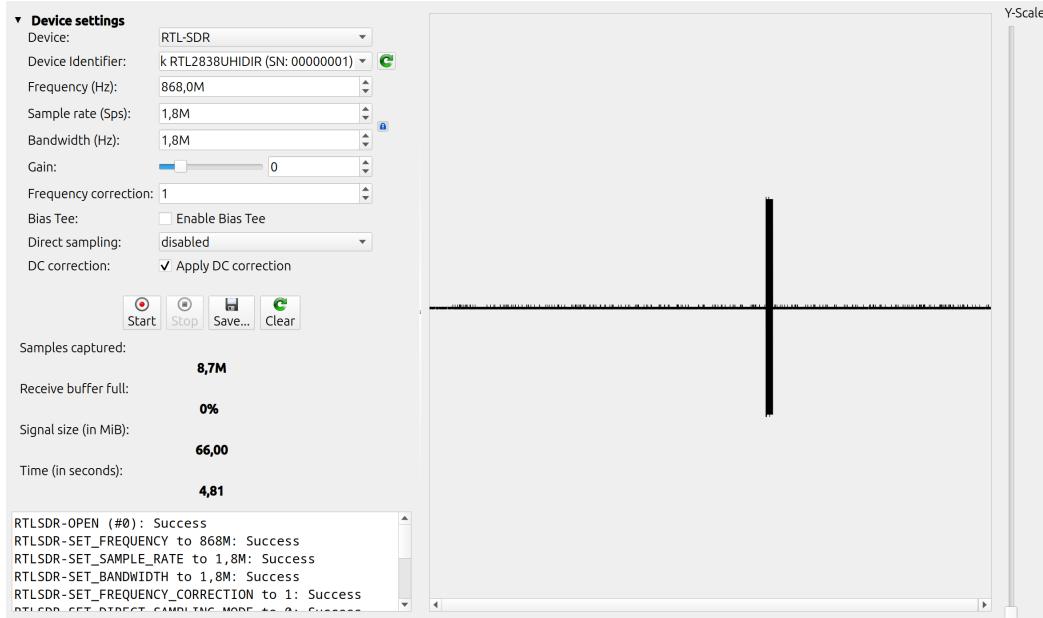


FIGURE 3.12 – Capture du signal

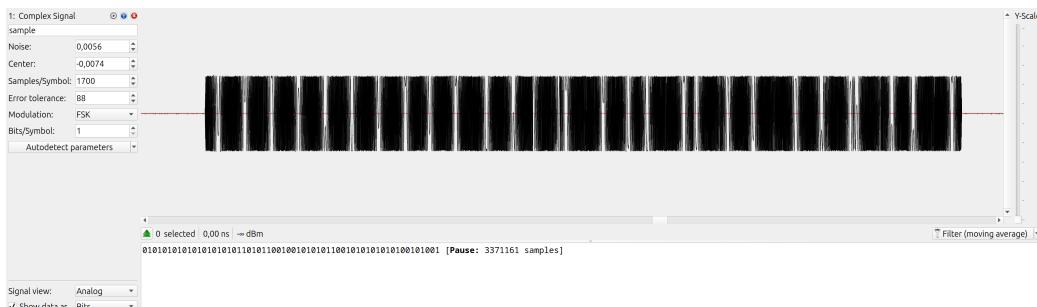


FIGURE 3.13 – Sauvegarde du signal

FIGURE 3.14 – Capture et sauvegarde du signal LoRa

A partir de la figure 3.13, il est possible de couper une partie de l'enregistrement, notamment celle qui ne contient pas le signal. URH permet également d'afficher le signal sous forme de spectrogramme, la figure 3.15 montre le signal sous sa forme analogique et sous spectrogramme. On constate cependant que les deux affichages ne correspondent pas. En effet si on se fie au spectrogramme, la fréquence devrait augmenter surant le premier chirp, or quand on zoom sur le signal sur l'affichage analogique, celle ci diminue dans un premier temps. (voir figure 3.16).

Ce phénomène est due à une interprétation faussée par URH. La fréquence

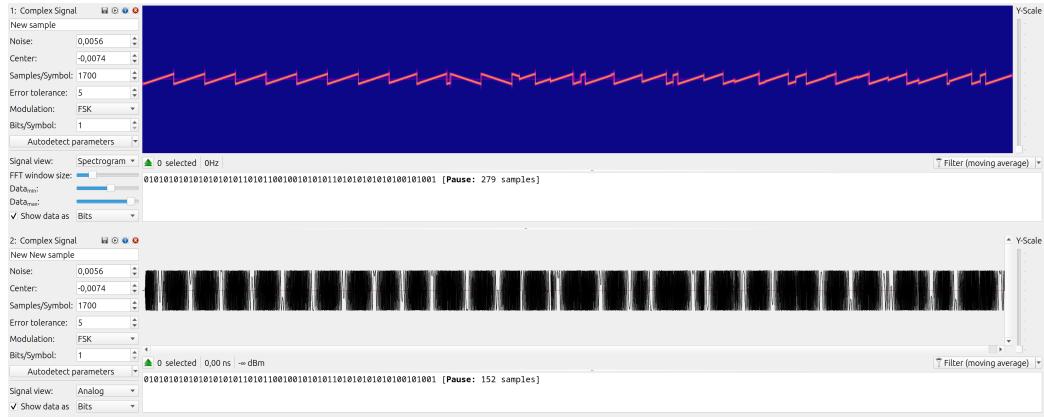


FIGURE 3.15 – Signal LoRa sous forme spectrogramme et analogique

du récepteur choisie étant la même que celle de l'émetteur, URH va interpréter 868Mhz comme étant la fréquence centrale ayant pour valeur 0, ce qui signifie que pour un signal reçu à 868Mhz, la moitié des échantillons est interprété comme ayant une fréquence "négative". Autrement dit, URH affiche la position inverse des échantillons qu'il considère comme négatifs. Pour éviter cette erreur, il suffit de décaler la fréquence d'écoute proportionnellement à la moitié de la taille de la largeur de bande du signal émis. Dans ce cas, le signal émis à une largeur de bande de 125Khz, il faut ajuster la fréquence d'écoute :

$$F_{récepteur} = F_{émetteur} - \frac{BW}{2} \text{ soit :} \quad (3.1)$$

$$868MHz - \frac{125KHz}{2} = 867,9375MHz \quad (3.2)$$

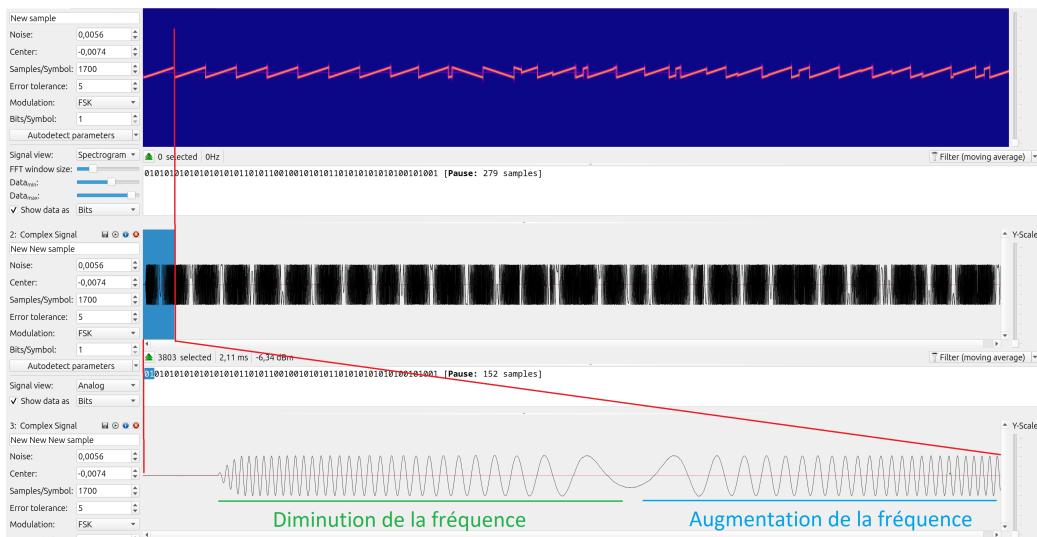


FIGURE 3.16 – Zoom d'un upchirp du signal LoRa capturé

Selon la section 1.3.1.4, la structure du packet LoRa devrait contenir d'abords les symboles du préambule, soit 8 upchirp suivis de 4.25 chirps. La figure 3.17 montre le spectrogramme su signal complet, dont la partie fixe du préambule (les 8 upchirps par défaut) ont été mis en évidence sous forme analogique. Pouvoir identifier et récupérer le préambule du signal LoRa est crucial pour son identification.

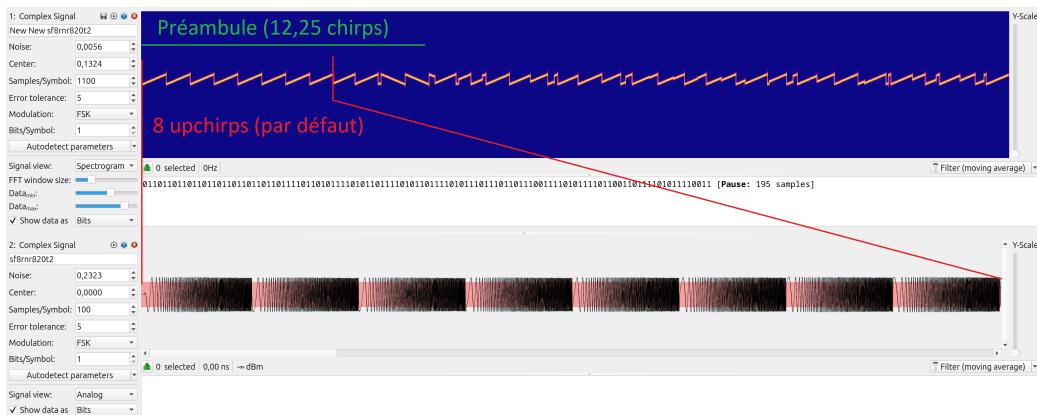


FIGURE 3.17 – Identification du préambule LoRa

Cependant, l'utilisation d'intermédiaire comme URH ou GQRX n'est pas efficace pour traiter un grand nombre de signaux. La dernière étape avant de commencer l'identification des noeuds à partir des signaux est d'automatiser le processus complet de la capture du signal.

3.3.3 analyse avec matplotlib

Une information importante que les deux logiciels de visualisation ont occultée, c'est la composition du signal. En effet, la visualisation analogique du signal avec URH montre une seule onde continue. Cependant il s'agit d'un signal complexe composé de deux ondes distinctes. Les échantillons du signal capturés par la SDR sont composé de deux composantes : la composante *I* (*In phase*) et la composante *Q* (*Quadrature*). La composante *I* représente l'amplitude du signal à un point spécifique du temps, cela correspond à la partie réelle du signal. La composante *Q* représente le déplacement de phase du signal en fonction de *I*, ce qui correspond à la partie imaginaire du signal. URH combine les deux pour générer la vue analogique.

La librairie *matplotlib* de python permet d'afficher le contenu du signal capturé. La figure 3.18 est un plot des échantillons dont la partie réelle (orange) et imaginaire (bleue) ont été séparée. Le signal a été capturé avec un taux d'échantillonage de 1.8MHz, malgré un TOA relativement court (quelques centième de secondes) la quantité d'échantillons capturée est très grande (plus de 130000 échantillons). Matplotlib permet également le zoom, la figure 3.19 fait un zoom sur les 4000 premiers échantillons. Les deux ondes sont clairement visibles

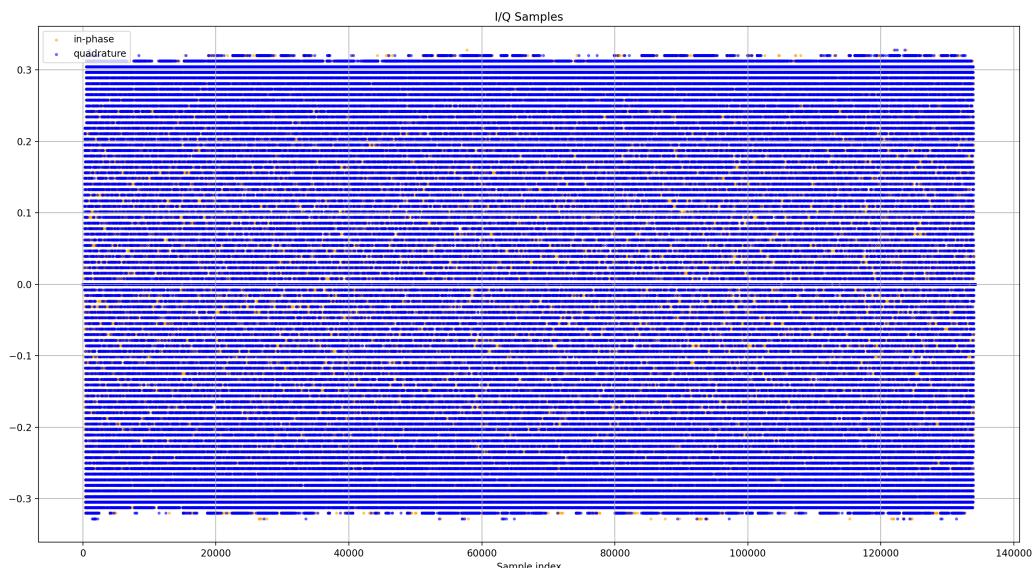


FIGURE 3.18 – Plot des échantillons I/Q avec matplotlib

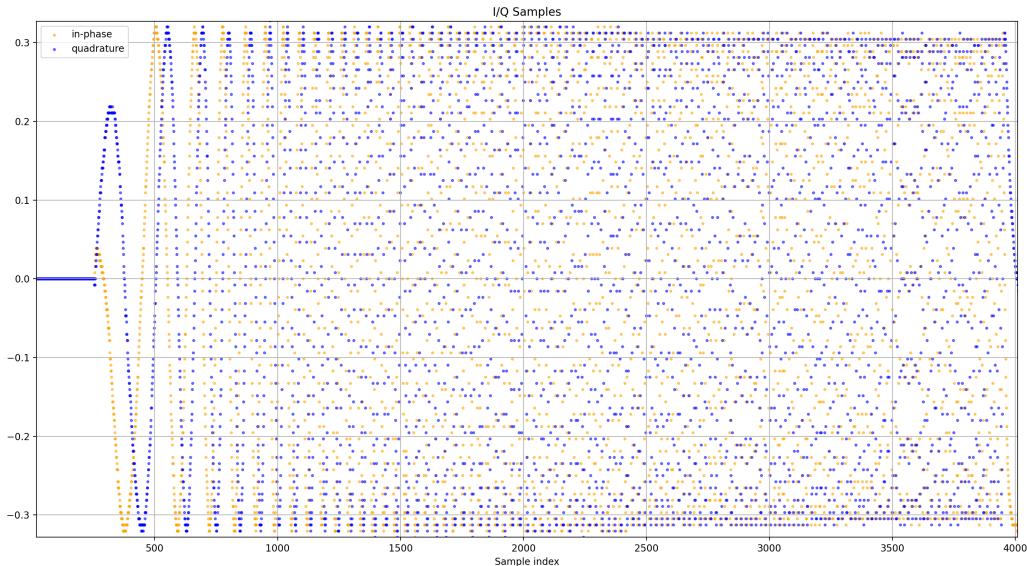


FIGURE 3.19 – zoom sur les 4000 premiers échantillons I/Q

3.3.4 Automatisation du signal et preprocessing

Dans un second temps, besoin d’automatiser la génération et l’enregistrement des signaux afin de pouvoir travailler avec un grand nombre d’échantillons. La librairie python pytlsrc permet de ne pas devoir passer par un logiciel comme urh pour sauvegarder les échantillons. La méthode d’enregistrement est la suivante :

- d’abords, configurer la module et la rtlsdr avec les différent paramètre
 - ensuite l’antenne commence a enregistrer. L’émetteur est informé que la radio logiciel est en écoute et envoie un signal.
 - dès que la radio reçoit le signal, elle informe l’émetteur de se mettre en attente car le preprocessing commence.
 - Le signal reçu est découpé pour ne conserver que le preamble, et puis enregistrer dans un fichier.
 - dès que l’enregistrement est terminé, le cycle recommence.
- la code source est disponible en annexe.

3.4 Méthode ”Constellation traces”

objectif, identification du device via son frequency offset.
selon l’article (citer article), possible de performer la méthode soit uniquement sur le préambule, soit sur l’intégralité du singal.

idée : le received singal contient le baseband singal ainsi qu'un rotation factor instable. pour pouvoir recover cette partie du signal, besoin d'effectuer une opération différentielle suivante :

$$x(t).x(t + n)e^{-j2\pi on}$$

apparition d'un nouveau rotation factor, mais stable. Besoin de trouver deux inconnue, δf et n . n est le differential interval. il se calcule de la manière suivante :

$$Rs = BW/2sf$$

$$N = fs/Rs$$

δf est la difference entre le transmitter carrier frequency et le receiver carrier frequency.

application : récupérer les samples I/Q du signal n ayant au préalable "clean" le signal. utilisation d'un gradient pour observer la densité sur le plot. normalement des zones plus denses apparaissent. coloration : utilisation de la librairie data shader.

clustering, le but de conserver les parties les plus dense (95pourcent du point le plus dense) plot avec les différents appareils. librairie panda et numpy. découpage en zones (bins ?) sous forme d'une grille, calcul de nombre de points dans chaque zone, la zone avec le plus grand nombre de point sera de maximum.

Chapitre 4

Résultats

4.1 Méthode des constellations Traces

4.1.1 paramétrage

3 modules lora
 module rn2483
 module pycom fipy
 module arduino
 paramètres d'émission : SF =7, BW = 125, Freq = 868Mhz, CR = 4/5, mod = Lora
 plot des DCTF (differential constellation traces figure)

4.1.2 training phase

during the training phase, you use differential constellation trace figures (DCTFs) from different modules. The objective is to identify clusters in these figures and learn the characteristics of each module.

4.1.3 testing phase

In your case, during the testing phase, you have new DCTFs from modules that the model has not seen during training. The model uses what it learned to predict the category or cluster for each DCTF.

4.1.4 résultats

Annexe A

Première annexe

Annexe B

Deuxième annexe