



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2026

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Par :

SIKADDOUR Nour Yasmine.

ZENATI Chaimaa.

Thème

Réalisation d'un système IoT de transmission sécurisée dans la bande ISM avec LoRa : Application à l'agriculture de précision.

Soutenu le 30/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	M. BENAOUALI Mohamed	MCB	Université de Mostaganem.
Examineur :	M. BENBAKHTI Brahim	MCA	Université de Mostaganem.
Encadrant :	M.ABED Mansour	Professeur	Université de Mostaganem.
Co-Encadrant :	M. LARBI BEKLAOUZ Hadj	MCB	Université de Mostaganem.

Année Universitaire 2025/2026



Dédicaces

De la part de Sikaddour Nour Yasmine :

À mes très chers parents, pour leur soutien indéfectible, leurs sacrifices et leur amour inconditionnel tout au long de mon parcours académique.

Un grand merci à ma mère qui m'accompagne dans toute la longueur de mon parcours académique, car elle est une personne formidable qui mérite un merci pour tout ce qu'elle fait pour moi, en étant une figure forte et bienveillante. Je te remercie. Merci pour ton amour inconditionnel qui me pousse à devenir une meilleure version de moi-même, pour te rendre fière de ce que je deviens, et qui je deviendrai. Je t'aime ma chérie, tu es un amour. Merci beaucoup, mon cœur.

Je tiens à remercier mon père de m'avoir accompagné durant mon parcours académique, une figure dévouée et diplomate. Allah yrahmou. J'espère qu'il aura une meilleure place là-haut. Je t'aime.

À mes frères et ma sœur, pour leur encouragement et leur présence bienveillante. Pour m'avoir appris plusieurs techniques d'études, des consignes plus importants les uns que les autres, de m'avoir appris à persévérer et pousser pour avoir de meilleures notes. En m'encourageant, chacun à sa propre façon. Je vous aime.

À tous mes amis et camarades de promotion, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables durant ces années d'études.

À tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation et m'ont transmis le goût du savoir.

De la part de Zenati Chaimaa :

À ma mère et mon père, qui n'ont jamais cessé de nous donner sans compter, et qui ont toujours été mon soutien et mon appui à chaque étape.

À mes frères et sœurs, qui ont été à mes côtés dans chaque moment, difficile ou heureux. À mes chers professeurs, qui m'ont enseigné avec patience et bienveillance, et n'ont jamais été avares de savoir ni de conseils.

À chaque amie qui m'a accompagnée tout au long de ce parcours universitaire, merci pour les souvenirs et le soutien.

Ce travail est le fruit de votre amour et de vos encouragements, il n'aurait jamais vu le jour sans vous.

Remerciements

Au nom de Dieu le Tout-Puissant, le Miséricordieux, qui nous a accordé la volonté, la patience et le courage nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadrant de mémoire M. ABED Mansour ainsi que le co-encadrant, M. LARBI Baklaouz Hadj. Notamment pour leurs précieux conseils, leurs directivités ainsi que les consignes qui nous ont dirigé tout au long de l'accomplissement de ce mémoire, un travail qui a été exécuté non-seulement grâce à nous mais aussi grâce à leur disponibilité et patience, et leur veillance sur nous.

Nous remercions également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de lui apporter leurs remarques constructives.

Nos reconnaissances vont aussi à l'ensemble du corps enseignant du département de Génie Electrique de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour la qualité de la formation dispensée.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude au Laboratoire de recherche Signaux et Systèmes (LSS) de l'Université de Mostaganem et à tous ses membres pour l'aide qu'ils nous ont apportée en termes d'équipement, d'espaces de travail, de commodités, de conseils, d'orientation et de suivi jusqu'à l'achèvement de nos projets de fin d'études master.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, contribué à la réussite de ce projet de fin d'études.

ملخص

في الوقت الحاضر، يشهد إنترنت الأشياء (IoT) تطوراً سريعاً في العديد من المجالات بفضل ربط الأجهزة الذكية، مما يتيح جمع البيانات ونقلها عن بُعد، إضافة إلى تأمين البيانات المرسلة. ومن بين تقنيات الاتصال المخصصة لإنترنت الأشياء، تتميز تقنية LoRa بمدى الطويل، واستهلاكها المنخفض للطاقة، وموثوقيتها العالية. يقدم هذا المشروع نظام نقل آمن يعتمد على تقنية LoRa، مطبقاً على الزراعة الدقيقة. ويرتكز النظام على لوحتين من نوع ESP32، ووحدين من نوع LoRa SX1276 لإرسال البيانات واستقبالها، وحساس DHT22 لقياس درجة الحرارة والرطوبة. يتم نقل البيانات عبر بروتوكولات LoRaWAN و UART و SPI و 1-Wire، ثم تُعرض على واجهة ويب لضمان المراقبة في الوقت الفعلي. وقد تم تطوير واختبار نموذج أولي وظيفي للتحقق من أداء النظام. الكلمات المفتاحية: إنترنت الأشياء، LoRa، LoRaWAN، ESP32، SX1276، DHT22، UART، SPI، 1-Wire، الزراعة الدقيقة، النقل الآمن.

Résumé

De nos jours, l'Internet des Objets (IoT) connaît un développement rapide dans de nombreux domaines grâce à la connexion d'objets intelligents permettant la collecte et la transmission de données à distance, ainsi que la sécurisation des données acheminées. Parmi les technologies de communication dédiées à l'IoT, LoRa se distingue par sa longue portée, sa faible consommation énergétique et sa fiabilité.

Ce projet présente un système de transmission sécurisée basé sur la technologie LoRa appliqué à l'agriculture de précision. Il repose sur deux cartes ESP32, deux modules LoRa SX1276 pour la transmission et la réception des données et un capteur DHT22 permettant de mesurer la température et l'humidité.

La communication des données se fait via les protocoles LoRaWAN, 1-Wire, UART et SPI puis affichées sur une interface web afin d'assurer une surveillance en temps réel. Un prototype fonctionnel a été réalisé et testé pour valider les performances du système.

Mots clés : IoT, LoRa, LoRaWAN, ESP32, SX1276, DHT22, UART, SPI, 1-Wire, agriculture de précision, transmission sécurisée.

Abstract

Nowadays, the Internet of Things (IoT) is experiencing rapid development in many fields through the connection of smart objects, enabling remote data collection and transmission, as well as securing the transmitted data. Among the communication technologies dedicated to IoT, LoRa stands out for its long range, low power consumption, and reliability.

This project presents a secure transmission system based on LoRa technology applied to precision agriculture. It relies on two ESP32 boards, two LoRa SX1276 modules for data transmission and reception, and a DHT22 sensor for measuring temperature and humidity.

Data communication is carried out via the LoRaWAN, 1-Wire, UART, and SPI protocols, then displayed on a web interface to ensure real-time monitoring. A functional prototype was developed and tested to validate the system's performance.

Keywords: IoT, LoRa, LoRaWAN, ESP32, SX1276, DHT22, UART, SPI, 1-Wire, precision agriculture, secure transmission.

Liste des Acronymes

ABP	Activation By Personalization
ADR	Adaptive Data Rate
AES	Advanced Encryption Standard
AppEUI	Application Extended Unique Identifier
AppKEY	Application Key
AppSKEY	Application Session Key
BW	Bandwidth (Largeur de bande)
CHIRP	C ompressed H igh density R adar P ulse (Impulsions radar comprimées de forte densité)
CR	Coding Rate (Taux de codage)
CRC	Cyclic Redundancy Check (Contrôle de redondance cyclique)
CSS	Chirp Spread Spectrum (Étalement de spectre par chirp)
DevAddr	Device Address
DevEUI	Device Extended Unique Identifier
FSK	Frequency Shift Keying
IoT	Internet of Things (Internet des objets)
ISM	Industrial, Scientific and Medical (Bande de fréquences)
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LoRa	Long Range (Modulation à longue portée)
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
MAC	Medium Access Control
MCU	Micro Controller Unit
MIC	Message Integrity Code
NwkSKey	Network Session Key
OTA	Over The Air
OTAA	Over The Air Activation
PHDR	Physical Header (En-tête physique)
PHY	Physical Layer (Couche physique)
RF	Radio Frequency (Radiofréquence)
SF	Spreading Factor (Facteur d'étalement)

SNR	Signal-to-Noise Ratio (Rapport signal sur bruit)
ToA	Time on Air (Durée d'émission)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
Wi-Fi	Wireless Fidelity

Liste des Figures

Chapitre I : Généralités sur LoRa.

Figure 1.1 : Bloc de diagramme du LoRa H RF96 SX1276.....	5
Figure 1.2 : L'étendue de la bande passante LoRa comparée aux autres BP.	7
Figure 1.3 : Illustration du domaine temporel de (a) UP-chirp sinusoïdal. (b) DOWN-chirp sinusoïdal.	9
Figure 1.4: Diagramme de rayonnement polaire 2D.	17
Figure 1.5 : Diagramme de rayonnement 3D du mode normal, forme de donut/tore.	17
Figure 1.6 : Le diagramme de rayonnement 3D du mode axial.	18
Figure 1.7 : Schéma démontrant la topologie et l'architecture d'un réseau LoRaWAN.....	21
Figure 1.8 : Couches composantes du LoRa.....	21
Figure 1.9: La chronologie de la classe A.	22
Figure 1.10 : La synchronisation des beacons dans la classe B.....	23
Figure 1.11 : La chronologie de la classe C.....	23
Figure 1.12 : La consommation d'énergie par classe.	24

Chapitre II : Lora et l'agriculture de précision.

Figure 2.1 : Le modem LoRa RF96 SX1276 (a) Vue arrière, (b) Vue de face..	27
Figure 2.2 : Le module LoRa H RF96 branché avec une antenne hélicoïdale.	28
Figure 2.3 : Le capteur DHT22.....	29
Figure 2.4 : Le bloc de diagramme du ESP32.	31

Chapitre III : Conception du système

Figure 3.1: Architecture globale du système IoT basé sur la technologie LoRa. (a) Schéma synoptique du nœud émetteur (Tx), (b) Schéma synoptique du nœud récepteur (Rx).	36
Figure 3.2 : Montage réel du système (ESP32 + LoRa).	37
Figure 3.3 : Schéma électrique capteur DHT22.	39
Figure 3.4 : Organigramme de la séquence émission des données LoRa.....	40
Figure 3.5 : Organigramme de la réception Rx...	42
Figure 3.6 : Format du paquet LoRa.....	43
Figure 3.7 : Structure de la trame en format de longueur variable..	44
Figure 3.8 : Interface de développement Arduino IDE.	45
Figure 3.9 : Montage du nœud émetteur.....	46
Figure 3.10 : Montage du nœud récepteur.....	46
Figure 3.11 : Résultat de la transmission via UART.	47
Figure 3.12 : Interface web ESP32 LoRa Dashboard affichant les données reçues via Wi-Fi. ...	49

Liste des Tableaux

Chapitre I : Généralités sur LoRa.

Tableau 1.1 : Tableau des composants du LoRa et leurs rôles.....	6
---	---

Chapitre II : Lora et l’agriculture de précision.

Tableau 2.1 : Tableau déterminant les paramètres de la modulation CSS et leurs propriétés.....	32
Tableau 2.2 : Tableau démontrant les différents protocoles de communications.....	33

Chapitre III : Conception du système.

Tableau 3.1 : Connexion du module LoRa avec l'ESP32.....	38
Tableau 3.2 : Connexion du capteur DHT22 avec la carte ESP32	39

Table des matières

Liste des Acronymes

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Introduction Générale..... 1

Chapitre I — Généralités sur LoRa 4

I.1 Introduction.....	4
I.2 Présentation de LoRa	4
I.2.1 Architecture du LoRa H RF96 SX1276.....	4
I.2.1.2 Rôles de chaque composant.....	5
I.3 Caractéristiques du LoRa.....	7
I.3.1 La bande ISM	7
I.3.1.2 LoRa — Bande passante.....	7
I.3.2 La modulation.....	8
I.3.2.1 La modulation CSS.....	8
I.3.2.1.1 Le processus de la modulation.....	10
I.3.2.1.2 Les différents paramètres de la modulation CSS.....	10
I.3.2.1.2.1 Spreading Factor.....	10
I.3.2.1.2.2 Bandwidth.....	10
I.3.2.1.2.3 Coding Rate	10
I.3.2.1.2.4 Temps en air	10
I.3.2.1.3 Le propriétés du CSS	11
I.3.2.2 La démodulation des signaux CSS	11
I.3.2.3 Modulation FSK/OOK	11
I.3.2.3.1 Modulation FSK	12
I.3.2.3.2 Modulation OOK.....	12
I.3.2.3.2.1 Mise en forme de la modulation	12
I.3.2.4 Démodulation FSK/OOK	12
I.3.2.4.1 Démodulation FSK.....	12
I.3.2.4.2 Démodulation OOK.....	13
I.3.3 Les protocoles de communication	13
I.3.3.1 UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)	13
I.3.3.2 SPI (Serial Peripheral Interface).....	14
I.3.3.3 Wi-Fi (Wireless Fidelity).....	14
I.3.3.4 Le 1-Wire.....	14
I.3.3.5 LoRaWAN.....	14
I.4 Les composants hardware du LoRa	15
I.4.1 Les nœuds.....	15
I.4.1.1 Le capteur	15
I.4.1.2 Le microcontrôleur	15
I.4.1.3 Le module radio LoRa.....	15
I.4.1.4 L'antenne.....	16
I.4.1.4.1 L'antenne hélicoïdale	16

I.4.1.4.2 Les diagrammes de rayonnement	16
I.4.1.4.3 Les applications de l'antenne hélicoïdale dans différents secteurs	18
I.4.1.5 Une source d'énergie.....	19
I.4.1.6 Les passerelles	19
I.4.1.6.1 Les composants d'une gateway.....	19
I.4.1.6.1.1 L'antenne	19
I.4.1.6.1.2 Le processeur de bande de base.....	19
I.4.1.6.1.3 La CPU	19
I.4.1.6.1.4 Le module de liaison.....	20
I.4.1.6.1.5 L'alimentation	20
I.5 Le réseau LoRaWAN.....	20
I.5.1 Couches OSI – LoRa	21
I.5.1.1 Classe A.....	22
I.5.1.2 Classe B.....	22
I.5.1.3 Classe C.....	23
I.5.1.4 La consommation d'énergie des différentes classes.....	23
I.5.2 La sécurité du réseau LoRaWAN	24
I.6 Conclusion	24
Chapitre II — Analyse structurelle du projet réalisé	25
II.1 Introduction	25
II.2 La conception du projet.....	25
II.2.1 Couche physique	25
II.2.1.1 LoRa H RF96 SX1276.....	26
II.2.1.1.1 La bande ISM du LoRa	26
II.2.1.1.2 L'architecture du LoRa et son fonctionnement.....	26
II.2.1.2 L'antenne.....	27
II.2.1.3 Capteurs environnementaux.....	28
II.2.1.3.1 Le capteur DHT22.....	29
II.2.1.4 Le microcontrôleur ESP32	29
II.2.1.4.1 L'architecture interne du ESP32	30
II.2.1.4.2 Les propriétés du ESP32	31
II.2.1.5 La modulation CSS	31
II.2.1.5.1 Les avantages de la modulation CSS dans le domaine d'agriculture.....	32
II.2.1.5.2 Paramètres CSS du RFM96W.....	32
II.2.1.6 Démodulation CSS.....	32
II.3 Couche MAC.....	33
II.3.1 Les différents protocoles de communication utilisés.....	33
II.3.1.1 Le protocole 1-Wire (DHT22)	33
II.3.1.2 Le protocole SPI.....	33
II.3.1.3 Le protocole UART (LoRa & ESP32)	33
II.3.1.4 Le protocole Wi-Fi.....	34
II.3.1.5 Le protocole LoRaWAN	34
II.4 Conclusion.....	34
Chapitre III — Conception du système et tests pratiques.....	35
III.1 Introduction.....	35
III.2 Architecture du système.....	35

III.3 Conception et schéma synoptique	36
III.3.1 Schéma synoptique global	36
III.3.2 Description du schéma global	36
III.4 Composants utilisés.....	37
III.4.1 Module Lora SX1276	37
III.4.2 Connexion LoRa avec ESP32	38
III.4.3 Connexion entre l'ESP32 et le capteur DHT22.....	38
III.4.3.1 Description des broches du capteur DHT22.	39
III.4.3.2 Connexion du capteur DHT22 avec l'ESP 32.....	39
III.5 Les organigrammes	40
III.5.1 Organigramme d'émission LoRa.....	40
III.5.2 Processus de réception LoRa	41
III.5.3 Organigramme de réception LoRa (Rx).....	41
III.6 Les trames de données LoRa.....	41
III.6.1 Trames de transmission.....	41
III.6.2 Trames de réception	43
III.6.2.1 Traitement et déchiffrement des données	44
III.7 Plateforme de développement	44
III.8 Les trames de données LoRa.....	45
III.8.1 Test 1 : Réalisation et validation du nœud émetteur	47
III.8.2 Test 2 : Réalisation et validation du nœud récepteur	47
III.8.3 Test 3 : Vérification de la portée LoRa.....	47
III.8.4 Test 4 : Transmission des données cryptées et codées.....	48
III.8.5 Test 4 : Intégration du protocole Wi-Fi	48
III.9 Conclusion	49
Conclusion générale.....	50
Bibliographie.....	
Annexe A	
Annexe B.....	
Annexe C.....	

INTRODUCTION

GENERALE

Dans un monde qui est en constante évolution, beaucoup de domaines se sont projetés dans une lancée moderne, facilitant la vie quotidienne et priorisant les découvertes technologiques en remplaçant les outils traditionnellement utilisés, par des technologies plus avancées, améliorant la qualité de vie et la rendant plus pratique et accessible. Ce qui est le cas pour le domaine de l'agriculture, un domaine très délaissé malgré l'évolution du monde, où règnent la modernité et le contemporain. Le labour dont l'être-humain a été l'acteur principal, est très clairement aux antipodes du confort qu'on connaît. Un contraste flagrant, reflétant le sacrifice et l'effort que l'humain a consacré pour la science et son développement.

Juxtaposant les deux domaines, la modernité et le traditionnel néolithique, afin d'atteindre l'excellence, les chercheurs et scientifiques ont pu améliorer le domaine de l'agriculture, se penchant maintenant vers un aspect purement technologique et logistique, optimisant ce domaine. La modernité a apporté une touche vraisemblablement importante, le gaspillage des ressources naturelles est maintenant moyennement confronté, les erreurs ne sont plus reprochables, l'industrie s'optimise graduellement. Les techniques sont diverses, allant de la source au traitement. Une approche ciblée et une gestion fine et intelligente des parcelles agricole.

De ce fait, l'agriculture de précision a été développée, une approche moderne consistant à utiliser les technologies de l'information et de la communication pour surveiller et gérer les cultures de manière optimale, en limitant le recours à la main humaine, et rendant ce domaine plus gérable grâce aux technologies utilisées.

Parmi ces nombreuses technologies, l'Internet des objets (IoT en anglais pour Internet of Things) se distingue comme un concept, ou plutôt un modèle technologique, basé sur l'interconnexion de dispositifs électroniques dotés de capacités de détection grâce à leurs capteurs intelligents, de traitement de données via leurs microprocesseurs, et de communication via les réseaux. Ces dispositifs sont capables de collecter des données issues de leur environnement, de les transmettre via des réseaux de communication et, dans certains cas, d'agir de manière autonome en prenant compte des permissions qui leur sont attribuées.

L'essor des IoT a permis de moderniser la plupart des domaines, réduisant grandiosement le recours à l'intervention humaine, facilitant plusieurs abstraits, et réduisant le coût de plusieurs dépenses et l'effort qui l'accompagne. De plus, les technologies des objets connectés permettent d'optimiser et d'automatiser le transfert de données, garantissant des communications fiables, et facile à accéder. Néanmoins, cette évolution nécessite des solutions plus efficaces afin de garantir des échanges fluides et fiables, ainsi qu'une utilisation optimale des ressources. Toutefois, la collecte des données devrait être continue, précise, fiable, et peu énergivore, priorisant l'économie d'énergie [1].

Parmi les IoT adaptés aux communications longue distance, la technologie Long Range (LoRa) se distingue par sa flexibilité, assurant une communication à longue portée, et une transmission d'information garantie et efficace. Ses dispositifs sont hautement configurables, et ses paramètres, tels que le facteur d'étalement, la bande passante, le taux de codage, peuvent être ajustés pour répondre aux différents besoins afin d'optimiser les performances et la consommation énergétique. Ses différentes propriétés, de la modulation et de la topologie à ses trames de données, font de LoRa un dispositif parfaitement adapté à plusieurs types d'utilisation pratique.

Une telle pratique dans un domaine de télécommunications nécessite un haut-niveau de compréhension, de ce fait, la conception d'un système qui exploite une communication dans un milieu qui peut atteindre une grande distance est un défi intimement lié à notre formation de

Introduction Générale

master, surtout si l'on veut à sécuriser ce dernier. Une problématique s'impose, comment pourrions-nous relever ce défi et assurer une transmission de données dans des canaux sans fils non-idéaux sur une portée maximisée ?

Notre choix de la technologie LoRa plutôt qu'un autre système standard se justifie par ses caractéristiques particulièrement remarquables, à savoir :

- ▣ Conçu pour une communication à longue portée, un réseau LoRa pourrait atteindre les 20 Km dans un milieu urbain.
- ▣ Grâce à la robustesse de son système contre les interférences, la modulation Chirp Spread Spectrum (CSS) permet de décoder un signal sous le niveau de bruit, allant à -20 dB car sa technique de modulation est très sensible, permettant d'explorer une bonne plage fréquentielle en dessous du niveau de bruit, et détecter les informations.
- ▣ L'utilisation de la bande ISM (Industrial, Scientific and Medical) sans licence réduit considérablement les coûts de déploiement et d'exploitation, rendant le modem LoRa très peu coûteux et plus attractif.
- ▣ Avec une consommation d'énergie remarquablement faible, le modem LoRa ne consomme que 0,2 μ A en mode veille, ce qui lui confère une autonomie de plusieurs années sur la batterie et le rend exploitable et très utile, notamment dans les zones isolées et les champs agricoles.
- ▣ Son faible débit de données garantit une longue portée, car en matière de transmission radio, plus le débit est faible, plus la portée est grande [2].

Cependant, ce dispositif présente certains inconvénients, parmi lesquels :

- ▣ La faible bande passante, de seulement 0,3 à 50 Kbit/s, rend la technologie LoRa inadaptée aux applications nécessitant la transmission de volumes importants de données ou de flux multimédias.
- ▣ Les coûts de la mise en place du système sont jugés faibles, mais ceux des passerelles réseau LoRa WAN (LoRa Wide Area Network) sont généralement plus élevés.
- ▣ En milieu urbain, les bâtiments et diverses structures peuvent réduire la longue portée initialement annoncée.
- ▣ Il existe une certaine latence de communication, ce qui peut limiter la communication instantanée pour certaines applications.
- ▣ Les données s'envoient par petits paquets, et la vitesse de leur transmission est faible [3],[4].

Le cahier des charges de notre projet de fin d'études consiste à :

1. Étudier la technologie LoRa et son écosystème : une recherche bibliographique approfondie est nécessaire pour appréhender le sujet. Dans ce contexte, nous avons commencé par comprendre l'architecture interne du module RFM96W basé sur le chipset Semtech SX1276, la modulation CSS (Chirp Spread Spectrum), le réseau LoRaWAN, les mécanismes de sécurité intégrés, ainsi que les divers protocoles de communication.
2. Concevoir et réaliser un système IoT de transmission sécurisée dans la bande ISM : le système conçu est composé de :
 - Un nœud émetteur à base d'un microcontrôleur ESP32, d'un capteur DHT22 et d'un module LoRa RFM96W,
 - Une gateway LoRaWAN assurant la passerelle entre le réseau radio et le réseau IP,
 - Un serveur d'application permettant la réception, le stockage et la visualisation des données collectées.

Le cheminement des données est le suivant : le capteur DHT22 mesure la température et l'humidité ambiantes et transmet ces valeurs à l'ESP32 via le protocole 1-Wire. L'ESP32 formate

Introduction Générale

les données et les achemine au module RFM96W via UART. Ce dernier encode les données dans une trame PHY LoRa, les module par la technique CSS et les transmet sur la bande ISM à 915 MHz. La gateway reçoit le signal, le démodule et le transmet via Internet au serveur d'application, où les données deviennent accessibles à l'utilisateur.

Le reste du manuscrit est organisé comme suit :

Le premier chapitre introduit la technologie LoRa de manière approfondie, en présentant l'architecture interne du module RFM96W, la modulation CSS et ses paramètres, le protocole LoRaWAN, la structure de la trame PHY, le bilan de liaison, les mécanismes de sécurité intégrés, ainsi que les protocoles de communication comme le SPI, UART et Wi-Fi, notant les couches OSI physiques et MAC.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du système de surveillance dans le domaine d'agriculture développé, en détaillant les composants matériels retenus dont l'ESP32, le capteur DHT22, le module RFM96W et l'antenne hélicoïdale KH K-102 ainsi que les protocoles de communication qui les relient

Le troisième chapitre présente une analyse du système réalisé, en discutant ses performances théoriques, ses limites et les perspectives d'amélioration et d'évolution vers des applications plus complexes, ainsi que les résultats des tests.

Enfin, nous concluons ce mémoire par des recommandations et des orientations pour les travaux futurs dans le domaine de LoRa et la transmission sécurisée. Deux annexes sont également fournies à la fin du document.

Chapitre I

Généralités sur LoRa.

I.1 Introduction

L'utilisation des objets et des réseaux IoT a pleinement contribué à l'évolution des télécommunications dont les critères suivants s'imposent : sans fil, longue portée et faible consommation d'énergie. L'intérêt professionnel est de concevoir des réseaux IoT fiables, sécurisés et économes en énergie.

Dans le contexte de ce projet, les objets IoT forment un réseau LoRaWAN, entre capteurs intelligents qui acquièrent des données, et des microcontrôleurs les acheminant à distance, qu'on peut voir sur des écrans. Spécifiquement, l'utilisation se prime dans les paramètres de la modulation, de la topologie et des protocoles de communications, afin d'assurer une transmission fiable de données.

I.2 La présentation de LoRa

Le dispositif LoRa, développé par une équipe studieuse française, est un modem qui assure la communication sans-fil, à longue distance, d'où son appellation Long Range. Ce dernier permet une communication entre plusieurs dispositifs connectés dans un réseau. Ce qui rend LoRa une création distinguée, ce n'est pas sa capacité à pouvoir transmettre des données à de longues distances, mais surtout sa bande passante extrêmement basse si l'on compare avec celle des autres applications IoT, ainsi que celle du Wi-Fi et Bluetooth. LoRa utilise une plage fréquentielle variant de 433MHz à 915MHz, avec l'avantage évident et extrêmement intéressant que cette bande soit acquise sans avoir recours à une licence [5].

Bien que l'envoi des données soit à une basse fréquence, les interférences avec les autres bandes passantes est plus rare, mais les menaces sont toujours existantes. Afin de sécuriser la transmission, les données du LoRa peuvent être cryptées, donc ce sera complexe de les atteindre, ou même de les injecter avec des malwares [4].

La communication se fait par des ondes radio-fréquentielles, c'est pour cela que la portée est extrêmement longue. LoRa, qui est un réseau low-power WAN (LPWAN), assure la juxtaposition de traitement de données numériques et leur transmission RF pour les applications nécessitant un faible débit de transmission, une grande couverture radio et une autonomie énergétique élevée.

Contrairement aux autres objets de communications que l'on puisse croiser dans notre quotidien comme le Wi-Fi et le Bluetooth, LoRa semble privilégier la portée et l'efficacité énergétique au débit de transmission, la rendant adaptée aux systèmes IoT nécessitant l'envoi de petits paquets de données.

I.2.1 Architecture de LoRa H RF96 SX1276

Afin d'explorer en profondeur les composants principaux du modem LoRa, une découverte architecturale de son bloc de diagramme est imposée, nous permettant de mieux visualiser son fonctionnement comme l'illustre la Figure 1.1.

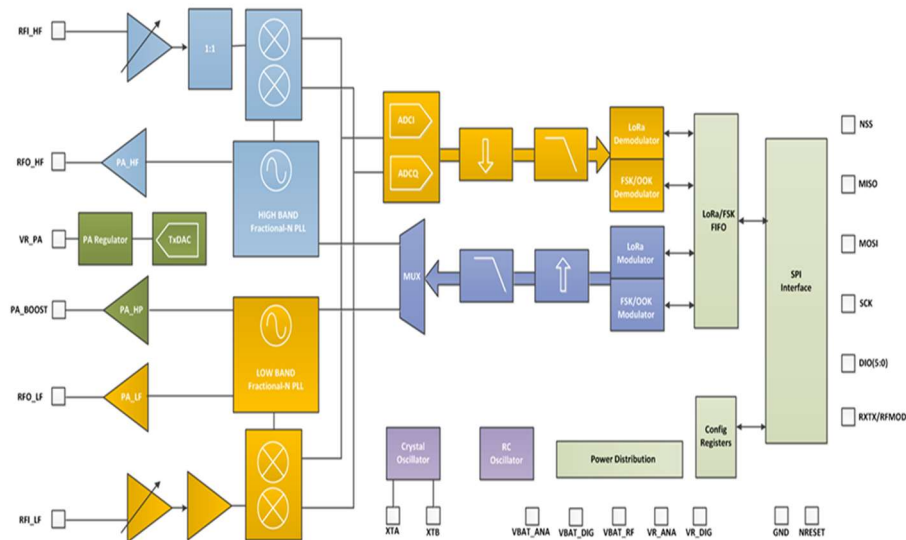


Figure 1.1 : Bloc de diagramme du LoRa H RF96 SX1276 [6].

La Figure 1.1 présente le bloc de diagramme interne du module LoRa H RF96, basé sur le chipset Semtech SX1276. Ce schéma architectural permet de visualiser l'ensemble des blocs fonctionnels qui composent le transceiver et de comprendre la chaîne de traitement du signal, depuis l'interface radiofréquence jusqu'à l'exploitation numérique des données.

Avant de détailler le fonctionnement global du transceiver LoRa, il est essentiel d'identifier les principaux blocs qui composent son architecture interne. Comme rapporté dans le Tableau 1.1, chaque composant joue un rôle spécifique dans la chaîne de transmission et de réception des données, allant du traitement analogique du signal radio jusqu'à son exploitation numérique.

2.1.2 Les rôles de chaque composant

La structure interne du transceiver LoRa repose sur une chaîne de traitement hybride, optimisée à la fois pour une très faible consommation énergétique et pour des communications longue portée.

En réception, le signal capté par l'antenne est d'abord amplifié par un amplificateur à faible bruit (LNA), qui augmente son amplitude tout en préservant un rapport signal sur bruit (SNR) satisfaisant. Ensuite, après une éventuelle transposition en fréquence, le signal est traité au niveau de la bande de base.

La synthèse de fréquence est assurée par une boucle à verrouillage de phase (PLL), tandis que le mélangeur (MIX) réalise la conversion entre la radiofréquence et la bande de base. À l'issue de cette étape, le signal est décomposé en deux composantes analogiques : I (In-phase) et Q (Quadrature), essentielles pour la conservation de l'information de phase avant la conversion analogique-numérique (ADC).

Le cœur numérique du transceiver prend ensuite en charge le traitement des données, incluant la modulation et la démodulation. Il supporte plusieurs schémas de modulation : LoRa basé sur le chirp spread spectrum (CSS), optimisé pour les longues distances et la robustesse ; la modulation FSK, adaptée à des débits plus élevés ; et la modulation OOK, utilisée pour assurer une compatibilité avec des systèmes plus anciens.

Tableau 1.1 : Tableau des composants du LoRa et leurs rôles [6].

N°	Type de composant	Dénomination Schématique	Rôle
01	Interface radiofréquence	RFI_HF,RFI_LF, RFO_HF, RFO_LF	Assure l'interface entre le circuit et l'antenne pour la transmission et la réception des signaux RF
02	Amplificateur à faible bruit	LNA	Amplifie les signaux reçus tout en minimisant l'introduction de bruit
03	Amplificateur de puissance	PA (PA_HF, PA_LF, PA_BOOST)	Augmente la puissance du signal en phase d'émission afin d'améliorer la portée
04	Régulateur de puissance	PA Regulator	Contrôle et stabilise l'alimentation des amplificateurs
05	Convertisseur numérique-analogique	TxDAC	Convertit les données numériques en signal analogique pour la transmission
06	Synthétiseur de fréquence (PLL)	High/Low Band Fractional-N PLL	Génère une fréquence porteuse stable et précise pour la communication radio
07	Mélangeur	MIX	Réalise la conversion de fréquence entre la RF et la bande de base
08	Convertisseur analogique-numérique	ADC (I/Q)	Transforme le signal analogique reçu en signal numérique exploitable
09	Modulateur	LoRa/FSK/OOK Modulator	Module les données avant leur transmission
10	Démodulateur	LoRa FSK/OOK Demodulator	Démodule le signal reçu pour extraire les données utiles
11	Mémoire tampon	FIFO	Stocke temporairement les données en émission et en réception
12	Interface de communication	SPI (MISO, MOSI, SCK, NSS)	Assure la communication entre le transceiver et le microcontrôleur
13	Registres de configuration	Config Registers	Contiennent les paramètres de fonctionnement du module (SF, BW, puissance, etc.)
14	Oscillateur à quartz	Crystal Oscillator (XTA, XTB)	Fournit une horloge de haute précision
15	Oscillateur interne	RC Oscillator	Fournit une horloge secondaire moins précise mais autonome
16	Distribution d'alimentation	Power Distribution	Répartit l'énergie entre les différents blocs du circuit
17	Entrées d'alimentation	VBAT_ANA,VBAT_DIG, VBAT_RF	Alimentent respectivement les parties analogique, numérique et RF

Le transceiver est configuré via une interface SPI (Serial Peripheral Interface), qui permet d'accéder aux registres internes pour définir des paramètres tels que le facteur d'étalement (SF) et la bande passante (BW). Une mémoire FIFO (First In First Out) assure le transfert sécurisé des trames entre la radio et le microcontrôleur, limitant les pertes de données.

Enfin, une gestion avancée de l'énergie, associée à des sources d'horloge précises (quartz ou oscillateur RC), permet de réduire significativement la consommation, garantissant ainsi une autonomie de plusieurs années pour les dispositifs IoT [6].

I.3 – Les caractéristiques du LoRa

Un bref coup d'œil concernant l'architecture intérieure du LoRa et une brève description de ses composants n'est pas suffisante pour réussir à manier et comprendre le bon fonctionnement de ce dernier. Il nous est indispensable donc de découvrir en profondeur le LoRa ainsi que le réseau LoRaWAN, et les éléments composants de ce dernier.

I.3.1 - La bande ISM

Une bande ISM, comme ses acronymes l'indiquent, est une bande Industrielle, Scientifique et Médicale, de fréquence radio libre, destinée au début pour les équipements industriels, les équipements scientifiques, ainsi que les appareils médicaux. Maintenant, pour faciliter notre quotidien, elle est utilisée dans la conception des technologies sans-fil comme LoRa.

Une bande ISM spéciale LoRa en Europe a pour bande fréquentielle : 868 MHz, en Amérique du Nord : 915 MHz, alors qu'en Asie, ça varie fortement entre 433 MHz et 923 MHz, selon les pays [4]. En temps normal, la plage fréquentielle d'une bande ISM commence par 6.765 MHz et peut atteindre les 246 GHz. Son utilisation est requise dans les domaines industriels, allant de micro-ondes aux routeurs Wi-Fi. Son coût est faible, et ce qui la rend très accessible et exploitable est que cette dernière ne requiert pas de licence. Cependant, son utilisation étant partagée par plusieurs systèmes radio reste sensible aux interférences électromagnétiques [7].

I.3.1.2- Bande passante de la technologie LoRa

En Europe, la bande fréquentielle principale est de 868.1 MHz, avec plusieurs canaux disponibles à 868.3 MHz et 868.5 MHz, dans un intervalle compris entre 863 MHz et 870 MHz. Ces fréquences restent bien inférieures à celles du Bluetooth et du Wi-Fi, qui opèrent à 2,4 GHz. Cette caractéristique confère à LoRa une meilleure propagation du signal sur de longues distances et une pénétration accrue des obstacles physiques, au détriment du débit de données [2]. La Figure 1.2 montre l'étendue de la bande passante LoRa.

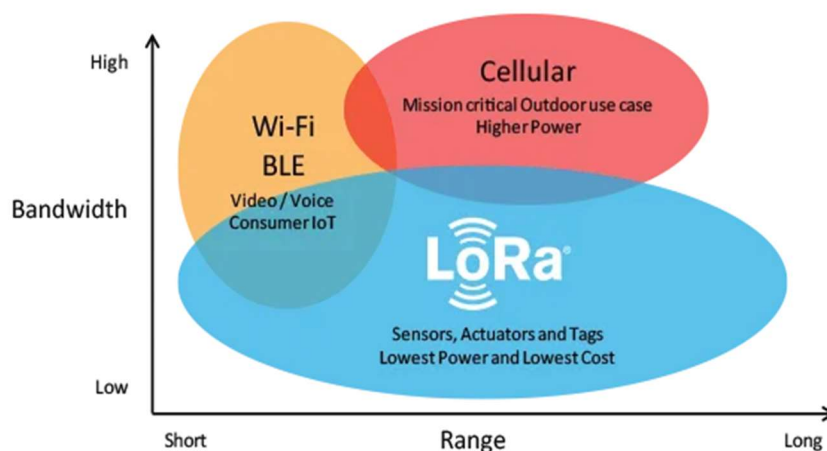


Figure 1.2 : L'étendue de la bande passante LoRa comparée aux autres bandes RF [2].

Comme le démontre la figure ci-dessus, LoRa se positionne dans une zone de faible bande passante mais de très longue portée, contrairement au Wi-Fi, au Bluetooth et aux réseaux cellulaires qui offrent des débits élevés mais une portée réduite. Cette caractéristique fait de LoRa la solution privilégiée pour les réseaux de capteurs IoT déployés sur de grandes surfaces.

I.3.2 - La modulation

La modulation est une étape fondamentale des systèmes de télécommunications, cette dernière est une technique qui consiste à adapter les informations numériques à un signal de transmission afin de permettre leur transmission sur un canal de communication.

Il existe plusieurs types de modulation ASK, PSK, FSK, QAM... chacune présentant des avantages et des domaines d'application spécifiques. Pour le modem LoRa, ce dernier possède sa propre technique de modulation. La **CSS**, autrement intitulé la modulation LoRa ainsi que le **FSK/OOK**, un modèle assez reconnu dans ce système. La modulation Chirp Spread Spectrum revient donc [6].

I.3.2.1 – La modulation CSS

Le CSS, signifie en français étalement de spectre par chirp. C'est une modulation qui consiste à transmettre ses données par des chirps ; des signaux sinusoïdaux dont la fréquence varie progressivement dans le temps également appelés LFM (Linear Frequency Modulation) [8]. Un chirp est ainsi appelé un gazouillis.

Les équations (1.1)-(1.8) définissent les paramètres fondamentaux de la modulation CSS utilisée par le module LoRa de référence RFM96W. Les variables sont définies comme suit [9]:

SF (Spreading Factor — Facteur d'étalement) : détermine le nombre de chips par symbole. Valeurs : SF7 à SF12. Plus SF est élevé, plus la portée est grande et le débit faible.

B=BW (Bandwidth — Bande passante) : largeur de la bande fréquentielle utilisée. Valeurs typiques : 125, 250 ou 500 KHz.

R_c : le débit de chips qui est égal à la bande passante *B* (chips/s).

PL (Payload Length — Longueur du payload) : nombre d'octets de données utiles dans la trame LoRa.

CR (Coding Rate — Taux de codage) : taux de redondance pour la correction d'erreurs. Valeurs : 4/5, 4/6, 4/7, 4/8.

DE (Data rate Optimization) : vaut 1 si l'optimisation basse fréquence est activée, 0 sinon.

IH (Implicit Header) : vaut 1 en mode header implicite, 0 en mode explicite (défaut).

CRC (Cyclic Redundancy Check) : vaut 1 si le CRC est activé, 0 sinon.

Les équations nécessaires sont [9] :

- Nombre de chips par symbole :

$$N = 2^{SF} \quad (1.1)$$

- Durée d'un symbole :

$$T_s = N/B = 2^{SF}/B \quad (1.2)$$

- Débit symbole (symbol rate) :

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (1.3)$$

- Durée d'un chip:

$$T_C = [1/(B \times 1000)] \times 10^6 \quad (1.4)$$

- Nombre de symboles :

$$N_s = N_{\text{preamble}} + 4.25 + \left(8 + \max \left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16}{4(SF -)} \right\rceil (CR + 4), 0 \right) \right) \quad (1.5)$$

- Temps en air (Time on Air) :

$$ToA = N_s \times T_s \quad (1.6)$$

- Un **UP-Chirp**, une fréquence montante :

$$f_{\min} = -B/2 \quad (1.7)$$

- Un **DOWN-Chirp**, une fréquence descendante :

$$f_{\max} = +B/2 \quad (1.8)$$

Il est à noter que les données (DATA) se retrouvent sécurisées, puisqu'elles sont transmises en symboles codés. On peut constater dans la Figure 1.3 ci-dessous à quoi ressemblent ces up et down chirps.

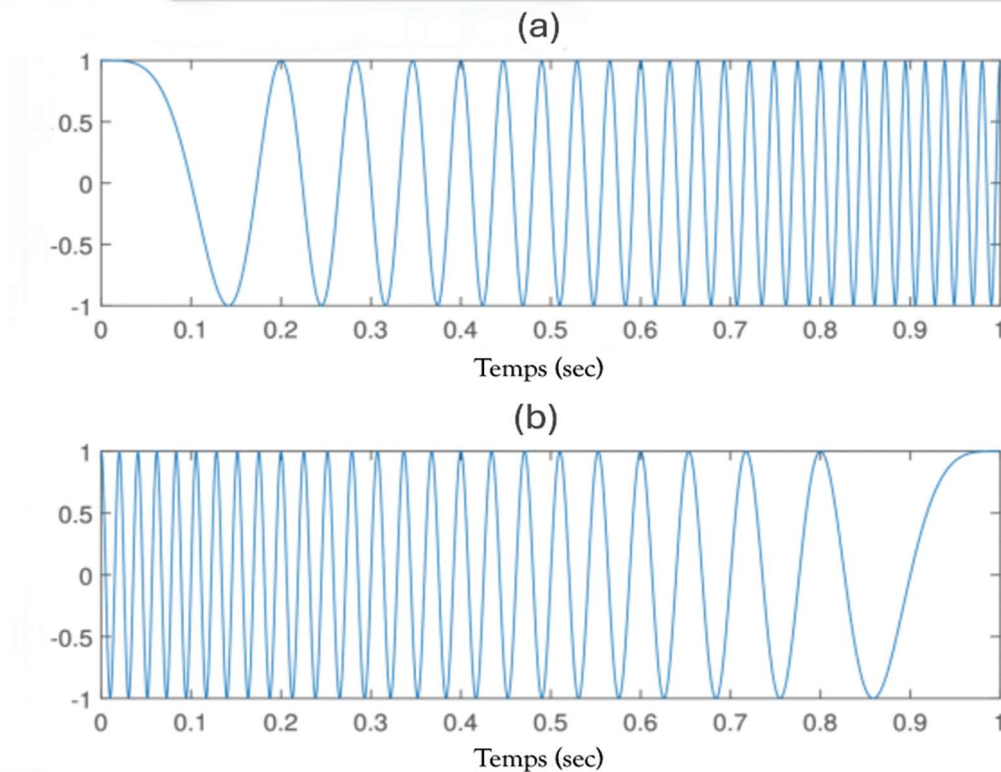


Figure 1.3 : Illustration du domaine temporel de (a) UP-chirp sinusoïdal. (b) DOWN-chirp sinusoïdal [8].

I.3.2.1.1 Le processus de la modulation

La conversion des données en symboles est une première étape à la modulation CSS. En occurrence, chaque symbole aura un distinct nombre de bits.

La deuxième étape est la clé de la modulation. L'émetteur se déclenche, émettant un chirp de référence, qui est généralement un up-chirp balayant la bande passante du système, causant la variance du signal dans le temps, entre une fréquence minimale et une autre maximale.

A la troisième étape de la modulation, vient la partie du codage. L'information est codée en décalant le chirp dans le temps ou dans la fréquence, de telle sorte que chaque symbole correspond à un décalage spécifique du chirp. Ainsi, même si plusieurs signaux occupent la même bande, ils peuvent être distingués grâce à leur position dans le spectre. La distinction des nombres binaires et leur conversion est donc la vraie raison des différentes positions des symboles. Finalement, chaque chirp modulé est ensuite transmis sur le canal radio. Ce signal étalé sur la bande de fréquence deviendra moins sensible aux perturbations localisées. [9]

I.3.2.1.2 Les différents paramètres de la modulation CSS

Comme toute technique de modulation, cette dernière possède plusieurs paramètres qui lui sont propre, ce qui la différencie des autres types de modulations. [10]

I.3.2.1.2.1 Facteur ou taux d'étalement (Spreading Factor)

Le facteur d'étalement SF est un paramètre crucial qui aide à déterminer la durée du chirp et le débit de transmission. Il indique aussi comment les données sont modulées, et à quelle vitesse sont étalées sur la bande passante. Ses valeurs sont indiquées entre SF7 et SF12 tel que SF7 est un facteur d'étalement bas, servant à faciliter la transmission des données grâce au débit rapide qu'il offre, alors que SF12 est un haut facteur d'étalement, permettant d'augmenter la durée du signal transmis, sa portée, et de fournir une meilleure sensibilité.

I.3.2.1.2.2 Largeur de bande (Bandwidth BW)

La largeur de bande, comme son nom l'indique, désigne l'étendue de fréquence utilisé pour la transmission du signal modulé en CSS. Les valeurs sont très basiques, typiquement égales à : 125 KHz, 250 KHz, ou 500 KHz. Une grande valeur de BW nous garantit un débit plus rapide, tandis qu'une petite valeur de BW offre des meilleures portées et sensibilités.

I.3.2.1.2.3 Taux de codage (Coding Rate)

Le taux de codage CR est le rapport entre la quantité d'informations utiles et le volume total de données après encodage. Un taux élevé de correction d'erreurs implique qu'il y'a une communication très fiable. Le codage de canal fonctionne en rajoutant des bits supplémentaires aux données, encore dits bits de redondance, pour que le récepteur puisse corriger certaines erreurs causées par le bruit ou par les interférences.

I.3.2.1.2.4 Temps en air (Time on Air)

Le ToA correspond à la durée totale durant laquelle un module radio est en phase d'émission pour transmettre une trame complète. Sa durée est déterminée par plusieurs paramètres,

dont le facteur d'étalement SF, la largeur de bande BW, le taux de codage CR, la taille du payload, et la longueur du préambule que l'on va découvrir dans les pages à venir.

I.3.2.1.3 Les propriétés du CSS

Grâce à sa technique de modulation qui est assez différente que les autres apprises, le CSS se distingue non-seulement par ses paramètres mais aussi par ses propriétés qui sont incontournables à savoir :

- Une consommation d'énergie modérée, voire très faible comparée aux autres techniques de modulation, ce qui rallonge la durée de vie des appareils à batterie.
- Une résistance aux interférences hors-norme grâce à la technique d'étalement du signal sur la largeur de bande. Offrant une communication idéale même dans un milieu bruité.
- Le CSS émet un signal robuste, compétissant contre des milieux difficiles, que ce soit en pénétrant dans les murs, ou dans un environnement sous-terrestre, voire subaquatique.
- Une largeur de bande assez grande, ce qui permet au CSS de transmettre les informations sur une haute rangée fréquentielle, rendant la bandwidth effective pour assurer une bonne transmission d'informations.
- Les domaines d'applications du CSS sont très diverses, une communication sans-fil, les systèmes de radar, ainsi que dans la médecine et ce, grâce à sa puissance, sa sensibilité, et la faible consommation d'énergie, le rendant idéal pour ce genre d'utilisation.

I.3.2.2 La démodulation des signaux CSS

La démodulation CSS consiste à estimer le décalage circulaire initial d'un chirp reçu pour en déduire le symbole transmis. Le récepteur multiplie le signal reçu par un chirp de référence conjuguée, ce qui transforme tout chirp décalé en un ton pur dont la fréquence est directement proportionnelle au symbole émis. C'est une étape très importante, car le processus de « désétalement » de chirp dans la modulation CSS revêt une primordialité significative car il facilite la récupération des informations transmises. En analysant le signal chirp reçu, ce processus permet d'extraire les données d'origine, ce qui constitue une étape cruciale pour la récupération précise des données, la réduction du bruit et le renforcement de la résilience de la modulation CSS dans divers scénarios réels [11].

Mathématiquement parlant, on obtient le signal CSS désétalé comme suit [6]:

$$d_{s_n}(t) = x_{s_n}(t) \times x_0^*(t) \quad (1.9)$$

Où :

$x_{s_n}(t)$ représente le signal étalé reçu (ou le signal modulé en bande de base) avant l'opération de désétalement.

$x_0^*(t)$: Le conjugué complexe du signal de référence (le chirp local ou la fonction de codage).

L'opération de multiplication entre le signal reçu et le conjugué complexe du chirp de référence permet d'annuler la rampe de fréquence (la modulation de phase) afin de compresser l'énergie et de récupérer le signal d'origine (désétalement ou despreading en anglais).

I.3.2.3 Modulation FSK/OOK

Dans les systèmes de communication sans fil basés sur le circuit SX1276, deux principales techniques de modulation numérique peuvent être utilisées en mode non-LoRa, à savoir la

modulation FSK et la modulation OOK. Ces techniques permettent d'adapter la transmission en fonction des exigences en termes de robustesse, de consommation énergétique, et d'efficacité spectrale [6].

I.3.2.3.1 Modulation FSK

La modulation Frequency Shift Keying (FSK) est une technique de modulation numérique consistant à coder l'information en faisant varier la fréquence de la porteuse. Dans les circuits de type SX1276, cette modulation est réalisée au sein de la bande passante du synthétiseur de fréquence à boucle à verrouillage de phase (PLL).

Plus précisément, la modulation est obtenue par la variation du rapport du diviseur fractionnaire dans la boucle de rétroaction du PLL. L'utilisation d'un modulateur sigma-delta à haute résolution permet d'atteindre une grande précision dans les variations de fréquence, conduisant ainsi à une déviation fréquentielle fine et contrôlée.

La déviation de fréquence (FDEV), paramètre clé de la modulation FSK, correspond à l'écart entre les fréquences utilisées pour représenter deux symboles adjacents. Afin d'assurer un fonctionnement correct du système, cette déviation doit être comprise entre 600 Hz et 200 KHz. Bien qu'aucune contrainte stricte ne soit imposée sur l'indice de modulation du transmetteur, celui-ci doit rester dans une plage permettant une démodulation efficace. [6]

I.3.2.3.2 Modulation OOK

La modulation On-Off Keying (OOK) constitue une forme simplifiée de modulation d'amplitude dans laquelle l'information est transmise par la présence ou l'absence du signal porteur. Dans ce mode, le signal est généré par la commutation de l'amplificateur de puissance (Power Amplifier PA), qui est activé pour transmettre un bit logique '1' et désactivé pour représenter un bit '0'.

Afin d'améliorer les performances du système, notamment en termes de réponse transitoire, des mécanismes de contrôle numérique et de variation progressive (ramping) de la puissance sont mis en œuvre. Ces techniques permettent de limiter les effets indésirables liés aux transitions abruptes du signal [6].

I.3.2.4 Démodulation FSK/OOK

La démodulation FSK consiste à détecter les variations de fréquence du signal afin d'identifier les bits transmis, tandis que la OOK, elle repose sur la détection de la présence ou de l'absence de la porteuse. Ces deux techniques sont largement utilisées dans les systèmes de communication radio numériques grâce à leur simplicité et leur efficacité [6].

I.3.2.4.1 Démodulation FSK

Le démodulateur FSK intégré dans le SX1276 est capable de traiter différents types de modulations, notamment FSK, GFSK, MSK et GMSK. Son fonctionnement repose sur la détection des variations de fréquence du signal reçu afin de reconstituer les données transmises.

Les performances du démodulateur sont optimales lorsque l'indice de modulation est compris entre 0.5 et 10. Dans ces conditions, la détection des symboles est plus fiable et moins sensible au bruit. Le signal démodulé peut ensuite être transmis à un synchroniseur de bits, permettant de générer un flux de données synchronisé, particulièrement utile en mode de réception continue [6].

I.3.2.4.2 Démodulation OOK

Le démodulateur OOK repose sur une méthode de détection d'enveloppe basée sur la comparaison entre la puissance du signal reçu, mesurée par l'indicateur RSSI (Received Signal Strength Indicator), et une valeur seuil prédéfinie.

Lorsque le niveau du signal dépasse ce seuil, un bit logique '1' est détecté ; dans le cas contraire, un bit '0' est interprété. Plusieurs modes de définition du seuil sont disponibles et configurables via les registres internes du circuit.

Parmi ces modes, le mode dit « Peak » est généralement recommandé, car il permet une adaptation dynamique du seuil en fonction des variations du signal reçu, améliorant ainsi la robustesse du système face au bruit et aux interférences [6].

I.3.3 Les protocoles de communication

Dans les télécommunications et les applications de l'Internet des Objets (IoT), la communication entre les différents composants est un élément primordial pour assurer le fonctionnement global de tout système composé de capteurs, microcontrôleurs, modules radio et écrans d'affichage. Ces derniers doivent pouvoir échanger, donc transmettre et recevoir des données de manière fiable, rapide et adaptée aux contraintes de chaque système.

Cet échange d'informations repose sur des protocoles de communication, donc un ensemble de règles définissant la manière dont les données seront transmises entre deux ou plusieurs dispositifs électroniques. Ces protocoles décrivent le format des données échangées, le mode de synchronisation, la vitesse de transmission, ainsi que la gestion des erreurs éventuelles [12].

Il existe plusieurs protocoles de communications, tout protocole a ses propres exigences, telles que la portée de communication, la consommation énergétique, le débit de transmission ou encore la compatibilité matérielle entre les dispositifs [12].

Dans notre système, plusieurs protocoles interviennent à différents niveaux afin d'assurer l'acquisition et la transmission des données issues des capteurs environnementaux. Leurs combinaison et compatibilité permettent de garantir une communication efficace entre les différents composants de l'architecture matérielle et logicielle.

I.3.3.1 UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)

L'UART, récepteur-transmetteur asynchrone universel est un protocole de communication série asynchrone. Il permet l'échange de données entre deux équipements à travers deux lignes principales : TX (Transmission) et RX (Réception) qui sont branchées.

Contrairement aux protocoles synchrones qui nécessitent des signaux horloges, l'UART n'en nécessite aucune, la synchronisation se fait sans signal d'horloge est assurée par un accord préalable sur le débit de transmission ou baud rate en anglais, généralement exprimée en bits par seconde (bit/s). Chaque trame UART comprend : un bit de start, 8 bits de données, et un bit de stop (format 8N1). Les deux équipements doivent simplement être configurés avec le même baud rate.

L'UART n'est pas considéré comme un protocole maître-esclave mais plutôt point à point. Sa communication se fait en série, vu le branchage qu'on vient de mentionner. Grâce à sa simplicité de mise en œuvre et à sa faible complexité, il est très utilisé pour assurer l'échange de données entre deux dispositifs électroniques. [13]

I.3.3.2 SPI (Serial Peripheral Interface)

Le SPI, l'interface périphérique série, est un protocole de communication série synchrone conçu pour permettre l'échange rapide de données entre un microcontrôleur et un périphérique externe. Il repose généralement sur quatre lignes :

- **MOSI** (*Master Out Slave In*) : transmet les données du maître vers l'esclave.
- **MISO** (*Master In Slave Out*) : transmet les données de l'esclave vers le maître.
- **SCK** (*Serial Clock*) : signal d'horloge généré par le maître pour synchroniser les échanges.
- **CS/SS** (*Chip Select/Slave Select*) : sélectionne le périphérique avec lequel le maître souhaite communiquer.

Le microcontrôleur agit généralement comme maître tandis que le périphérique connecté agit comme esclave. Grâce à son débit élevé et à sa faible latence, le SPI est particulièrement adapté aux applications nécessitant des échanges rapides de données. [13,14]

I.3.3.3 Wi-Fi (Wireless Fidelity)

Le Wi-Fi est une technologie de communication sans fil basée sur les normes IEEE 802.11. Elle permet de connecter un équipement à un réseau local ou à Internet via des ondes radio.

Comparé à LoRa, le Wi-Fi offre un débit beaucoup plus élevé, mais une portée plus réduite et une consommation énergétique plus importante. Il est donc davantage adapté aux communications nécessitant un accès réseau rapide ou un envoi fréquent de données vers un serveur. [15]

I.3.3.4 Le 1-WIRE

Le protocole 1-Wire est un protocole de communication série développé par Dallas Semiconductor qui permet l'échange de données entre un maître et un ou plusieurs périphériques à l'aide d'une seule ligne de données, comme son nom l'indique, une seule ligne, en plus de la masse. Il est particulièrement utilisé dans les applications nécessitant un câblage minimal. Chaque périphérique connecté au bus possède une adresse unique de 64 bits, ce qui facilite l'identification et la gestion de plusieurs équipements sur la même ligne de communication.

Le protocole 1-Wire repose sur l'architecture maître-esclave. Le maître initie toujours la communication en envoyant un signal de réinitialisation (Reset), auquel les périphériques répondent par un signal de présence, une impulsion de présence. Les données sont échangées sous forme de séquences temporelles précises représentant les bits logiques. [13]

I.3.3.5 LoRaWAN

LoRaWAN est un protocole de communication sans fil standardisé par la LoRa Alliance, définissant la couche MAC au-dessus de la couche physique LoRa. Une couche MAC implique forcément une topologie, ce réseau utilise la topologie étoile d'étoiles dans laquelle les nœuds transmettent leurs données aux passerelles, qui les acheminent via Internet vers un serveur réseau central. Ce dernier analyse les données, filtre les doublons et transmet les données au serveur d'application, et donc à l'écran. La sécurité est assurée par un chiffrement militaire AES-128 bout en bout. [15,16]

I.4 Les composants hardware du LoRa

Afin de bien comprendre le fonctionnement du modem, il nous est indispensable de connaître les éléments importants de sa composition. Chaque objet IoT contribue pleinement au bon déroulement et utilisation de ce module.

I.4.1 Les nœuds

Aussi appelés end devices en anglais. Ce sont plusieurs objets connectés, garantissant le bon acheminement du DATA, et ainsi, ces nœuds sont responsables de la collecte et la transmission des données dans le réseau, un rôle assurément important dans la communication de données. Les nœuds sont généralement des objets IoT qui sont équipés d'un module LoRa.

Un nœud est équipé d'un capteur, un microcontrôleur, un module radio LoRa, une antenne, et bien évidemment d'une source d'énergie [17].

I.4.1.1 Le capteur

Il existe plusieurs types de capteurs, chacun utilisé dans un domaine différent, allant de la température à la géolocalisation. Il permet de suivre et mesurer chaque phénomène, avant de transmettre les données détectées.

Il existe plusieurs types de capteurs dont les capteurs de température, de lumière, de détection de gaz, de détection d'objets dans un petit périmètre.

Les capteurs et les sondes sont utilisés dans tous les environnements connectés. On les utilise dans les projets d'agriculture, smart cities, et smart houses [17].

I.4.1.2 Le microcontrôleur

Malgré l'importance de la tâche exécutée du capteur, le microprocesseur se retrouve comme étant le cerveau du nœud, ses opérations requièrent le DATA collecté par le capteur comme une base. C'est un dispositif électronique, programmable qui contrôle le fonctionnement du système entier.

En recevant les données envoyées par le capteur, le microcontrôleur se permettra donc de traiter les informations après les avoir lus, les préparer soigneusement avant de les envoyer. Il assure également la gestion des différents périphériques connectés et coordonne les échanges de données avec le module LoRa afin de garantir un bon fonctionnement du système. [15].

I.4.1.3 Le module radio LoRa

Ce module est radio-typé. Dans notre projet actuel, on utilise le modèle SX1276. Ce dernier sert à transmettre les données par ondes radio dans l'air libre, ce qui permet la communication sans fil.

Sa méthode de fonctionnement est assez complexe. En recevant les données de la part du microcontrôleur sous formes de bits, il visera alors à les coder et les mettre en paquets, les organisant et corrigeant afin d'éviter toute sorte d'erreur apportée par le canal de propagation.

Puis vient la phase de modulation, grâce à l'utilisation du CSS et sa robustesse, on viendra alors à convertir une énième fois les bits en chirps, comme mentionné précédemment, puis on vient à transmettre le signal radio vers l'antenne. [17]

I.4.1.4 L'antenne

L'antenne est un élément essentiel des systèmes de communication sans fil. Son rôle principal est d'assurer la conversion entre l'énergie électrique et l'énergie électromagnétique, permettant ainsi la propagation des signaux dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques, et inversement lors de la réception.

En émission, l'antenne reçoit un signal électrique provenant de l'émetteur et le transforme en une onde électromagnétique qui se propage dans l'environnement. Cette propagation dépend du type et de la forme de l'antenne et l'espace environnant, car la forme, ainsi que son type influencent sur l'effectivité de l'antenne et sa fiabilité. Certaines directions pouvant être privilégiées en fonction de ses caractéristiques de rayonnement. La puissance fournie par l'émetteur est ainsi convertie et distribuée dans l'espace.

En réception, l'antenne capte les ondes électromagnétiques présentes dans son environnement. Sous l'effet des champs électromagnétiques incidents, des courants électriques sont induits dans l'antenne, permettant de reconstituer le signal initial et de le transmettre au récepteur pour traitement. L'antenne joue donc un rôle d'interface entre le circuit électronique et le milieu de propagation, assurant la transmission et la réception des signaux dans les systèmes de communication sans fil.

L'antenne doit assurer le bon fonctionnement du modem, et de lui permettre d'atteindre les attentes des prérequis standards du fonctionnement de LoRa, qui se manifestent dans : une longue portée, la directivité, et l'acheminement de la transmission et la réception dans un milieu urbain dans lequel il se pourrait avoir des interférences et des atténuations du signal. Les créateurs du module ont trouvé mieux d'associer et trouver une antenne compatible, réunissant les critères imposés [18]. Cette antenne est une antenne hélicoïdale, en anglais dite « Spring antenna », quart d'onde, caractérisée par un rayonnement omnidirectionnel et une polarisation verticale [19].

I.4.1.4.1 L'antenne hélicoïdale

L'antenne hélicoïdale ou l'antenne d'hélice est une antenne souvent utilisée avec les dispositifs LoRa, compatible avec ces derniers. Elle est sous forme d'un petit ressort en métal, hélice, de fréquences variables. L'antenne est omnidirectionnelle, rayonnant dans tous les sens, son gain est faible, allant de 2 de dBi à 5 dBi, avec une portée considérablement plus longue que la moyenne [20].

Une antenne hélicoïdale peut fonctionner selon deux modes de rayonnement principaux : le mode normal et le mode axial [19].

I.4.1.4.2 Les diagrammes de rayonnement

Dans le mode normal, le rayonnement est principalement dirigé perpendiculairement à l'axe de l'hélice. L'antenne se comporte alors comme une antenne peu directive, avec une émission qui se répartit surtout sur les côtés. Ce mode est caractérisé par un gain faible et une polarisation généralement instable ou elliptique, ce qui le rend peu adapté aux applications de télécommunications modernes.

À l'inverse, le mode axial correspond au mode de fonctionnement le plus utilisé. Dans ce cas, le rayonnement est concentré dans la direction de l'axe de l'hélice. L'antenne produit alors un faisceau directionnel, avec une polarisation circulaire stable. Ce mode offre un gain plus élevé et

une meilleure efficacité pour les communications longue distance, notamment dans les systèmes satellitaires, GPS ou IoT comme LoRa [19].



Figure 1.4: Diagramme de rayonnement polaire 2D [19].

Le diagramme de rayonnement polaire de la Figure 1.4 montre comment l'antenne rayonne dans différentes directions. Les lobes bleus représentent le mode normal démontrant le rayonnement omnidirectionnel. Tandis que le lobe vert démontre le mode axial. On peut remarquer la directivité, le positionnement et la polarisation verticale de l'hélice, tandis que les autres lobes bleus, ce sont des rayonnements omnidirectionnels.

Pour mieux comprendre le rayonnement de l'antenne, nous joignons des images illustratives en 3D, nous permettant de découvrir le rayonnement des deux modes séparément, comme illustré dans les Figures 1.5 et 1.6.

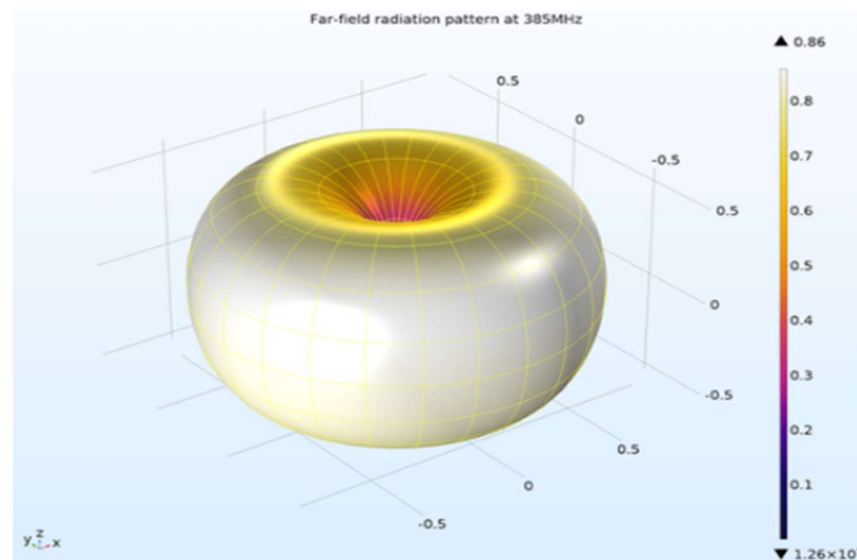


Figure 1.5 : Diagramme de rayonnement 3D du mode normal, forme de donut/tore [19].

Comme on peut le remarquer sur la Figure 1.5, les ondes sont circulaires, rayonnant à 360°, omnidirectionnelles sur le plan horizontal, indiquant donc le mode normal entourant circulairement l'axe vertical de l'hélice.

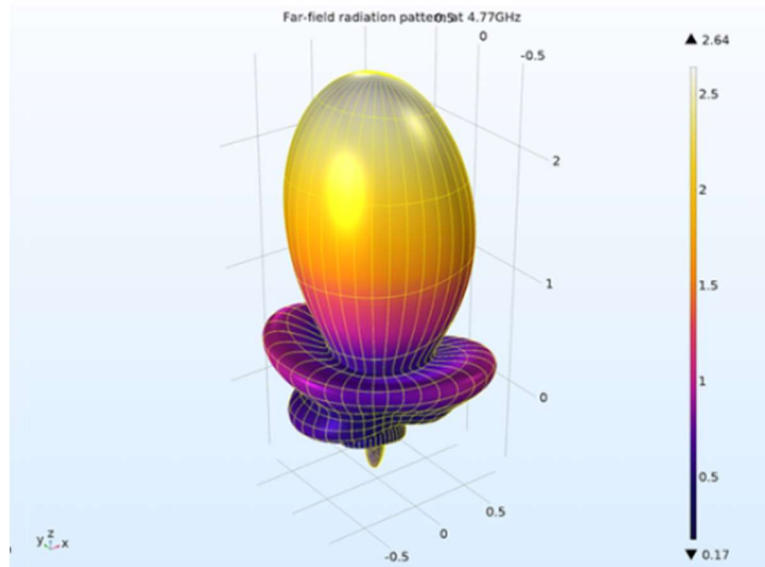


Figure 1.6 : Le diagramme de rayonnement 3D du mode axial [19].

Dans la Figure 1.6, on peut constater que la forme de rayonnement est celle d'un projecteur, ou d'un faisceau, se dirigeant perpendiculairement tout droit. Les ondes se projettent donc en avant. Le rayonnement en mode axial est directionnel. Son axe permet à l'antenne de faire une très longue distance, ou une communication satellitaire. On constate par ailleurs que le rayonnement dans ce mode suit strictement la forme d'hélice de l'antenne hélicoïdale, donc verticalement.

I.4.1.4.3 Les applications de l'antenne hélicoïdale dans différents secteurs

Dans des systèmes nécessitant une polarisation circulaire et un gain modéré sous un faible encombrement, l'antenne hélicoïdale est privilégiée.

En radionavigation, les récepteurs GNSS/GPS professionnels (aviation, marine, drones) utilisent des hélices quadrifilaires pour améliorer la réjection des multi-trajets et garantir une réception homogène quelle que soit l'orientation de l'antenne, ainsi que la détection facile des différents objectifs [21].

Dans les télécommunications terrestres et mobiles, les ponts Wi-Fi en bandes 2,4 GHz et 5,8 GHz ainsi que les liaisons vidéo de drones emploient des antennes hélicoïdales pour réduire les pertes de lien dues aux réflexions et aux changements d'orientation [21].

Toujours dans le même domaine, une autre utilisation de l'antenne hélicoïdale qui sert à équiper certains terminaux mobiles satellitaires (téléphones satellite, terminaux) où l'orientation de l'appareil par rapport au satellite n'est pas maîtrisée. Sa polarisation circulaire garantit une liaison stable quel que soit l'angle de tenue du terminal. Elle est également utilisée dans les relais omnidirectionnels à gain modéré pour les réseaux privés [22].

En agriculture, les agriculteurs utilisent la technologie LoRa pour surveiller l'état des cultures, l'état des équipements, et les conditions environnementales [18].

I.4.1.5 Une source d'énergie

Ce sont à la base des sources conçues pour une utilisation à long-terme. On utilise généralement des batteries ou des panneaux-solaires. Après avoir traité les informations et les avoir convertis à un signal radio, les capteurs devront communiquer avec les passerelles [17].

I.4.1.6 Les passerelles

En anglais, ces derniers sont appelés « gateways ». La passerelle décrit un point de relais entre deux mondes ou un pont réunissant deux choses totalement différentes, permettant de connecter dans notre cas le modem LoRa au réseau LoRaWAN.

Dans le cas de LoRa, une passerelle sert à recevoir les signaux radio, les réceptionner via la bande ISM, puis il y aura un processus qui les transforme en données numériques avant d'être envoyés à des dispositifs compatibles avec ces données. L'utilisation des logiciels précédemment mentionnée est obligatoire, mais on découvrira cette fois-ci une énième facette, l'utilisation des protocoles TCP/IP, ce qui nous permettra de voir le LoRa d'une différente perspective [23].

Brièvement, la passerelle entre les capteurs déployés sur l'environnement et le serveur réseau a pour rôle de transformer les signaux radio longue portée en paquets IP exploitables. Son architecture repose sur plusieurs sous-systèmes complémentaires, chacun jouant un rôle précis dans le processus de communication [4,16].

I.4.1.6.1 Les composants d'une passerelle

Les composantes d'une passerelle incluent : le module radio LoRa, un microcontrôleur ou un processeur, des antennes, une interface réseau, et une source d'énergie [23].

I.4.1.6.1.1 L'antenne

L'antenne réceptionnera le signal électromagnétique émis par les nœuds, et le transforme en signal électrique.

I.4.1.6.1.2 Le processeur de bande de base

Ce module est responsable de la communication sans-fil, tout en utilisant le CSS, son rôle se reposera sur trois étapes [23] :

- Première étape : Réception du signal électrique émis par l'antenne, puis démodulation par CSS. Le module pourrait recevoir de multiples signaux en même temps sans interférence, une technologie intitulée multi-chirp.
- Deuxième étape : Démodulation des chirps et vérification des paquets pour en parvenir à détecter les erreurs, ainsi que la transformation des chirps reçus en données numériques appréhensives par le microcontrôleur en reconstruisant les bits numériques.
- Troisième étape : Après la vérification des erreurs de transmission, les paquets seront transmis au processeur.

I.4.1.6.1.3 La CPU

L'unité centrale de traitement, autrement appelé le processeur, est assez identique au microcontrôleur, agissant tel un cerveau de la passerelle, en assimilant les tâches ou encore en exécutant certaines instructions. Dans ce cas-là, le processeur traite les signaux reçus avant de les envoyer au serveur qui suit.

Plus concrètement, le fonctionnement se fera en plusieurs étapes :

Les informations reçues de la part du module sont transmises via SPI. Le rôle du processeur sera d'identifier le nœud émetteur et vérifier encore une fois les paquets reçus.

On viendra ensuite à traiter les données en les filtrant, ou en vérifiant les imperfections s'il y'en a. Par la suite, une majeure étape s'introduira subtilement mais elle reste la plus importante : la sécurité des données, le chiffrement et l'authentification du serveur LoRaWAN.

Ensuite, vient l'encapsulation des données, pour les mettre dans des paquets, c'est donc par cette étape qu'on utilisera les protocoles TCP/IP, HTTP ou MQTT. Le processeur se chargera du timing d'envoi des paquets et leur type [23].

I.4.1.6.1.4 Le module de liaison

Un module de liaison/ Backhaul est considérée comme étant le canal de communication entre la passerelle et le serveur réseau LoRa. Il permet la connexion de la passerelle à l'Internet. Il existe plusieurs types de liaisons : Ethernet, 3G/4G/5G, et le Wi-Fi.

En utilisant le logiciel du packet forwarder, les données encapsulées en paquets seront transmises et dirigées au serveur réseau LoRaWAN [23].

I.4.1.6.1.5 L'alimentation :

L'alimentation ou une source d'énergie servira à fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du dispositif. Il existe plusieurs types et sources d'énergie, solaire, alimentation secteur ou batterie.

I.5 Le réseau LoRaWAN

Un dispositif LoRa peut envoyer ses informations à de très longues distances non-grâce à ses composants cités récemment, mais surtout car un modem a besoin d'un réseau. Le LoRaWAN, de ses acronymes « LoRa Wide Area Network ». C'est une sorte de réseau étendu, accentuant le fait que la technologie LoRa est à longue portée.

Cette technologie est un protocole de communication sans-fils. Elle est aussi appelée LPWAN « Low Power Wide Area Network » donc à faible consommation d'énergie. Le LoRaWAN permettra de connecter les capteurs et les dispositifs électroniques à l'Internet [10].

Dans le contexte de l'agriculture de précision, il se pourrait que des données concernant l'humidité d'un environnement se transmettent, et comme ce dernier est connecté aux objets IoT, et il permet d'afficher les données aux utilisateurs, d'un simple clic, l'irrigation pourrait-être activée [24].

Entre transmission du signal radio fréquentiel aux passerelles qui agissent comme un portail entre le monde fréquentiel et celui numérique, les informations seront donc collectées et affichées sur les écrans. Le IP Network, donc le serveur IP réseau qui débute à la passerelle ce qui démontre l'importance de la tâche de la passerelle qui se centralise autour de la conversion du signal émis par les capteurs, en données binaires encapsulées. Une fois fait, les serveurs réseaux nous permettent d'accéder aux données via le réseau IP. [25]

De ce fait, c'est ainsi qu'on reconnaît la topologie « étoile d'étoiles » utilisées dans les serveurs LoRa (Figure 1.7). Une topologie qui permet que les nœuds communiquent seulement avec les passerelles et non-directement avec tous les composants pour éviter les interférences. Les passerelles sont tous connectés au serveur réseau central. En envoyant les données encapsulées via des paquets UDP/IP. Donc, nous allons déployer plusieurs nœuds émetteurs, munis de modems LoRa, d'antenne et de capteurs, tous enverront des données aux serveurs réseaux, par la suite ces données seront affichées aux serveurs d'applications [26].

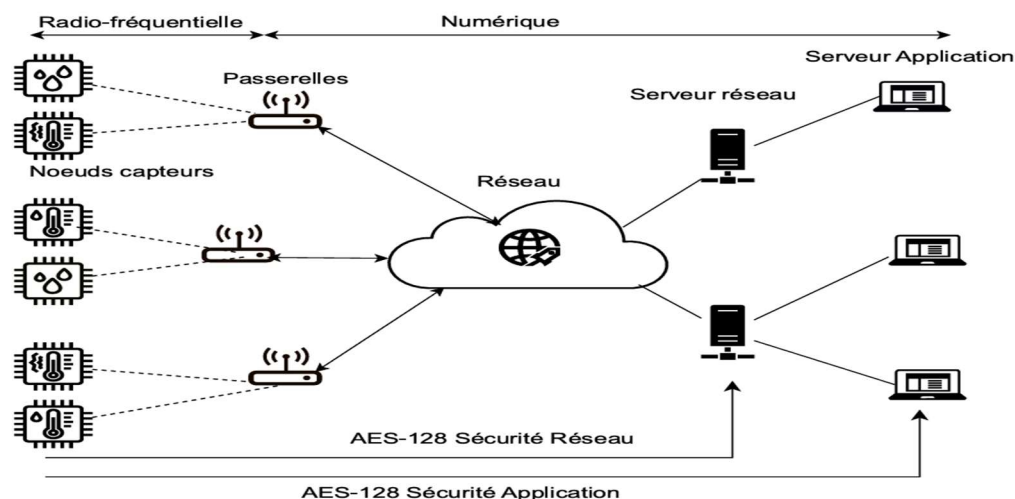


Figure 1.7 : Schéma démontrant la topologie et l'architecture d'un réseau LoRaWAN.

I.5.3 Couches OSI – LoRa

Factuellement, en suivant l'ordre des couches affichées sur la Figure 1.8, LoRa est considéré comme étant une couche physique. Cette dernière est responsable de la modulation ainsi que de la démodulation des paquets UPLink et DOWNLink et s'occupe de leur transmission au serveur respectif, et est composée de la bande passante, ainsi que la bande ISM.

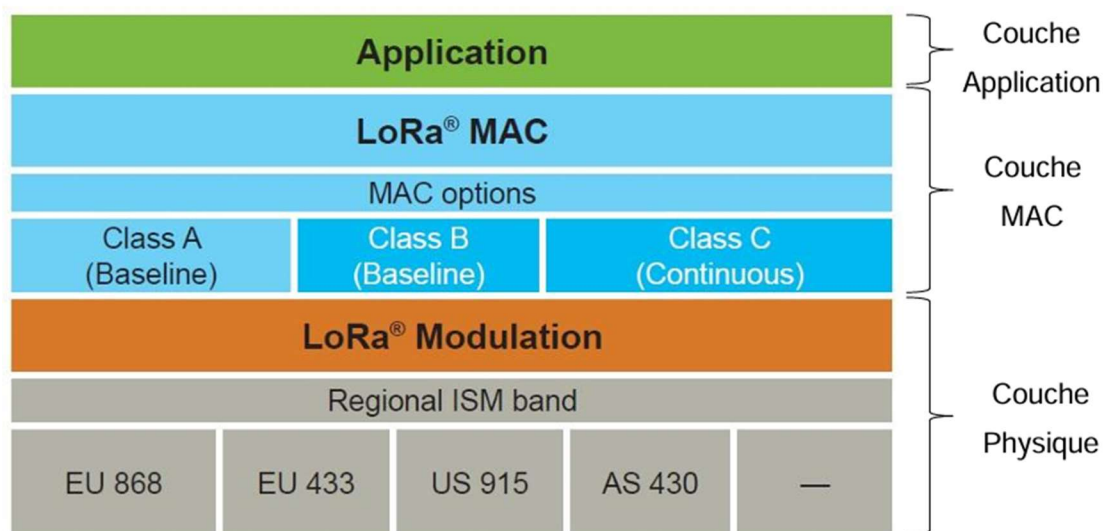


Figure 1.8 : Couches composantes du LoRa [25].

LoRaWAN représente la couche MAC « Medium Access Control ». C'est une open source protocole standardisée par LoRaALLIANCE ce qui signifie que le protocole suit des règles prédéfinies par cette dernière.

La couche MAC LoRaWAN autrement appelée data-link layer, est une très fine couche, placée sur la couche PHYsique LoRa. Elle fournit un mécanisme qui permet la communication entre plusieurs dispositifs et les gateways, ainsi que les réseaux. Elle contrôle comment les dispositifs dans un réseau accèdent et utilisent seulement les ressources du même réseau. Une

couche MAC est efficace pour la communication des paquets de data encapsules de la part/aux interfaces réseaux.

Il existe trois types de classes dans la couche MAC. Chacune est distinguée par ses propriétés, allant du A, B à la classe C. [25]

I.5.3.1 Classe A :

Pour permettre la communication bidirectionnelle, chaque transmission en Uplink est suivie de deux transmissions en Downlink courtes avec :

- **Uplink** : Le noeud envoie des données à la passerelle à n'importe quel moment.
- **Downlink** : Le serveur envoie des données après le Uplink, le noeud ouvre deux fenêtres de réception.

Le chronogramme de la Figure 1.9 démontre plusieurs paramètres. Commenant par la transmission montante donc un Uplink (UL). Ensuite, après un court délai le temps que ça se reçoit, deux fenêtres s'ouvrent RX1 et RX2. Ces dernières sont ouvertes par le périphérique finale afin de recevoir une transmission en liaison descendante Downlink (DL) de la passerelle. Dans le DL, la première fenêtre de réception RX1 utilise la même fréquence et le même débit de données que UL. Tandis que pour RX2, LoRaWAN utilise un paramètre fixe qui peut être pré-configuré. Le paramètre RX2 par défaut utilise la fréquence 923.3 MHz, avec SF12 et une bande passante de 500 kHz [25].

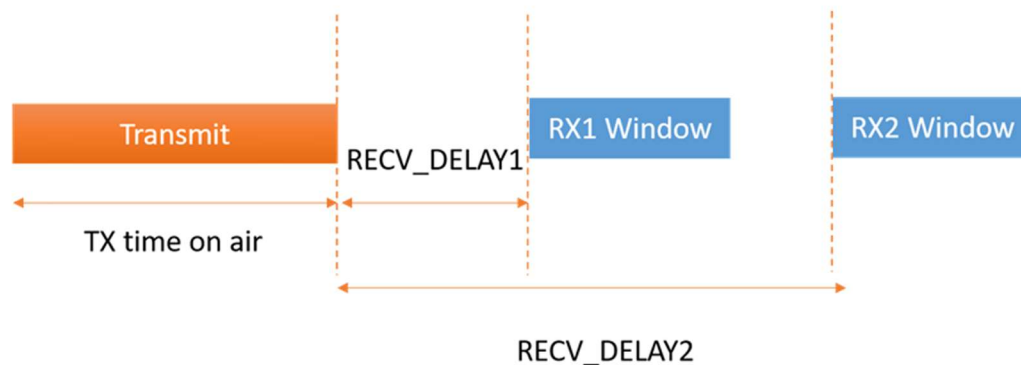


Figure 1.9: La chronologie de la classe A [25].

I.5.3.2 Classe B

En addition aux options et les techniques récemment mentionnées de la classe A, cette classe permet aux dispositifs d'ouvrir quelques nouvelles fenêtres de réception programmables en plus des fenêtres aléatoires.

Les passerelles transmettent des balises (Beacons) en Downlink, ce qui permet aux nœuds et les passerelles d'être synchronisés (Figure 1.10). Beacon est un signal ou un message de référence, envoyé à des temps réguliers qui sont d'ailleurs synchronisés, de la part des passerelles, ce qui permet d'indiquer l'heure et la synchronisation du réseau. En termes d'énergie, la classe B consomme plus d'énergie qu'un dispositif classe A. [25]

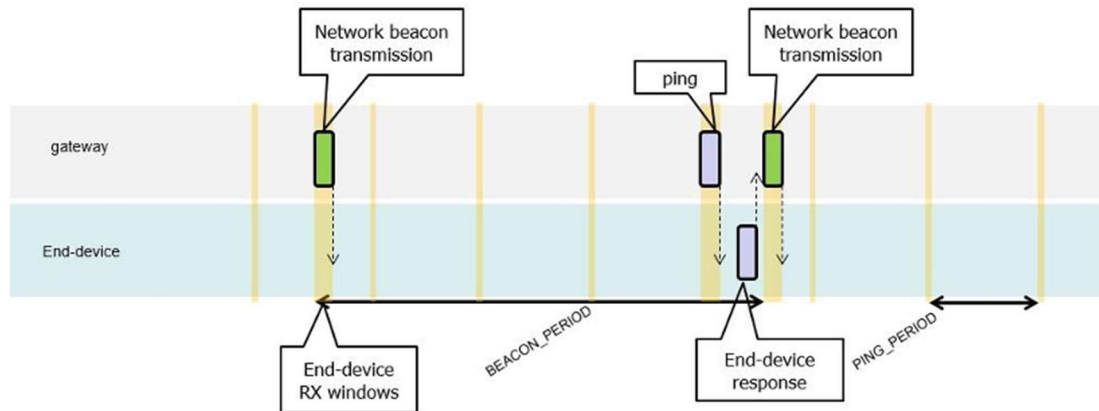


Figure 1.10 : La synchronisation des beacons dans la classe B [25].

I.5.3.3 Classe C

Comme illustré dans la Figure 1.11, les fenêtres de réception s'ouvrent de façon simultanée, disponibles pour la réception de messages, après la transmission UL, une fenêtre de réception RX2 s'ouvre, avant celle du RX1. En cas de non-transmission, les fenêtres et les appareils resteront opérationnels, en écoute permanente. Ce mode est réservé aux appareils qui disposent une alimentation électrique suffisante et qui n'ont pas de contrainte d'énergie [25].

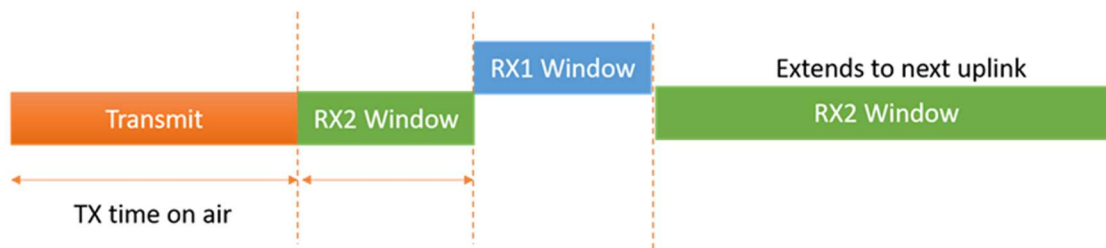


Figure 1.11 : La chronologie de la classe C [25].

I.5.3.4 La consommation d'énergie des différentes classes

Dans notre système, tous les éléments utilisés sont des composants à longue durabilité, la faible consommation d'énergie est primordiale, priorisant la durabilité et fidélité de chaque système déployé. La consommation d'énergie dépend de plusieurs facteurs, notamment le courant (Ampère).

A partir de la Figure 1.12, on peut constater le classement de consommation moyenne de courant de chaque classe, débutant par la classe A, représentant la consommation d'énergie inférieure, la classe B suivant cette dernière avec une légère hausse, pour en finir avec la classe C qui représente une consommation d'énergie très élevée [25].

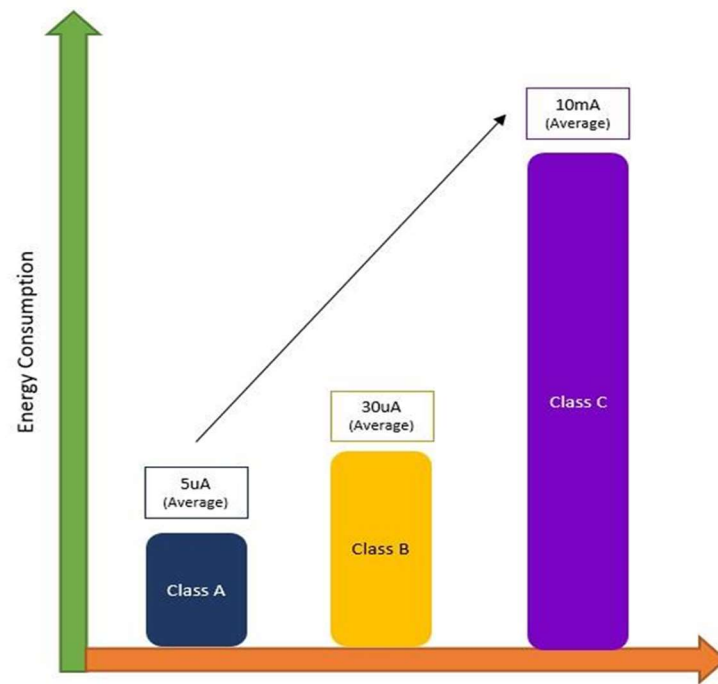


Figure 1.12 : La consommation de courant par classe [25].

I.5.4 La sécurité du réseau LoRaWAN

Le LoRaWAN possède un système de sécurité intégré, des propriétés fondamentales y sont intégrées, les données sont d'ailleurs chiffrées grâce au AES 128-bit, un algorithme de chiffrement cryptographique, ce qui permet de chiffrer et de protéger les informations. Seules les entités autorisées peuvent lire les données et cela est possible car le AES 128-bit impose l'utilisation de clés de sécurité pour chaque appareil.

Le protocole LoRaWAN intègre plusieurs niveaux de sécurité opérant aux couches réseau et applicative. La sécurité au niveau réseau permet de garantir l'authenticité des nœuds au sein de l'infrastructure, tandis que la sécurité au niveau applicatif assure que l'opérateur réseau ne peut en aucun cas accéder aux données applicatives de l'utilisateur final [27].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu découvrir de façon générale les différents composants intérieurs du modem LoRa, leurs caractéristiques, et rôles. La bande ISM qui permet au modèle d'être connecté dans une plage fréquentielle, tandis que le réseau LoRaWAN, les paramètres et les modulations utilisés dans un cadre d'envoi, et acheminement de données. Nous avons aussi revu les protocoles de communication et la topologie permettant à assurer la transmission d'informations dans un cadre cohérent et synchronisé.

Chapitre II

Analyse structurelle du projet réalisé.

II.1 Introduction

L'intégration des technologies modernes est considérée comme une nécessité incontournable, sa précision, ses résultats efficaces et fiables, rendent la technologie un accessoire ultime. L'émergence de l'agriculture de précision, appuyée par les systèmes de télécommunications, les capteurs intelligents et les réseaux de communication sans fil, permet aujourd'hui de collecter, transmettre et analyser des données en temps réel.

La température du sol et de l'air, à l'humidité du sol et de l'air, en passant par le pH, la luminosité, la teneur en nutriments et les conditions climatiques générales. Ces paramètres, essentiels au bon développement de l'agriculture de précision, nécessitent un suivi régulier et précis afin d'optimiser le rendement agricole, ce qui nous est permis via les dispositifs qu'on utilise pour l'agriculture de précision [28].

Dans ce contexte, il devient possible d'automatiser la surveillance des cultures et d'améliorer la prise de décision grâce à des données fiables et continues. L'objectif est alors de moderniser les pratiques agricoles, d'optimiser l'utilisation des ressources, et d'assurer une production durable et efficace.

Face aux exigences croissantes de l'agriculture de précision, qui repose sur la collecte et l'analyse en temps réel de données environnementales afin d'optimiser les rendements et la gestion des ressources, le choix et l'intégration des composants technologiques deviennent des éléments déterminants pour la voie que ce projet prendra.

En effet, la performance d'un système agricole intelligent dépend directement de la qualité des capteurs utilisés, de la fiabilité des modules de communication, ainsi que des caractéristiques des antennes. Une mauvaise sélection ou une mauvaise association de ces composants peut entraîner des pertes de données, une faible portée de transmission ou une consommation énergétique excessive, compromettant ainsi l'efficacité globale du système. La compatibilité des appareils est extrêmement importante, pour un projet réussi.

Ce chapitre est donc consacré à l'analyse structurelle du système de télécommunications construit autour de la technologie LoRa, en concentrant notre attention sur la couche physique qui est responsable de la modulation et de la démodulation des signaux, de la gestion de la bande ISM, ainsi que de la transmission et de la réception des trames de données entre les nœuds capteurs et la passerelle et la couche MAC gérée par le protocole LoRaWAN, elle assure le contrôle d'accès au canal radio, et garantit la communication fiable entre les dispositifs utilisés via les protocoles de communication.

II.2 La conception du projet

Afin de réussir la conception d'un projet dont l'importance réside dans les objets IoT, il faut réunir les dispositifs en question, juxtaposer entre ce qui est hardware et software et assurer la compatibilité de ces deux aspects.

II.2.1 Couche physique

Dans ce chapitre nous allons découvrir précisément les modèles utilisés, et comment s'accordent-ils pour nous permettre d'accéder à un tel système opérationnel et assurer son fonctionnement, en nous projetant dans les détails les plus cruciales.

Les appareils utilisés, leur compatibilité, la façon de leur branchage, les paramètres, la technique de modulation, les protocoles de communication utilisés ainsi que les différents capteurs et leurs paramètres sont tous des incontournables que nous nous devons de préciser.

Plusieurs appareils et modèles ont été testés pour la réalisation de ce prototype visant le bon fonctionnement et compatibilité des appareils, bien que nous ayons déjà une idée à quoi ils peuvent ressembler, mais les présenter est primordial.

II.2.1.1 LoRa H RF96 SX1276

La technologie LoRa (pour rappel signifiant Long Range) est une technique de modulation radio propriétaire créée en 2009 par trois scientifiques français : Nicolas Sornin, Olivier Seller et François Sforza. Ces ingénieurs ont développé cette innovation au sein de leur start-up grenobloise, Cycleo, qui a ensuite été rachetée en 2012 par le fabricant américain de semi-conducteurs Semtech.

Le modem que l'on utilisera dans ce projet est un RF96, basé sur la Semtech SX1276. Ce dernier couvre une plage fréquentielle allant de 820 MHz à 1020 MHz, centré sur 915 MHz. Il intègre sur 16×16 mm le cœur radio SX1276, le cristal de référence, les filtres RF et les circuits d'adaptation d'impédance qui permettent d'optimiser le transfert du signal radio entre le module et l'antenne pour améliorer l'efficacité de la communication. Il constitue ainsi une solution complète et compacte pour les applications IoT longue portée. Il assure tout de même une communication bidirectionnelle, facilitant donc le contrôle d'actionneurs via les messages transmis en liaison descendante (downlink) [29].

Le choix de ce module a été une décision prise relativement aux avantages agronomiques, plusieurs aspects jouant un rôle là-dedans, parmi lesquels nous citons :

- Les longueurs d'ondes importantes disponibles sont capables de pénétrer des obstacles physiques importants, ce qui est extrêmement utile dans un milieu urbain.
- Un canal à 915 MHz nous évite un encombrement de signaux, donc on dispose d'un canal propre, dont les interférences sont minimales [5,6].

La sensibilité de réception atteint facilement -140dBm ce qui valorise fortement la modulation LoRa/CSS car le module pourrait extraire des signaux de bruits de fond. Une puissance d'émission équivalente à +20 dBm, le H RF96 offre un lien équivalent de -160 dBm. Le module LoRa H RF96 SX1276 est basé sur le ATmega328P, permettant la programmation via Arduino IDE, et le rendant compatible avec le ESP32 qui utilise aussi la même plate-forme de programmation [29].

II.2.1.1.1 Vue d'ensemble du module LoRa utilisé

Dans la Figure 2.1, nous pouvons constater à quoi ressemble un module LoRa H RF96 SX1276 de fréquence 915 MHz, où se trouvent les différents points de PIN, les ports DIO, les emplacements des capteurs IIC I et II, ainsi que l'antenne de transmission.

II.2.1.1.2 L'architecture du LoRa et son fonctionnement

L'architecture interne du modem LoRa repose sur une chaîne de traitement hybride, optimisée pour la basse consommation et les communications longue portée. En réception, le signal capté par l'antenne est amplifié par un amplificateur à faible bruit (Low Noise Amplifier LNA) afin d'en améliorer l'amplitude tout en limitant les dégradations liées au bruit.

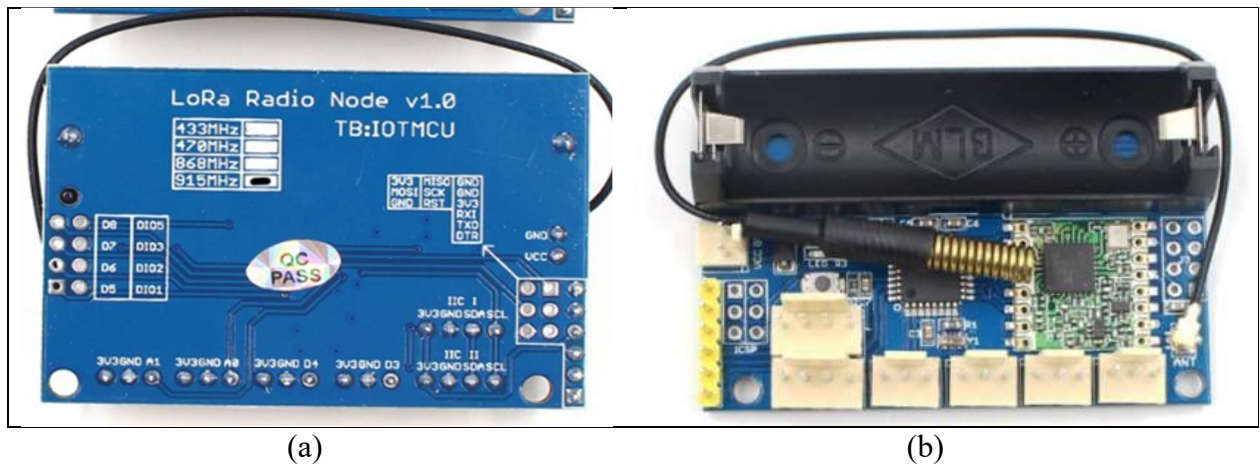


Figure 2.1: Le modem LoRa RF96 SX1276. (a) Vue arrière, (b) Vue de face. [29]

En émission, un amplificateur de puissance élevée le niveau du signal afin d'augmenter la portée de transmission. La boucle à verrouillage de phase PLL assure la génération d'une fréquence porteuse stable, tandis que le mélangeur (MIX) réalise la conversion de fréquence entre la bande radio et la bande de base. Le signal est ensuite décomposé en composantes analogiques I (In-phase) et Q (Quadrature), une étape essentielle pour préserver les informations de phase avant leur numérisation par les convertisseurs analogique-numérique (ADC).

Le traitement numérique constitue le cœur du système, assurant les fonctions de modulation et de démodulation des données. En plus de la modulation LoRa basée sur le Chirp Spread Spectrum (CSS), le transceiver prend en charge les modulations FSK, adaptées à des débits plus élevés, ainsi que OOK, utilisée pour assurer la compatibilité avec certains systèmes existants. Le pilotage du module s'effectue via une interface SPI, permettant la configuration des registres internes, notamment le facteur d'étalement (SF) et la bande passante. Une mémoire tampon de type FIFO assure le stockage temporaire des données, garantissant ainsi un échange fiable entre la partie radio et le microcontrôleur. Enfin, une gestion optimisée de l'alimentation, associée à des sources d'horloge précises (oscillateur à quartz ou RC), permet d'assurer une faible consommation énergétique et une autonomie prolongée, ce qui fait de ce transceiver un élément central des systèmes IoT [6].

II.2.1.2 L'antenne

Parmi les composants que l'on peut côtoyer durant ce projet, est bien l'antenne reliée au dispositif LoRa comme on l'a vu plus haut, branchée dans son port, cette dernière est créée pour toute plage fréquentielle différente. Dans ce système, nous avons utilisé une antenne compatible au dispositif LoRa H RF96, à la fréquence configurée à 915MHz du module.

Afin de viser le choix optimal, plusieurs critères ont été cités et exigés, visant l'excellence dans l'envoi des données. Allant d'un diagramme de rayonnement à une puissance de transmission, et elles ont toutes été respectées.

Nous avons opté pour une spring antenna, en français, une antenne hélicoïdale comme celle présentée dans la Figure 2.2. Cette dernière est un fin ressort en cuivre, d'une forme spirale, branchée d'un câble IPEX [19].

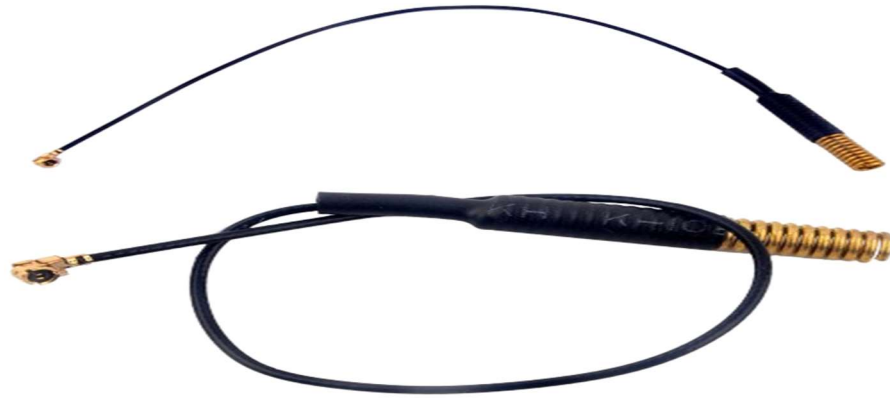


Figure 2.2: L'antenne hélicoïdale H KH-102 [30].

L'antenne est branchée au PIN ANT, la longueur de l'antenne est aux alentours de 8.2 cm, équipée à un connecteur IPEX sous référence H KH-102 qui relie l'hélice au port du LoRa via un câble d'extension. C'est une antenne produite par un manufacturer chinois, juxtaposant entre optimalité et haute performance, inventant une antenne qui nous est utile, conçue pour le module LoRa spécifiquement.

C'est une antenne qui fait preuve de robustesse, elle a une longue portée, et un gain qui lui permet d'éviter les interférences, surtout dans une telle plage de fréquence qui est assez élevée. En contrepartie, son gain de 3dBi et son efficacité sont légèrement inférieures aux antennes dipôle demi-onde ou quelconques types d'antennes [30].

Une antenne hélicoïdale à ressort est une antenne chargée inductivement, l'hélice déposée sur un axe vertical, son rayonnement du mode axial suivant donc l'axe d'hélice (Figure 1.5), tandis que son rayonnement du mode normal est omnidirectionnel, sous forme de tore (Figure 1.6). L'enroulement hélicoïdal du fil conducteur crée une inductance distribuée qui allonge électriquement l'antenne sans pour autant augmenter la longueur physique ce qui permet de comprimer cette longueur à quelques centimètres, la rendant compacte et adaptée aux capteurs.

Plus littéralement, l'antenne se comporte électriquement comme une antenne quart-d'onde ($\lambda/4$) à 915 MHz [19], dont la longueur physique théorique serait de 8.2 cm, comme on peut l'apercevoir via les calculs suivants :

- ✓ La longueur quarte d'onde de l'antenne : $L(\lambda/4) = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 915 \times 10^6} = \frac{300}{3660} \approx$
0,082 m (soit 8,2 cm)
- ✓ Le diamètre de l'antenne se calcule comme suit : $D \approx \frac{\lambda}{\pi}$
- ✓ La longueur d'onde : $\lambda = \frac{300}{915} \approx 0,328$ mètres $\rightarrow$ **32,8 cm**

II.2.1.3 Capteurs environnementaux

Les end-devices sont des dispositifs qui sont considérés comme les points de départ de notre projet, en cas d'absence de ces derniers, aucune donnée nous sera récupérée afin de procéder aux étapes suivantes.

Le système de surveillance environnemental, veillant à récupérer les données correctes, repose sur deux capteurs complémentaires en un : le DHT22 qui sert à surveiller les conditions air

ambient (température et humidité atmosphériques), permettant d'accéder aux données paramétriques de la parcelle étudiée. Une fois établies, ces données seront affichées sur un écran.

La programmation et la gestion des périphériques sont réalisées à l'aide d'Arduino IDE, permettant une configuration flexible du système ainsi qu'une communication efficace entre les capteurs, l'ESP32 et le module LoRa.

II.2.1.3.1 Le capteur DHT22

Le DHT22 est un capteur numérique développé par Aosong Electronics. Aussi connu sous le nom AM302, ses composants sont intégrés d'une thermistance NTC pour la température et un capteur capacitif pour l'humidité. Grâce au convertisseur analogique-numérique intégré dans le capteur, la sortie est entièrement numérique simplifiant son interfaçage avec l'ESP32 via une seule broche GPIO. Il est utilisé dans les systèmes embarqués et les applications IoT et LoRaWAN pour la surveillance environnementale grâce à sa simplicité d'intégration et sa fiabilité de mesure. Dans notre système, le DHT22 est connecté à la carte ESP32 afin de collecter les données climatiques de l'environnement agricole en temps réel.

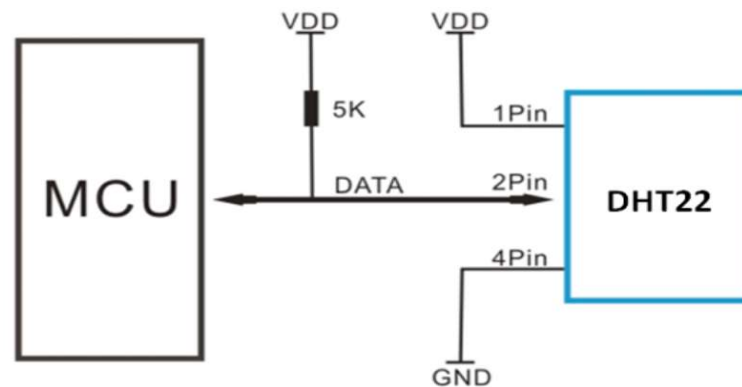


Figure 2.3 : Schéma Electrique du capteur DHT22 [31].

II.2.1.3.2 Le principe de fonctionnement du DHT22

- **Détection** : le capteur mesure l'humidité et la thermistance NTC mesure la température.
- **Conversion** : les signaux analogiques sont convertis en numérique
- **Traitement** : le MCU 8 bits intégré applique les coefficients de calibration stockés en usine pour calculer les valeurs finales
- **Transmission** : les données sont envoyées en série via la DATA vers le MCU hôte.
- **Format de la trame** : 40 bits au total comportant 16 bits d'humidité + 16 bits de température + 8 bits de checksum (contrôle d'erreur). [31]

II.2.1.4 Le microcontrôleur ESP32

L'ESP32 est un microcontrôleur développé par la société Espressif Systems, largement utilisé dans les systèmes embarqués et les applications de l'IoT. Il intègre des performances supérieures ainsi qu'un ensemble de fonctionnalités de communication avancées, notamment pour sa puissance de calcul, sa faible consommation en mode deep sleep (10 μ A) et la richesse de son environnement de développement (Arduino IDE).

Cerveau de l'opération, il se spécialise dans l'acheminement des données, leurs traitements et transmission. On le branche avec des dispositifs compatibles que nous allons découvrir.

L'ESP32 repose sur une architecture double cœur (Xtensa LX6), permettant l'exécution parallèle de tâches, ce qui améliore considérablement les performances dans les applications multitâches. Il fonctionne généralement à une fréquence allant jusqu'à 240 MHz, avec une mémoire RAM intégrée et une mémoire flash externe selon les modules.

L'une des principales caractéristiques de l'ESP32 réside dans ses capacités de communication intégrées. Il dispose du Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) ainsi que du Bluetooth (Classic et BLE), ce qui en fait une solution adaptée aux systèmes connectés. Il peut interagir avec d'autres modules de communication via des interfaces telles que UART, SPI et I2C.

Enfin, sa grande flexibilité de programmation (Arduino IDE) facilite son intégration, le rendant compatible avec la plupart des logiciels de programmation dans les projets, notamment dans la surveillance environnementale et des réseaux de capteurs sans fil [28].

II.2.1.4.1 L'architecture interne du ESP32

Comme le montre la Figure 2.4, le cœur du système repose sur une architecture robuste permettant de gérer simultanément les calculs et la connectivité [32] :

- **Microprocesseurs** : 1 ou 2 processeurs Xtensa® 32-bit LX6.
- **Mémoire Interne** : Comprend de la mémoire morte (ROM) et de la mémoire vive statique (SRAM).
- **Flash Intégrée** : Une mémoire flash embarquée reliée via SPI pour le stockage du micrologiciel.
- **Connectivité Sans Fil (RF)** : Le module intègre un sous-système radio complet pour le Wi-Fi et le Bluetooth :
 - ✓ **Wi-Fi** : Géré par un contrôleur MAC Wi-Fi et une bande de base (baseband) dédiée.
 - ✓ **Bluetooth** : Un contrôleur de liaison (link controller) et bande de base Bluetooth.
 - ✓ **Étage Radio (RF)** : Inclut des modules de réception et transmission (receive) et de transmission (transmit), un générateur d'horloge, ainsi qu'un commutateur (Switch) et un Balun pour l'adaptation d'antenne.
- **Périphériques et Interfaces** : Le module a une connectivité étendue pour interagir avec des capteurs et d'autres circuits :
 - ✓ Interfaces de Communication: SPI, I2C, I2S, UART, CAN (Controller Area Network), et ETH (Ethernet).
 - ✓ Entrées/Sorties Analogiques : Convertisseurs Analogique-Numérique (ADC) et Numérique-Analogique (DAC).
 - ✓ Capteurs et Signaux : Support pour capteurs tactiles (Touch sensor), PWM (pour le contrôle de moteurs ou LED), infrarouge (IR), et SDIO.
- **Sécurité et Gestion de l'Énergie** : Le matériel est optimisé pour la sécurité des données et une consommation minimale.
- **Accélération Cryptographique** : Prise en charge matérielle des algorithmes SHA, RSA, AES, et un générateur de nombres aléatoires (RNG).
- **Sous-système RTC (Real-Time Clock)**:
 - ✓ PMU : Unité de gestion de l'alimentation.
 - ✓ Coprocesseur ULP : Processeur ultra-basse consommation qui fonctionne pendant que les cœurs principaux sont en veille.

- ✓ **Recovery Memory** : Mémoire de récupération pour maintenir les données critiques pendant les cycles de sommeil.

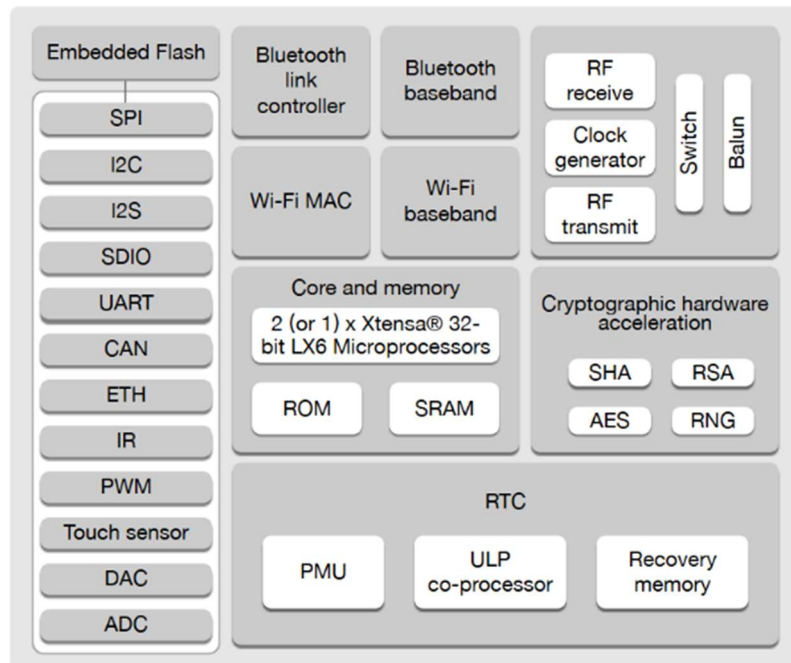


Figure 2.4 : Le bloc de diagramme du ESP32 [33].

II.2.1.4.2 Les propriétés du ESP32

L'ESP32 se distingue par ses performances de calcul, sa faible consommation énergétique et ses interfaces de communication. Les principales propriétés de ce microcontrôleur sont présentées ci-dessous :

- **Double cœur 240 MHz** : gestion simultanée multi-capteurs + multi-communication.
- **Deep sleep à 10 μ A** : autonomie de 12 à 18 mois sur batterie Li-Ion 3000 mAh.
- **3 UART indépendants** : UART2 dédié au RFM96W, UART0 réservé à la console de débogage.
- **OTA (Over-The-Air)** : mises à jour firmware à distance via Wi-Fi.
- **Mémoire** : Généralement équipé de 4 Mo de flash SPI.
- **Périphériques** : Capteurs tactiles capacitifs, capteurs à effet Hall, interface carte SD, Ethernet, SPI haute vitesse, UART, I2C, I2S. [34]

II.2.1.5 La modulation CSS

Le RFM96W utilise la modulation CSS, qui est pour rappel un étalement de spectre par chirp qui est un signal dont la fréquence varie linéairement dans le temps sur toute la largeur de bande disponible. Un up-chirp voit sa fréquence augmenter de $f_{\min}$ vers $f_{\max}$, tandis qu'un down-chirp fait l'inverse (voir Figure 1.3). Les données sont encodées en décalant temporellement ces chirps : chaque position de décalage correspond à un symbole unique [14]

$$\text{Up-chirp : } f(t) = f_{\min} + (BW/T) \times t \quad (2.1)$$

$$\text{Down-chirp : } f(t) = f_{\max} - (BW/T) \times t \quad (2.2)$$

II.2.1.5.1 Les avantages de la modulation CSS dans le domaine d'agriculture

Le CSS confère à LoRa des propriétés particulièrement adaptées aux environnements agricoles difficiles, c'est pourquoi on l'utilise dans ce projet. Ses propriétés sont donc :

- **Résistance aux interférences** : le signal étalé sur toute la bande passante est insensible aux interférences localisées (moteurs agricoles, équipements électriques).
- **Robustesse en milieu bruyé** : le récepteur peut décoder un signal jusqu'à -20 dB sous le niveau du bruit ambiant grâce à la corrélation des chirps.
- **Faible consommation** : la modulation CSS ne nécessite pas d'amplification linéaire coûteuse en énergie. L'unité de transmission RF du module peut envoyer des données avec une puissance RF minimale, prolongeant la durée de vie de la batterie au champ.
- **Immunité à l'effet Doppler** : les chirps sont résistants aux décalages fréquentiels causés par le mouvement, bon pour les capteurs mobiles (drones, engins agricoles).
- **Sensibilité élevée** : Le récepteur LoRa peut détecter un signal CSS même s'il est plus faible que le bruit de fond thermique ambiant, ce qui permet de couvrir une grande distance et collecter tout de même les données.

II.2.1.5.2 Paramètres CSS du RFM96W

Il existe trois paramètres configurables via commandes qui définissent le comportement du CSS et peuvent être distingués selon le Tableau 2.1 suivant.

Tableau 2.1 : Tableau déterminant les paramètres de la modulation CSS et leurs propriétés [6].

SF	BW (kHz)	Débit (bps)	ToA (ms)	Portée	Usage recommandé
SF7	125	5 470	~72	Courte	Zones urbaines denses, faible distance
SF8	125	3 125	~130	Moyenne	Usage équilibré, villes
SF9	125	1 758	~247	Moyenne	Zones péri-urbaines
SF10	125	976	~453	Longue	Zones rurales
SF11	125	537	~905	Très longue	Capteurs agricoles isolés
SF12	125	293	~1 810	Max	Zones éloignées, couverture maximale

Le facteur d'étalement SF (SF7–SF12) détermine le nombre de chirps par symbole, qui est de 2^{SF} . Une SF élevée entraîne l'amélioration de la portée ainsi que la sensibilité du récepteur, au prix d'une réduction significative du débit, et le rallongement du ToA (Time on Air)

II.2.1.6 Démodulation CSS :

La démodulation s'effectue en multipliant le signal reçu par un down-chirp de référence, transformant chaque chirp décalé en un signal à fréquence constante. Une FFT de taille 2^{SF} identifie ensuite le pic fréquentiel, dont l'indice donne directement la valeur du symbole transmis. Cette opération est réalisée entièrement en interne par le SX1276 du RFM96W [6].

II.3 Couche MAC

II.3.1 Les différents protocoles de communication utilisés

Afin d'assurer une communication entre les différents dispositifs, et pour assurer l'acheminement de données, nous devons découvrir les protocoles de communications, dans ce projet, quatre protocoles de communications sont utilisés, tous différents, chacun opérant dans un environnement différent. Soulignant l'importance de la compatibilité du matériel [12].

Tableau 2.1 : Tableau démontrant les différents protocoles de communications [12].

Composant source	Composant cible	Protocole	Description
DHT22	ESP32	1-Wire	Protocole série asynchrone - 1 fil - température + humidité + checksum (40 bits)
ESP32	Module RFM96W	UART	Liaison série TX/RX- commandes AT-9600 bauds - format 8N1
ESP32	Internet / Dashboard	Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n - publication des données via HTTP ou MQTT
RFM96W (firmware)	SX1276 (interne)	SPI	Liaison interne au module - configuration des registres du chipset SX1276
RFM96W	Gateway LoRa	LoRaWAN	Transmission radio 915 MHz - modulation Chirp Spread Spectrum

II.3.1.1 Le protocole 1-Wire (DHT22)

Le DHT22 communique via un protocole série propriétaire 1-Wire sur une seule broche GPIO. L'ESP32 initie la communication en maintenant la ligne basse pendant ≥ 1 ms (start signal), puis le DHT22 transmet 40 bits de données : 16 bits d'humidité, 16 bits de température et 8 bits de checksum pour la vérification d'intégrité. Ce protocole asynchrone, simple à mettre en œuvre, est adapté aux capteurs à faible débit de données et à courte distance (< 2 m) [13].

II.3.1.2 Le protocole SPI

Le SPI est un protocole de communication série synchrone largement utilisé dans les systèmes embarqués. Il permet des échanges rapides de données entre un microcontrôleur et des périphériques tels que des capteurs, des mémoires, des écrans ou des modules radio. Le SPI repose sur une communication de type maître-esclave dans laquelle le maître contrôle entièrement les échanges. Dans ce projet, ce protocole est utilisé lorsqu'on veut brancher le modem LoRa au ESP32 via les broches MISO, MOSI, SCK et CS [13,14].

II.3.1.3 Le protocole UART (LoRa & ESP32)

UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) assure la liaison entre l'ESP32 et le module LoRa RFM96W. Ce protocole série asynchrone utilise deux fils TX et RX croisés entre les deux composants, transmission-réception, réception-transmission. L'ESP32 envoie des commandes AT au module LoRa pour configurer les paramètres radio et déclencher les

transmissions, sans nécessiter de signal d'horloge partagé. Les autres emplacements de branchages sont donc VCC et GND (alimentation et masse) [13].

II.3.1.4 Le protocole Wi-Fi

Le protocole Wi-Fi est intégré nativement à l'ESP32. Il est utilisé pour rendre les données collectées accessibles à distance, en connectant le nœud à un réseau local via sa passerelle et donc à Internet. Les données peuvent ainsi être publiées vers un serveur ou un écran de visualisation via les protocoles HTTP ou MQTT, permettant à l'utilisateur de les consulter depuis n'importe quel appareil connecté [15].

II.3.1.5 Le protocole LoRaWAN

LoRaWAN (Low Power Wide Area Network) est un protocole de communication sans fil standardisé par la LoRa Alliance, conçu pour assurer la communication entre les nœuds capteurs et le serveur d'application via une infrastructure réseau structurée. Dans notre système, trois objets sont interconnectés : le nœud capteur (ESP32, DHT22, RFM96W) collecte et transmet les données environnementales, la passerelle (ou gateway) assure le passage entre le réseau radio et Internet, et le serveur d'application qui reçoit, stocke et affiche les données à l'utilisateur [15,16].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert en profondeur les dispositifs utilisés, dont le module LoRa H RF96, basée sur le chip Arduino ATmega328P qui y est inclus, la modulation CSS, et l'antenne H KH-102, ainsi que l'ESP32 et le capteur DHT22. On a ainsi découvert, pourquoi utilise-t-on le module LoRa dans un domaine d'agriculture de précision et l'importance de l'envoi rapide et instantané des informations dans ce milieu. Ce système de transmission numérique est fonctionnel grâce aux différents protocoles de communications qu'on utilise, qui établissent un lien compatible entre les composants de ce système.

Chapitre III

Conception du système et tests pratiques

III.1 Introduction

Ce troisième chapitre est consacré à la conception et à la mise en œuvre de notre système de transmission sécurisée. Après avoir présenté les fondements théoriques des réseaux LoRa ainsi que les notions essentielles de la sécurité informatique dans les chapitres précédents, nous passons maintenant à la phase pratique du projet, qui consiste à transformer ces concepts en une solution concrète destinée à l'agriculture de précision.

L'agriculture de précision est une approche de gestion agricole qui utilise les nouvelles technologies pour apporter la bonne dose, au bon endroit et au bon moment. Elle vise à optimiser les rendements et à réduire les coûts tout en limitant l'impact environnemental. [1, 2, 3, 4, 5]

Pour se faire, le système embarqué installé sur le terrain doit d'abord observer son entourage pour Collecter des données précises à l'échelle d'une parcelle (état du sol, météo, santé des cultures). Le choix de capteurs filaires et de leur disposition sur la passerelle est cruciale à cette étape.

Une fois les données acquises et envoyées à un serveur, le système doit analyser ces données pour cartographier les variations et identifier les besoins réels. A la fin, une décision est prise par l'agriculteur et consiste à moduler l'apport d'intrants (eau, engrais, pesticides) mètre carré par mètre carré au lieu d'en appliquer une quantité uniforme.

La conception pratique du système permet de relier la partie théorique aux contraintes réelles du terrain, notamment en termes de consommation énergétique, de portée de communication, et de fiabilité des données. Dans un premier temps, nous présenterons l'architecture globale du système, illustrée par un schéma synoptique détaillé, afin de mettre en évidence les différents blocs fonctionnels ainsi que le rôle de chaque composant dans la chaîne de transmission.

Dans un second temps, nous aborderons le choix des composants matériels utilisés dans ce projet, en particulier les capteurs, le microcontrôleur et les modules de communication LoRa, tout en expliquant les critères techniques qui ont guidé ces choix, tels que la performance, la consommation et la compatibilité.

Enfin, nous terminerons par la partie implémentation, où nous décrirons la programmation du système ainsi que l'intégration des mécanismes de sécurité. Une attention particulière sera accordée à l'utilisation du chiffrement AES, qui permet de sécuriser les données échangées et de garantir leur confidentialité, leur intégrité et leur authenticité lors de la transmission dans la bande ISM.

III.2 Architecture du système proposé

Avant de présenter le schéma synoptique du système, il est important de décrire l'architecture générale de la solution IoT proposée. Le système repose sur une chaîne fonctionnelle complète permettant la collecte, le traitement et la transmission sécurisée des données agricoles en temps réel.

Dans ce cadre, les données environnementales sont captées à l'aide de capteurs dédiés (température, humidité de l'air et humidité du sol), puis envoyées vers une unité de traitement basée sur un microcontrôleur. Ces informations sont ensuite transmises via un réseau de communication longue portée fonctionnant dans la bande ISM, garantissant une couverture étendue et une faible consommation énergétique, ce qui est essentiel pour les applications agricoles.

III.3 Conception et schéma synoptique

Dans cette section, nous présentons la conception globale de notre système à travers un schéma synoptique illustrant les différents blocs fonctionnels et leurs interconnexions.

III.3.1 Schéma synoptique global

Le schéma synoptique du système IoT conçu basé sur la technologie LoRa est illustré dans la Figure 3.1.

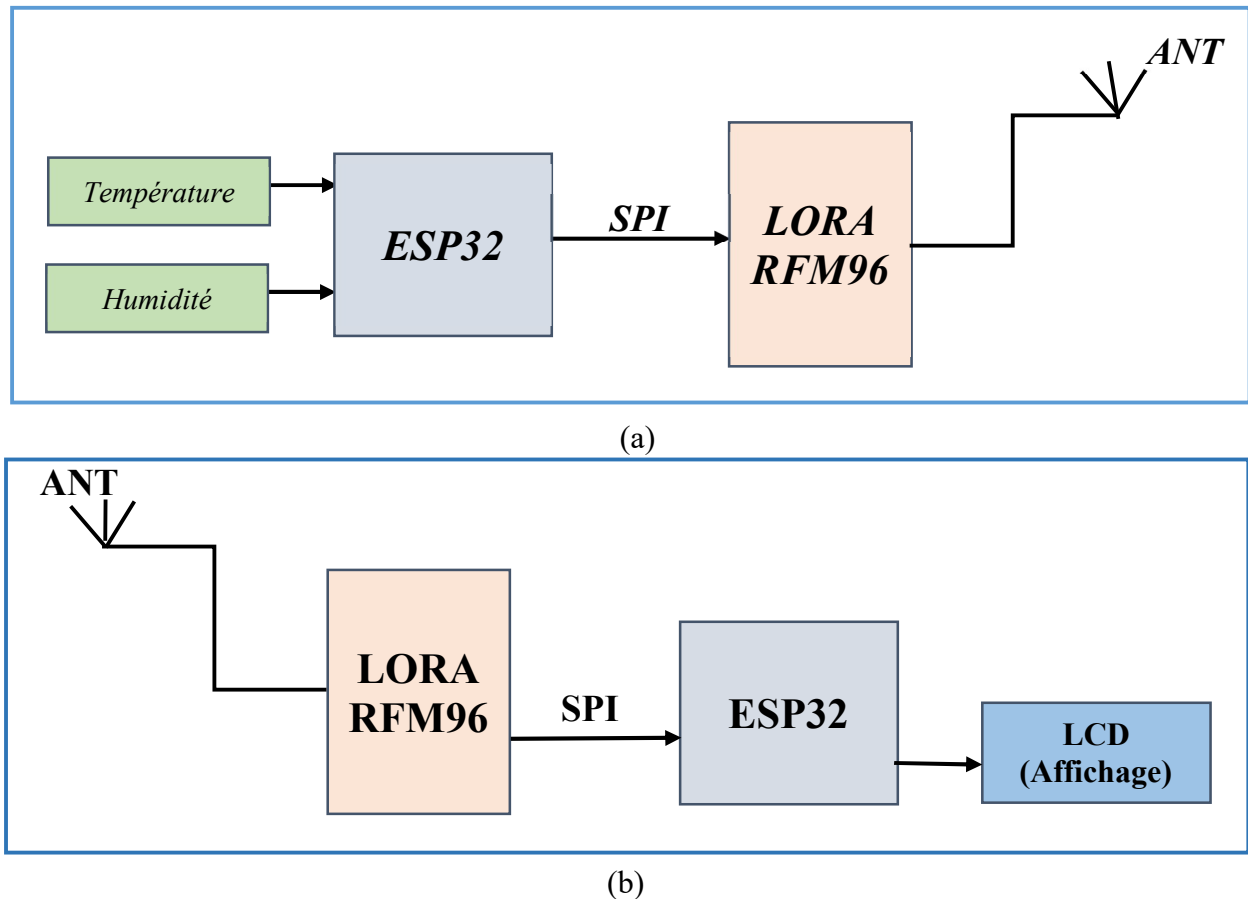


Figure 3.1 : Architecture globale du système IoT basé sur la technologie LoRa. (a) Schéma synoptique du nœud émetteur (Tx), (b) Schéma synoptique du nœud récepteur (Rx)

III.3.2. Description du schéma global

Le schéma de la Figure 3.1 illustre l'architecture matérielle de notre système de communication sans fil basé sur la technologie LoRa. Le système est divisé en deux entités principales :

- A. Le Nœud Émetteur (Tx) : C'est l'unité responsable de la collecte et de l'envoi des données. Elle se compose de :
- Microcontrôleur ESP32 : Il joue le rôle de cerveau du système. Il traite les signaux analogiques/numériques reçus des capteurs et les prépare pour la transmission.
 - Module LoRa RFM96 : Il assure la modulation des données selon le protocole LoRa. Il communique avec l'ESP32 via l'interface SPI (via les broches : MOSI, MISO, SCK, NSS, RESET).
 - Antenne : Elle convertit le signal électrique en ondes électromagnétiques pour une propagation à longue portée.

- B. Le Nœud Récepteur (Rx) : C'est l'unité de réception et d'affichage des informations. Elle comprend :
- Antenne : Capte les ondes radio envoyées par l'émetteur.
 - Module LoRa RFM96 : Démodule le signal reçu et extrait les données originales.
 - Microcontrôleur ESP32 : Reçoit les données du module LoRa et les organise pour l'affichage.
 - Afficheur LCD : Permet la visualisation en temps réel des paramètres mesurés par les capteurs distants.

III.4 Composants utilisés

III.4.1 Module LoRa SX1276

Dans ce projet, la technologie LoRa a été choisie afin d'assurer une communication sans fil à longue portée dans la bande ISM, tout en conservant une faible consommation d'énergie. La carte ESP32 a été utilisée comme unité de commande et de traitement pour recevoir les données provenant des capteurs et les exploiter dans le cadre de l'agriculture de précision. Le module RFM96, basé sur le transceiver SX1276, a été connecté à l'ESP32 via l'interface SPI. Ainsi, les broches VCC et GND ont été reliées respectivement à l'alimentation 3,3 V et à la masse, tandis que les lignes SCK, MISO, MOSI, NSS/CS, RESET et DIO0 ont été raccordées aux broches appropriées de l'ESP32. Cette configuration a permis la transmission et la réception des données de manière fiable entre les nœuds du système.

Grâce à cette architecture, l'ESP32 peut assurer la lecture des capteurs, l'émission des données via LoRa et, si nécessaire, le transfert vers une interface de supervision ou une plateforme IoT (Figure 3.2). Ce choix est particulièrement adapté aux applications agricoles, où la portée, la fiabilité et la faible consommation constituent des critères essentiels.

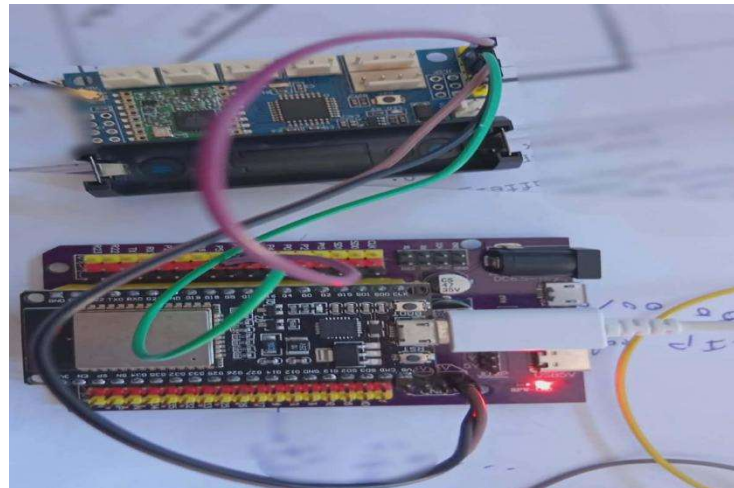


Figure 3.2 : Montage réel du système (ESP32 + LoRa).

III.4.2 Connexion loRa avec ESP32

Le Tableau 3.1 ci-dessous présente les connexions entre le module LoRa et l'ESP32, en indiquant pour chaque broche sa fonction au sein de l'interface SPI.

Tableau 3.1 : Connexion du module LoRa avec l'ESP32.

Fonction LoRa	GPIO ESP32	Rôle
SCK	GPIO 18	Horloge SPI
MISO	GPIO 19	Réception données
MOSI	GPIO 23	Envoi données
NSS	GPIO 5	Activation module
RESET	GPIO 14	Redémarrage LoRa
DIO0	GPIO 2	Fin de transmission
VCC	(3.3V)	Alimentation (3.3V)
GND	GND	Masse commune

La communication entre le module LoRa et l'ESP32 repose sur le protocole SPI, qui est, pour rappel, un protocole de communication synchrone permettant un échange rapide de données entre les composants.

Les broches SCK, MISO et MOSI constituent le bus SPI principal : SCK assure la synchronisation via le signal d'horloge, MISO permet la réception des données depuis le module LoRa, et MOSI est utilisée pour l'envoi des données vers ce dernier.

La broche NSS (Chip Select) joue le rôle d'activation du module, tandis que RESET permet de redémarrer le module LoRa en cas de besoin. La broche DIO0 est configurée comme une interruption signalant la fin d'une transmission ou d'une réception.

Enfin, le module est alimenté en 3.3V via la broche VCC, et la broche GND assure la masse commune entre les deux composants, garantissant ainsi une référence électrique stable.

III.4.3 Connexion entre l'ESP32 et le capteur DHT22

Dans ce projet, nous réalisons la connexion du capteur DHT22 avec la carte ESP32 afin de mesurer les paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité. La communication entre les deux composants est assurée par le protocole Single Wire via la broche GPIO 4. Ce protocole permet le transfert des données à travers une seule ligne de communication. Afin d'assurer une transmission stable et fiable, une résistance Pull-up de 10 k Ω est utilisée entre les broches VCC et DATA. Lors du fonctionnement, l'ESP32 envoie un signal de démarrage de 18 ms, puis le DHT22 répond par un signal de confirmation de 80 μ s avant de transmettre les 40 bits contenant les données de température, d'humidité et la somme de contrôlé (checksum) de vérification.

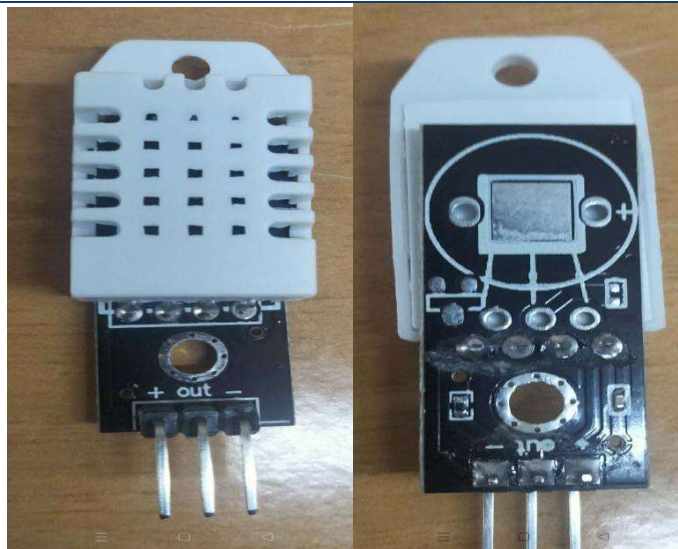


Figure 3.3 : Capteur DHT22.

III.4.3.1 Description des broches du capteur DHT22

Le module DHT22 présenté dans la Figure 3.3 possède trois broches principales utilisées pour l'alimentation et la transmission des données :

- **Broche (+)** : utilisée pour alimenter le capteur avec une tension comprise entre 3,3 V et 6 V.
- **Broche (OUT)** : broche de sortie numérique qui transmet les données de température et d'humidité vers le microcontrôleur (ESP32, Arduino, etc.)
- **Broche (-)** : broche reliée à la masse du circuit (GND). Ces trois broches permettent une connexion simple et rapide du capteur avec les différentes cartes électroniques utilisées dans les systèmes IoT et les applications de surveillance environnementale.

III.4.3.2 Connexion du capteur DHT22 avec l'ESP32

Le Tableau 3.2 présente les connexions entre le capteur DHT22 et l'ESP32, en indiquant le rôle de chaque broche.

Tableau 3.2 : Connexion du capteur DHT22 avec la carte ESP32

Fonction DHT22	GPIO ESP32	Rôle
VCC	3.3V	Alimentation du capteur
GND	GND	Masse commune
DATA	GPIO 4	Transmission des données de température et d'humidité

Le capteur DHT22 communique avec l'ESP32 via seulement trois broches. La broche VCC est alimentée en 3.3V pour assurer le fonctionnement du capteur. La broche GND est connectée à la masse commune afin d'établir une référence électrique stable. Enfin, la broche DATA est reliée au GPIO 4 de l'ESP32, permettant la transmission numérique des données de température et d'humidité vers le microcontrôleur.

III.5 Les organigrammes

III.5.1 Organigramme d'émission LoRa

L'organigramme de la Figure 3.4 décrit de manière simple le processus d'émission des données à l'aide du module LoRa. Dans un premier temps, le système initialise le module afin de le préparer au fonctionnement. Ensuite, les données à transmettre sont chargées dans la mémoire FIFO.

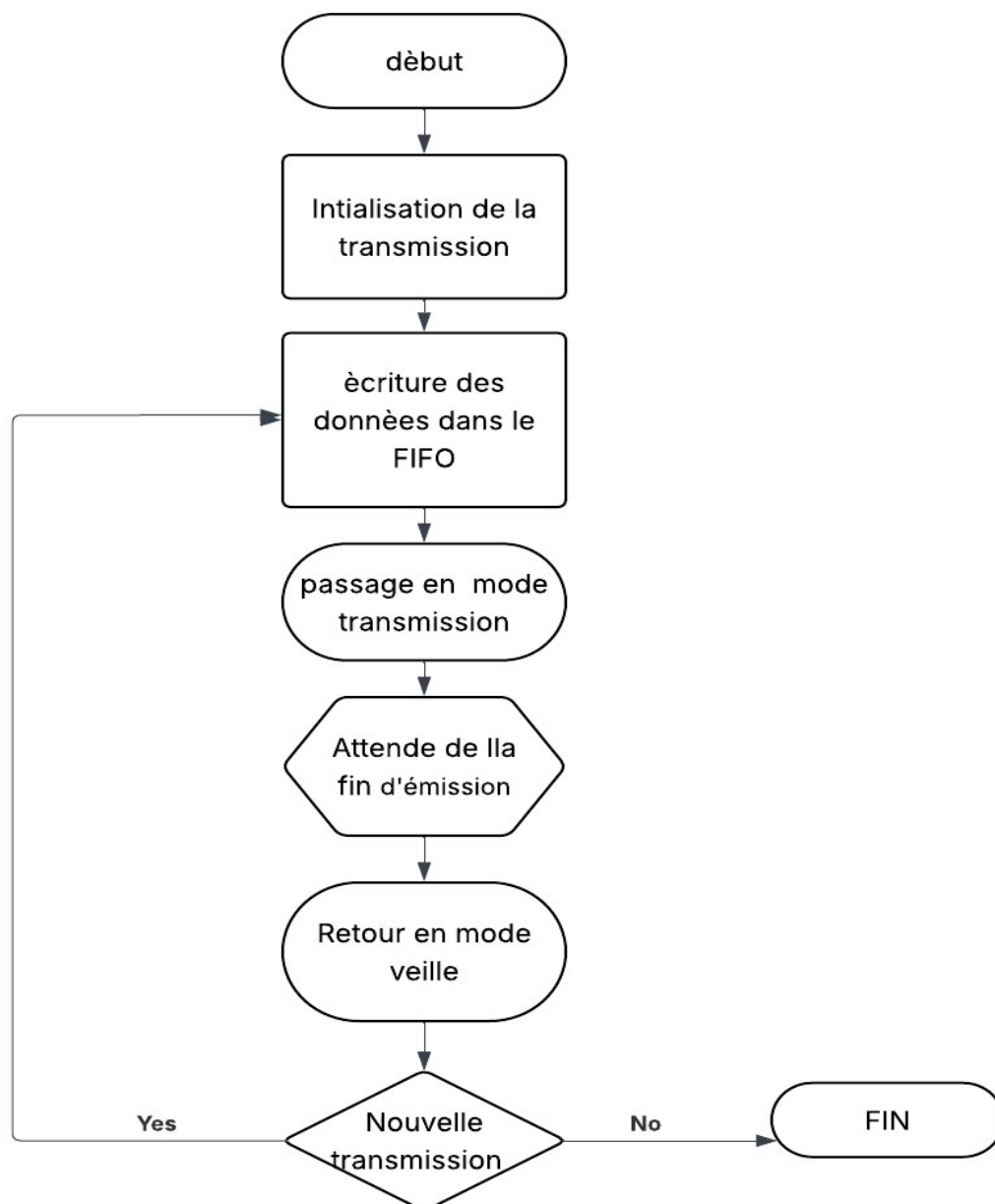


Figure 3.4 : Organigramme de la séquence émission des données LoRa [6].

Le module passe ensuite en mode émission pour envoyer les données. Le système attend la fin de cette opération, signalée par l'indicateur **TX done**

Une fois la transmission terminée, le module revient automatiquement en mode veille afin de réduire la consommation d'énergie. Ce processus peut être répété chaque fois que de nouvelles données doivent être envoyées.

III.5.2 Processus de réception LoRa

Après la phase d'émission, la réception des données est assurée par une passerelle (Gateway) ou un autre nœud du réseau. Le processus commence par la détection du préambule, qui permet au récepteur de se synchroniser avec le signal entrant.

Une fois synchronisé, le récepteur vérifie le mot de synchronisation afin de s'assurer que le paquet appartient bien au même réseau. Ensuite, il lit les différents champs du paquet, notamment l'adresse (si elle est utilisée) et le payload

Les données reçues sont ensuite déchiffrées (dans le cas d'un chiffrement AES-128), puis le CRC est vérifié pour confirmer l'intégrité du message. Si aucune erreur n'est détectée, les données sont acceptées et traitées par le système (affichage, stockage ou prise de décision).

III.5.3 Organigramme de réception LoRa (RX)

La Figure 3.5 présente l'algorithme de gestion de la réception du module Lora. Il met en évidence le passage de l'état d'initialisation vers les deux modes de fonctionnement principaux : le mode **Rx Single**, utilisé pour réduire la consommation d'énergie en recevant une seule trame, et le mode **Rx Continuons**, qui permet une écoute permanente du canal.

Par ailleurs, ce processus intègre des mécanismes de vérification, notamment le contrôle d'erreurs **CRC**, afin de garantir l'intégrité des données reçues.

III.6 Les trames de données LoRa

Selon le fonctionnement présenté dans l'organigramme d'émission, les données ne sont pas envoyées directement, mais elles sont d'abord organisées sous forme d'un paquet adapté au module SX1276.

III.6.1 Trames de transmission

Le paquet suit une structure précise au niveau de la couche physique, où les données sont encapsulées avant leur transmission. La Figure 3.6 présente la structure d'un paquet à longueur fixe (*Fixed Length Packet Format*).

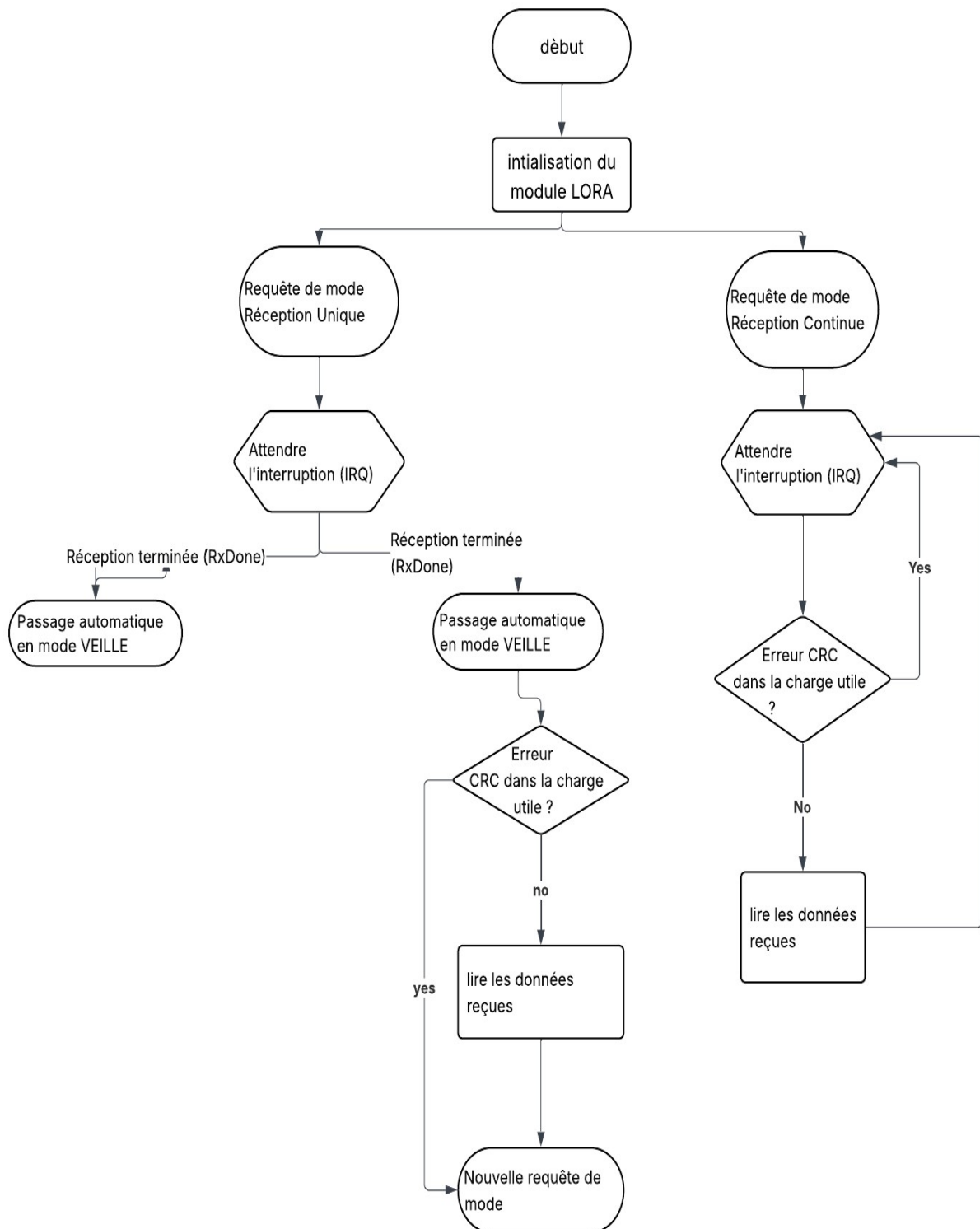


Figure 3.5 : Organigramme de la réception Rx [6].

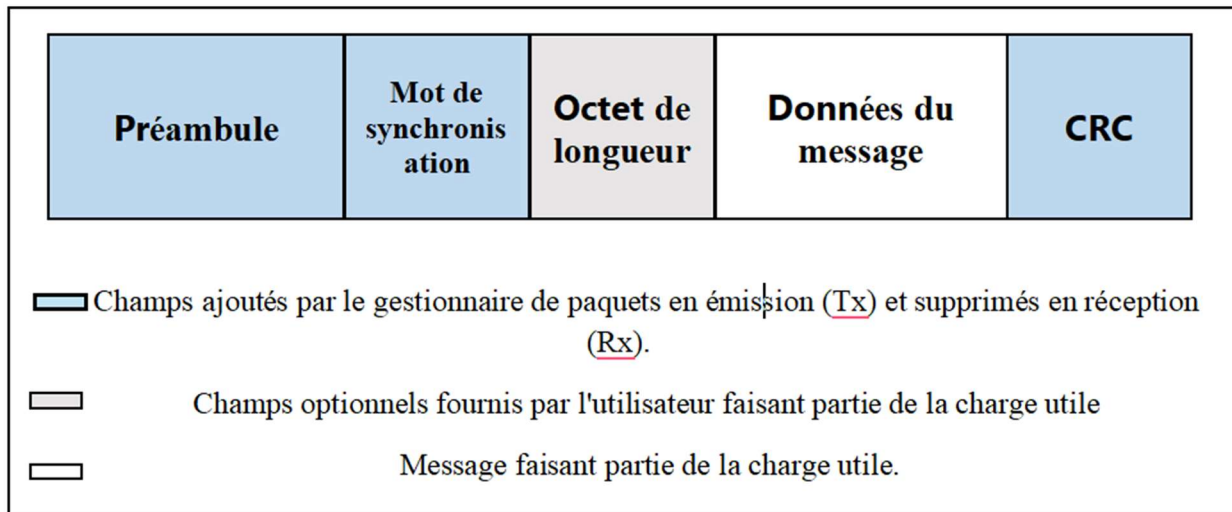


Figure 3.6 : Format du paquet LoRa [6].

Le paquet LoRa est structuré en plusieurs champs essentiels qui assurent une transmission fiable et sécurisée des données entre les nœuds du réseau. Chaque champ joue un rôle spécifique dans le processus de communication [6].

- Le **préambule (Preamble)** constitue la première partie du paquet. Il permet au récepteur de se synchroniser avec l'émetteur afin de détecter correctement le début de la trame.
- Le **mot de synchronisation (Sync Word)** est utilisé pour différencier les réseaux LoRa. Il agit comme un identifiant, permettant d'éviter les interférences entre différents réseaux opérant dans la même bande de fréquence.
- Le **champ adresse (Address Byte)** est optionnel. Il sert à identifier le nœud émetteur ou le destinataire, ce qui est particulièrement utile dans les réseaux comportant plusieurs dispositifs.
- Le **payload (message)** représente la partie principale du paquet. Il contient les données collectées par les capteurs. Dans notre système, ces données sont sécurisées grâce à un chiffrement de type AES-128, garantissant ainsi leur confidentialité lors de la transmission.
- Enfin, le **CRC (Cyclic Redundancy Check)** est un mécanisme de vérification d'intégrité. Il permet de détecter d'éventuelles erreurs survenues durant la transmission, assurant ainsi la fiabilité des données reçues.

III.6.2 Trames de réception

Pour assurer une réception correcte, le paquet physique reçu doit respecter une structure bien définie. La Figure 3.7 illustre le format d'un paquet à longueur variable (*Variable Length Packet Format*), généralement utilisé en réception afin de s'adapter à différents types et tailles de messages.

Dans ce format, la longueur du payload est indiquée dynamiquement, ce qui permet une meilleure flexibilité dans la gestion des données. Cette approche est particulièrement adaptée aux applications IoT, où la taille des informations transmises peut varier selon les capteurs ou les conditions du système.

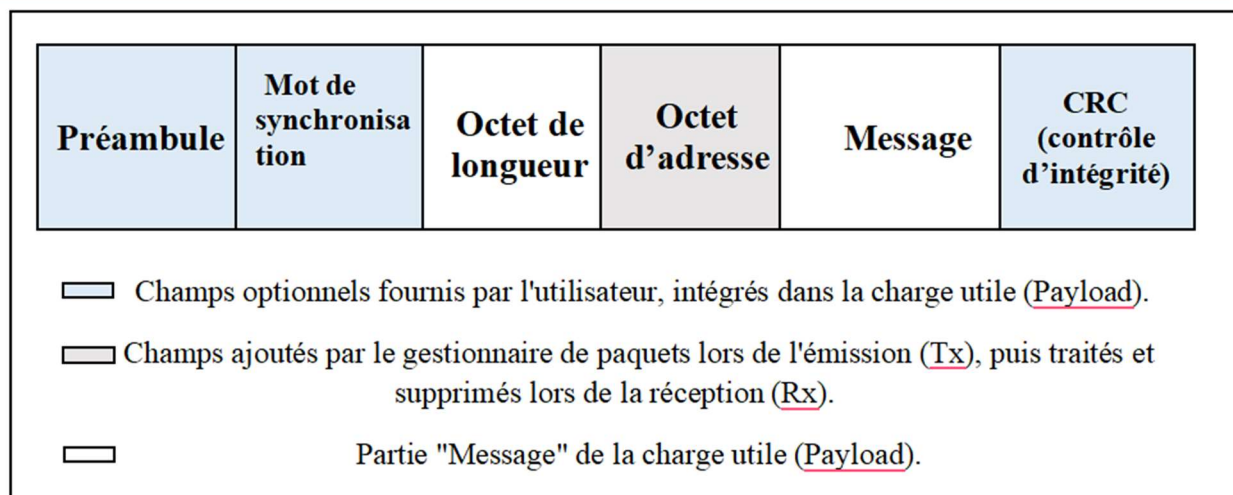


Figure 3.7 : Structure de la trame en format de longueur variable [6].

III.6.2.1 Traitement et déchiffrement des données

Une fois le paquet reçu au niveau physique et validé à l'aide du mécanisme CRC, comme illustré dans l'organigramme, le microcontrôleur procède à l'extraction des données utiles correspondant au message (Payload).

Cependant, pour assurer la sécurité de la transmission, ces données sont initialement sous forme chiffrée. Le microcontrôleur applique alors l'algorithme de déchiffrement AES-128, en utilisant la clé de session appropriée, afin de restituer les informations des capteurs en clair.

Ce processus garantit à la fois la confidentialité et l'intégrité des données, empêchant toute interception ou modification non autorisée durant la communication. Une fois les données déchiffrées, elles sont analysées par le système : si les valeurs dépassent les seuils prédéfinis, l'état de "Danger" est activé et une alarme est automatiquement envoyée.

III.7 Plateforme de développement

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé Arduino IDE comme plateforme de développement pour programmer les deux nœuds ESP32. Arduino IDE dont l'interface participiale est visualisée sur la Figure 3.8 est un environnement open-source simple et adapté aux systèmes embarqués. Il nous a permis d'écrire, compiler et téléverser les programmes vers l'ESP32, ainsi que d'utiliser le Serial Monitor pour visualiser les données reçues en temps réel durant les phases de test et de fonctionnement du système [34].

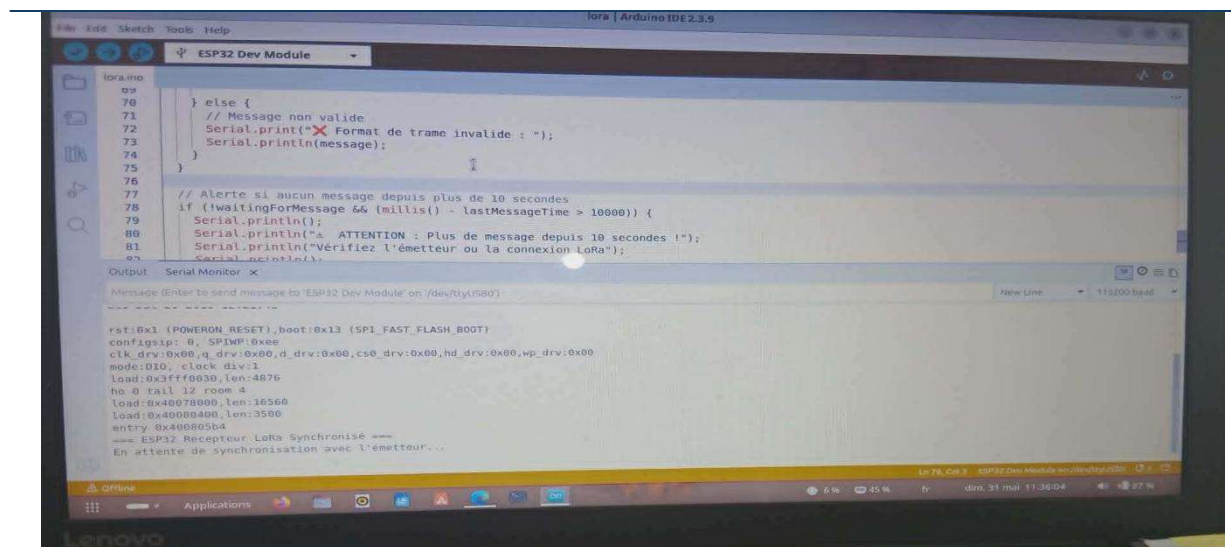


Figure 3.8 : Interface de développement Arduino IDE.

Pour visualiser les données sur le Serial Monitor, une communication série UART est utilisée.

III.8 Tests et résultats

Dans cette section, nous présentons les différents tests réalisés afin de valider le bon fonctionnement de notre système IoT de transmission LoRa appliqué à l'agriculture de précision. Ces tests ont été effectués en conditions réelles et couvrent l'ensemble des composants du système.

III.8.1 Test 1 : Réalisation et validation du nœud émetteur

Dans ce premier test, nous avons réalisé le montage du nœud émetteur composé d'une carte ESP32, du capteur DHT22 et d'un module LoRa SX1276 interconnectés via le protocole SPI. Après l'alimentation de la carte à l'aide d'un câble USB, la LED d'alimentation s'est allumée, indiquant le bon fonctionnement de la carte et la présence de l'alimentation électrique. On a aussi visé à vérifier si les informations reçues sont bel et bien correctes, et si les données n'ont pas été modifiées ou mal-codées.

L'objectif de ce test était de vérifier l'intégrité du montage matériel ainsi que la bonne connexion entre l'ESP32 et le module LoRa. Les vérifications effectuées ont confirmé que le nœud émetteur est correctement assemblé et prêt à assurer la transmission des données dans la bande ISM 915 MHz. Cependant, vérifier que les paquets transmis sont en bon état lors d'une transmission à une petite distance est bien plus important pour connaître que nos composants sont bien compatibles.

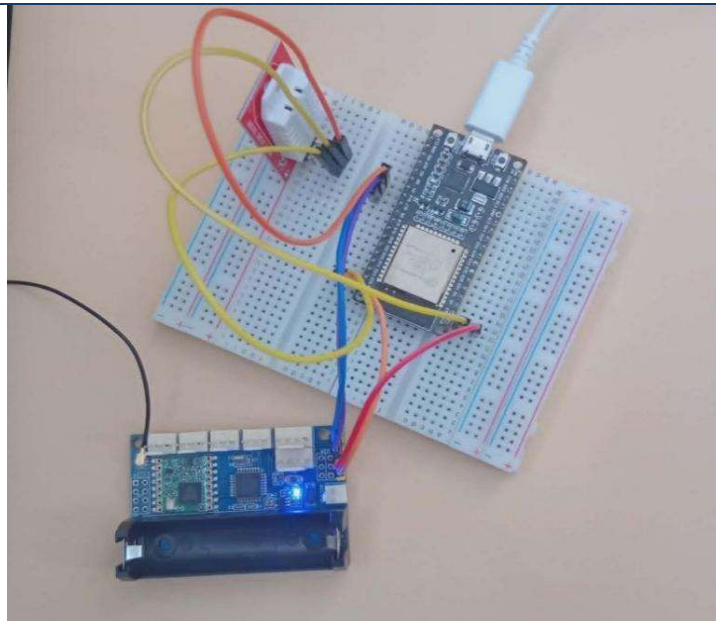


Figure 3.9 : Montage du nœud émetteur.

En plus du protocole série synchrone SPI, La Figure 3.10 illustre le résultat de communication entre ESP et le module LoRa via le protocole UART en mode asynchrone.

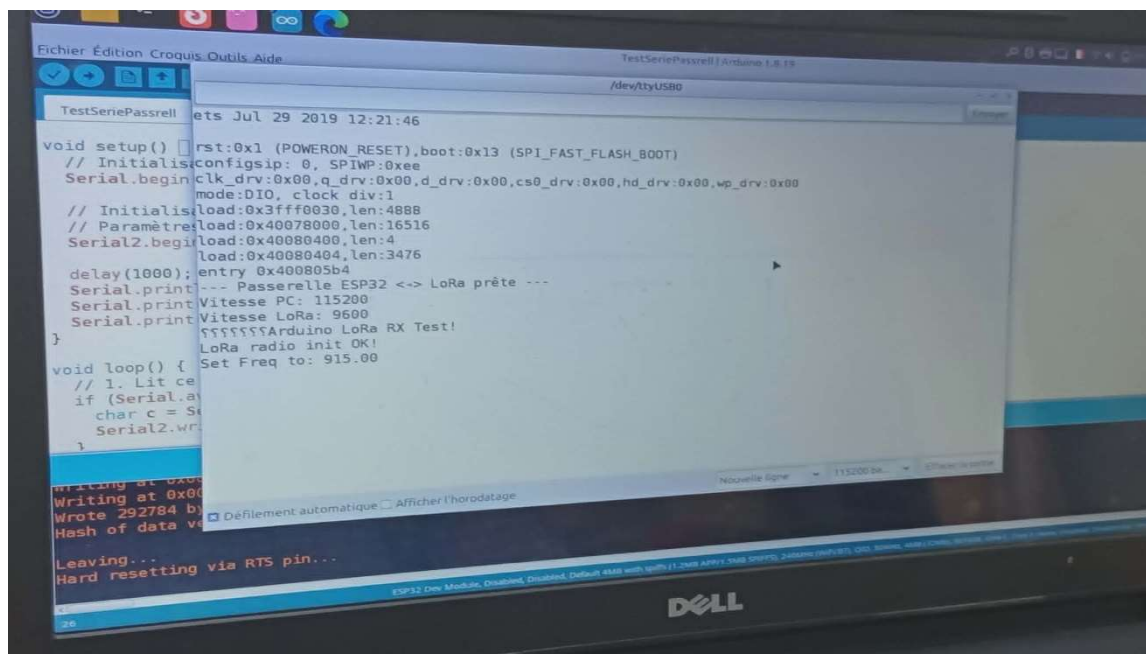


Figure 3.10 : Résultat de la transmission via UART.

Résultat : Le montage est fonctionnel et le module LoRa est correctement interfacé avec l'ESP32.

III.8.2 Test 2 : Réalisation et validation du nœud récepteur

Le côté récepteur est composé d'un module ESP32 connecté à un module RFM96, la communication entre les deux s'effectuant via le protocole UART, où les données reçues sans fil par le module RFM96 sont transmises au module ESP32 à travers les lignes série d'émission et de réception (TX/RX).

Contrairement au côté émetteur, le côté récepteur ne contient aucun capteur, son rôle se limitant à attendre les paquets entrants via le canal sans fil dans la bande de fréquences ISM, et à les traiter dès leur arrivée. Une fois un paquet de données reçu, il est reconstitué et les valeurs de température et d'humidité transmises par l'émetteur en sont extraites, puis affichées immédiatement sur le Serial Monitor de l'environnement Arduino IDE via la liaison UART entre le module ESP32 et l'ordinateur, permettant ainsi une surveillance des données en temps réel.

Le système permet également de consulter les indicateurs de qualité du signal reçu, notamment le RSSI (Received Signal Strength Indicator) et le SNR (Signal-to-Noise Ratio), qui sont des paramètres essentiels pour évaluer la fiabilité de la liaison sans fil et sa portée dans l'environnement agricole.

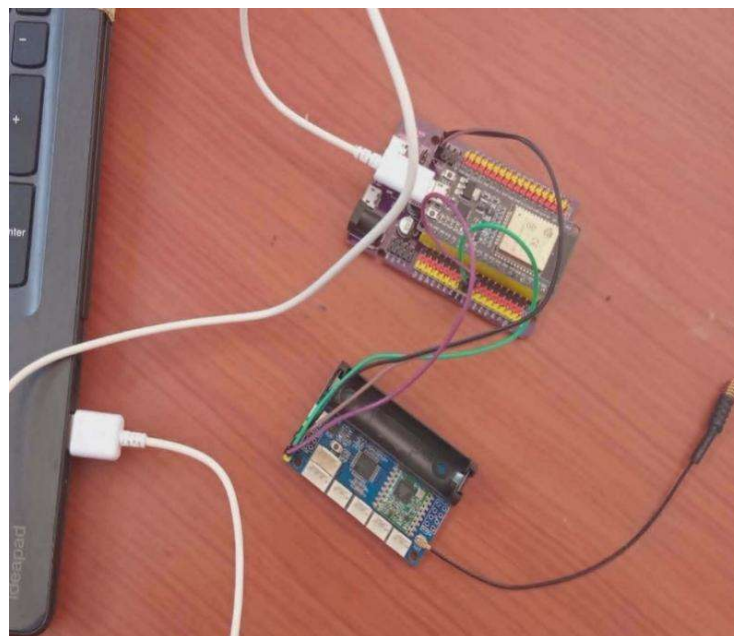


Figure 3.11 : Montage du nœud récepteur.

III.8.3 Test 3 : Vérification de la portée LoRa

Ce test consiste à vérifier le bon fonctionnement du nœud émetteur et récepteur, à vérifier que, à une longue portée, les informations collectées via le capteur sont fidèles, la fiabilité des informations est importante, mais vérifier que le nœud pourrait émettre à une longue distance, ce qu'est la raison d'être de tout module LoRa en particulier dans les champs agricoles.

Résultat attendu : Après le lancement du programme, les mesures de température et d'humidité devraient être émises sur une grande portée dépassant 500 m. Les données de température et d'humidité transmises via le module LoRa devront être correctement reçues et décodées par le nœud récepteur sans aucune perte d'information. La transmission devait s'effectuer de manière

fiable sur la bande ISM 915 MHz. Cependant les modems LoRa aquis ont deux PIN RX RX, au lieu de RX TX. Par conséquent, les résultats prévus ne pourraient pas être obtenues.

III.8.4 Test 4 : Transmission des données cryptées et codées

Dans ce test, l'objectif est de mettre en œuvre le système complet et de confirmer que les données cryptées n'ont pas été modifiées, et que la bande ISM sécurisée est bel et bien fonctionnelle et non attaquée par quelconque malware.

Les données de température et d'humidité acquises par le capteur DHT22 sont d'abord traitées par l'ESP32 émetteur, codées via le logiciel de programmation Arduino IDE, puis transmises au nœud récepteur à travers le module LoRa fonctionnant à 915 MHz via son antenne hélicoïdale. On cherche aussi à savoir, si les données sont décodables via l'ESP32 mit au nœud de la réception.

Résultat : Les données reçues devraient évidemment être cryptées.

III.8.5 Test 5 : Intégration du protocole Wi-Fi (Figure 3.12)

Le Wi-Fi nous permet de transmettre des paquets plus grands, contrairement aux paquets qu'on envoie via le protocole LoRa ou UART, ou même SPI.

Dans ce test, nous avons vérifié le bon fonctionnement de la connectivité Wi-Fi intégrée à la carte ESP32. Après la configuration des paramètres du réseau sans fil (SSID et mot de passe), l'ESP32 a été connecté avec succès au point d'accès Wi-Fi, ce qui est nécessaire pour la bonne conduite du test.

Une fois la connexion établie, les informations relatives au réseau, comme l'adresse IP attribuée à la carte ou proxy, ou même la connexion au réseau, ont été affichées sur le Serial Monitor. Cette étape a permis de confirmer la capacité de l'ESP32 à communiquer via le protocole Wi-Fi et à échanger des données avec le réseau local. Le but étant de vérifier la connectivité et le bon acheminement des paquets, bien entendu ce genre de tâche et test s'exécute à petite distance car le réseau ne couvre pas un grand rayon, afin de garantir la stabilité et fiabilité de la connexion et d'informations.

Résultat : La connexion Wi-Fi a été établie avec succès et l'ESP32 a obtenu une adresse IP valide. Les tests réalisés confirment le bon fonctionnement de la communication sans fil.

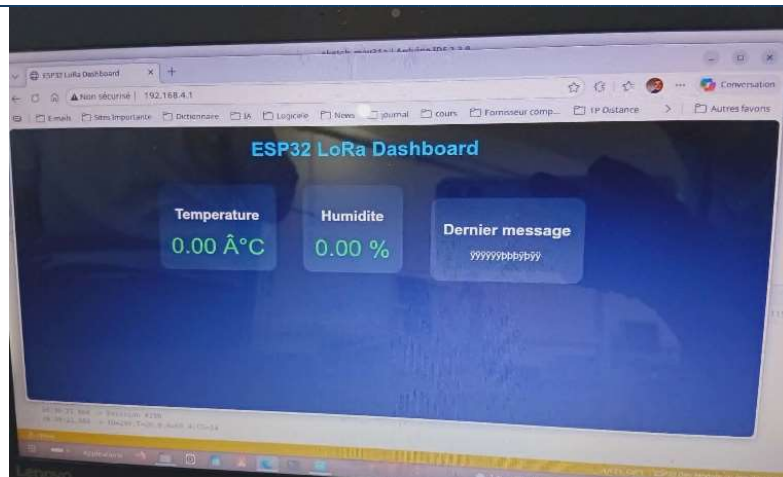


Figure 3.12 : Interface web ESP32 LoRa Dashboard affichant les données reçues via Wi-Fi.

III.9 Conclusion

Les résultats obtenus lors des différents tests réalisés ont permis de valider le bon fonctionnement du système proposé. En effet, la liaison LoRa devrait assurer une transmission fiable des données sur une distance dépassant les 500 m, tandis que le chiffrement AES garantit la confidentialité et l'intégrité des informations échangées dans la bande ISM 915 MHz. Par ailleurs, l'intégration du protocole Wi-Fi a permis d'afficher les données en temps réel sur une interface web dédiée. L'ensemble de ces résultats confirme la stabilité et la robustesse du système, et démontre sa capacité à répondre aux exigences des applications d'agriculture de précision.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Dans un monde à sens purement évolutif, la transmission des informations et les moyens de transmission évoluent exponentiellement notamment avec l'essor de l'IoT. Les technologies existantes, bien qu'efficaces, présentent certaines limites. Le Wi-Fi, ou tout autre moyen de communication qu'on utilise aujourd'hui est limité en portée et peut poser des problèmes de sécurité et d'interférences. C'est dans ce contexte que la technologie LoRa s'impose comme une solution de communication sans fil particulièrement adaptée aux applications IoT nécessitant une longue portée, une faible consommation énergétique, et une transmission sécurisée des données dans la bande ISM.

Notre projet touche non-seulement un aspect technologique, mais il vise à fructifier un domaine non-approché, et moins attractif, le rendant plus facile à vérifier, depuis une grande distance, sur un écran connecté.

L'importance du sujet traité dans ce projet de fin d'études provient des caractéristiques très spécifiques de la technologie LoRa : une portée atteignant 15 à 20 Km en milieu ouvert, une sensibilité de récepteur de -140 dBm équivalente à 10^{-17} W, un chiffrement AES-128 bout en bout, et une consommation en veille de l'ordre de $0,2$ μ A. Ces propriétés font de LoRa une technologie sûre, fiable et économique.

LoRa est une technologie qui repose sur la modulation CSS (Chirp Spread Spectrum), qui encode les données sous forme de chirps, qui sont des signaux linéairement modulés en fréquence, assurant une communication robuste même dans des environnements bruités ou encombrés d'obstacles. Le CSS peut être détecté même s'il est plus faible que le bruit de fond thermique ambiant grâce à la sensibilité du récepteur LoRa.

À titre d'application pratique, la transmission sécurisée de données environnementales était l'objet principal de notre projet, en exploitant le capteur DHT22. Ce dernier permet de mesurer la température et l'humidité ambiantes et de les transmettre à travers l'espace libre grâce à un système composé d'un microcontrôleur ESP32, d'un module LoRa RFM96W basé sur le chipset SX1276, et d'une antenne hélicoïdale KH K-102 opérant à 915 MHz. Cette application, bien que limitée dans sa forme actuelle à la mesure de deux grandeurs physiques, constitue une base solide et extensible pour des déploiements IoT à plus grande échelle.

Nous avons aussi exploité la topologie d'étoiles en étoiles, les classes A, B, C du LoRaWAN, les différents protocoles de communication dont l'UART, SPI, et le 1-Wire. Donc nous avons pu exploiter couche MAC en profondeur.

Cependant, certains problèmes ont été rencontrés au cours de la réalisation, parmi lesquels :

- Le modem H RF96 qu'on a utilisé, et qui était acquis par le laboratoire de recherche signaux et systèmes LSS, avait un défaut de fabrication. Ce dernier comporte deux PIN RX au lieu de pins TX RX, ce qui nous a complètement bloqué pendant la phase la plus importante et la plus cruciale du projet, qui consiste en tests pratiques et vérification du bon fonctionnement des modems ainsi que la validation des portées atteintes sur terrain.
- Le manque de ressources pratiques traitant l'aspect logiciel de la configuration des commandes AT du module RFM96W.
- Le T-Higrow qu'on voulait utiliser était défectueux.

Conclusion Générale.

En ce qui concerne les perspectives, nous recommandons ce qui suit pour les travaux futurs :

- Enrichir le système en ajoutant des capteurs complémentaires tels que le BME280 pour la pression atmosphérique, le BH1750 pour la luminosité et une sonde capacitive pour l'humidité du sol, pour réaliser un projet plus complet d'agriculture de précision.
- Intégrer un panneau solaire avec contrôleur MPPT pour assurer une alimentation autonome et permanente des nœuds capteurs.
- Développer un dashboard de visualisation temps réel, et un système d'alertes automatiques par SMS ou email.
- Sécuriser davantage les transmissions en implémentant un chiffrement applicatif supplémentaire au niveau du payload.
- Intégrer des mécanismes d'intelligence artificielle pour la prédiction et l'analyse automatique des données collectées, ouvrant ainsi la voie à des applications d'agriculture de précision pleinement autonomes.
- Intégrer des logiciels qui permettent aux agriculteurs d'interagir avec le dashboard de l'application qui affiche les données collectées à temps-réel.

Bibliographie

- [1] H. Bendahma, "Internet des Objets (Internet of Things (IoT))," Document pédagogique/Rapport, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.mcours.net/cours/pdf/hassbg/hassbgli822.pdf> [Consulté le 23/04/2026].
- [2] The Things Network, "What are LoRa and LoRaWAN?," *The Things Network*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>. [Accédé le : 14/03/2026].
- [3] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui and T. Watteyne, "Understanding the Limits of LoRaWAN," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34-40, Sept. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600613.
- [4] V. Pujol, "LoRa/LoRaWAN: Présentation," *Home Assistant Communauté Francophone (HACF)*, Jun. 21, 2024. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.hacf.fr/lora-presentation/>. [Consulté le : 20/03/2026].
- [5] C. Aliagas, R. Pueyo Centelles, R. Meseguer, P. Millán et C. Molina, "Dynamic Selection and Detection of Spreading Factors and Channels for End-Node Devices of LoRa Networks," *Electronics*, vol. 14, no. 17, art. 3341, 2025, doi: 10.3390/electronics14173341.
- [6] Semtech Corporation, *SX1276/77/78/79 – Low Power Long Range Transceiver Datasheet*, rév. 4, mars 2015. [En ligne]. Disponible : <https://datasheet4u.com/pdf/923298/SX1278.pdf>. [Consulté le 10/04/2026].
- [7] Tesswave, « Quelles sont les bandes de fréquences ISM et les cas d'utilisation ? », *Tesswave*, 10 déc. 2022. [En ligne]. Disponible : <https://www.tesswave.com/fr/what-are-the-ism-frequency-bands/>. [Consulté le 19/03/2026].
- [8] A. Maleki, H. H. Nguyen, E. Bedeer and R. Barton, "A Tutorial on Chirp Spread Spectrum Modulation for LoRaWAN: Basics and Key Advances," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 5, pp. 4578-4612, 2024, doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3433502
- [9] J. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman et J. Hoebeke, « A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application », *Sensors*, vol. 18, no 11, art. 3995, 2018, doi: 10.3390/s18113995.
- [10] M. Bor, J. Vidler, and U. Roedig, "LoRa for the Internet of Things," in *Proc. International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks (EWSN)*, Graz, Austria, Feb. 2016, ISBN: 978-0-9949886-0-7.
- [11] I. B. F. de Almeida, M. Chafii, A. Nimr et G. Fettweis, « Alternative Chirp Spread Spectrum Techniques for LPWANs », *arXiv preprint arXiv:2102.09250*, juin 2021. [En ligne]. Disponible : <https://arxiv.org/abs/2102.09250>. [Consulté le 03 juin 2026].
- [12] S. Chahar, M. Parikh, and M. Umar, "Communication protocol," JECRC University, 2025. [En ligne]. Disponible sur : https://www.academia.edu/145470037/Communication_protocol [Consulté le 12/05/2026].

- [13] Renzo Victor Carpio Hallasi, Yusef Mamani Arqqe, Franco Alessandro Arenas Mamani, Alejandro Enrique Contreras Corzo, Pablo Lizardo Pari Pinto, Erasmo Sulla Espinoza, PyLoGreen: Design and implementation of a low-cost agricultural data acquisition and monitoring system using Raspberry Pi, LoRa, and nRF24L01 in the High-Andean Tundra, *HardwareX*, Volume 26, 2026, e00766, ISSN 2468-0672, <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2026.e00766>.
- [14]. Valentin Stangaciu, Cristina Stangaciu, Daniel-Ioan Curiac, Mihai V. Micea, PARSECS_RT: A real-time PARSECS-based communication protocol stack for critical sensing applications, *Internet of Things*, Volume 25, 2024, 101139, ISSN 2542-6605, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101139>.
- [15] J. Medina-García, J.A. Gómez-Galán, J.M. Vilaplana-Guerrero, J.A. Bogeat, Efficient irrigation system using a combined wireless sensor network based on LoRaWAN and IEEE 802.15.4 technologies and photosynthetically active radiation measurements, *Internet of Things*, Volume 34, 2025, 101801, ISSN 2542-6605, <https://doi.org/10.1016/j.iot.2025.101801>.
- [16] Kiyoshy Nakamura, Pietro Manzoni, Alessandro Redondi, Edoardo Longo, Marco Zennaro, Juan-Carlos Cano, Carlos T. Calafate, A LoRa-based protocol for connecting IoT edge computing nodes to provide small-data-based services, *Digital Communications and Networks*, Volume 8, Issue 3, 2022, Pages 257-266, ISSN 2352-8648, <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2021.08.007>.
- [17] Hechmi Salhi, Houda Jouini, Hatem Allagui, Abdelkader Mami, Development and experimental evaluation of a low-power LoRa wearable sensor node for livestock monitoring, *Smart Agricultural Technology*, Volume 14, 2026, 102281, ISSN 2772-3755, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102281>.
- [18] “LoRaWAN and LoRa Antenna: Ultimate Guide,” *Tesswave Blog*, 18-Oct-2024. [En ligne]. Disponible : [Tesswave Blog](https://tesswave.com/blog/lorawan-and-lora-antenna-ultimate-guide/). [Consulté le : 02/04/2026].
- [19] STARF, "Diagramme de rayonnement des antennes dipôles, omnidirectionnelles, patch et autres antennes courantes," *STARF*, 14 juillet 2025. [En ligne]. Disponible : <https://starf-antenna.com/fr/antenna-radiation-pattern/> [Consulté le 17/04/2026].
- [20] RF Solutions Ltd., "915Mhz Coil Antenna ANT-9COIL17," Datasheet, [En ligne]. Disponible sur : https://eu.mouser.com/datasheet/3/3652/1/ANT_9COIL17_1.pdf [Consulté le 15/04/2026]
- [21] Harxon Corporation, “Top Applications of Helix Antennas in GPS/GNSS & Satellite Communication,” Harxon, 2024. [En ligne]. Disponible : <https://en.harxon.com/about/detail/top-applications-helix-antennas-gps-gnss-satellite-communication.html>. [Consulté le 10/04/2026].
- [22] MathWorks, “Helix Antennas,” MathWorks Documentation. [En ligne]. Disponible : <https://www.mathworks.com/help/antenna/helix-antennas.html>. [Consulté le 14/04/2026].

- [23] Jihene, « Gateway LoRaWAN : Tout ce qu'il faut savoir », *Blog Sphinx France*, 13 fév. 2025. [En ligne]. Disponible : <https://blog.sphinxfrance.com/technologies/iot/gateway-lorawan-tout-ce-qu'il-faut-savoir/>. [Consulté le 30/03/2026]
- [24] T. Caroni, "LoRaWAN : Fonctionnement, avantages et applications clés," *BTIB*, 28 février 2025. [En ligne]. Disponible : <https://www.btib.fr/lorawan-fonctionnement-avantages-applications/> [Consulté le 10/03/2026]
- [25] N. Ziani, *Réseau LoRa*, Rapport de stage, Université Paris-Est Créteil (UPEC), 2020. [En ligne]. Disponible : https://www.lacl.fr/~mokdad/Pageperso/EPINES/rapports/Rapport_de_Stage_LoRa-Version_finale.pdf. [Consulté le 14/03/2026].
- [26] S. Chahar, M. Parikh, and M. Umar, "Communication protocol," JECRC University, 2025. [En ligne]. Disponible sur : https://www.academia.edu/145470037/Communication_protocol [Consulté le 12/05/2026].
- [27] Microchip Technology, « 2.1 LoRaWAN Security », *Microchip Online Documentation*, [En ligne]. Disponible : <https://onlinedocs.microchip.com/oxy/GUID-496BDDDB4-5627-433D-AB86-83A218578BF1-en-US-2/GUID-0225BC85-8F87-4C08-B476-962FC719F278.html> [Consulté le 27/04/2026].
- [28] Abdennabi Morchid, Bouali Et-taibi, Zahra Oughannou, Rachid El Alami, Hassan Qjidaa, Mohammed Ouazzani Jamil, El-Mahjoub Boufounas, Mohamed Riduan Abid, IoT-enabled smart agriculture for improving water management: A smart irrigation control using embedded systems and Server-Sent Events, *Scientific African*, Volume 27, 2025, e02527, ISSN 2468-2276, <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02527>.
- [29] ODL Store, "ATmega328P LoRa Radio Node SX1276 / SX1278 same as the Arduino Pro Mini IoT End Nodes," [En ligne]. Disponible : <https://odlstore.com/dragino/787-2655-atmega328p-lora-radio-node-sx1276-sx1278-same-as-the-arduino-pro-mini-iot-end-nodes.html>. [Consulté le 28/04/2026].
- [30] Robosap Innovations Pvt. Ltd., "Lora Antenna 3dbi IPEX Spring for RA-02 Module," [En ligne]. Disponible : <https://robosap.in/product/lora-antenna-3dbi-ipex-spring-for-ra-02-module/>. [Consulté le : 28/04/2026].
- [31] Components101, "DHT22 – Temperature and Humidity Sensor: Pinout, Specifications and Datasheet," [En ligne]. Disponible : [Components101 DHT22 Page](#). [Consulté le : 15/05/2026].
- [32] Espressif Systems, *ESP32-WROOM-32E Datasheet*. [En ligne]. Disponible : <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1148027/ESPRESSIF/ESP32-WROOM-32E.html>. [Consulté le : 15/05/2026]
- [33] Electronic Clinic, "ESP32-WROOM-32D Pinout, Features and Specifications," [En ligne]. Disponible : <https://www.electronicclinic.com/esp32-wroom-32d-pinout-features-and-specifications/>. [Consulté le : 15/05/2026].

[34] [Arduino](https://www.arduino.cc/en/software), *Arduino IDE*. [En ligne]. Disponible : <https://www.arduino.cc/en/software>. [Consulté le : 10/06/2025].

Annexe A

Fiche technique LoRa :

Paramètre	Valeur
Fabricant	HopeRF (Hope Microelectronics)
Chipset	Semtech SX1276
Fréquence d'opération	915 MHz (bande ISM — US915 / AS923)
Plage de fréquence	820 – 1020 MHz
Sensibilité de réception	−140 dBm (LoRa, SF12, BW 125 kHz)
Puissance d'émission max	+20 dBm via PA_BOOST

Paramètre	Valeur
Link budget maximum	168 dB
Modulations supportées	LoRa (CSS), FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK
Spreading Factor	SF6 à SF12
Bandwidth	62,5 – 500 kHz
Débit effectif (LoRa)	0,18 à 37,5 kbps selon SF/BW
Interface exposée	UART (via firmware AT embarqué sur SPI natif)
Tension d'alimentation	1,8 – 3,7 V
Courant TX (+20 dBm)	120 mA
Courant RX	10,3 mA
Courant veille (sleep)	0,2 µA
FIFO interne	256 octets
Dimensions	16 × 16 mm
Température de fonctionnement	–40°C à +85°C

Tableau des caractéristiques techniques du module RFM96W (HopeRF / Semtech SX1276 — 915 MHz).

Annexe B

Fiche technique ESP 32 :

Paramètre	Valeur / Spécification
Fabricant	Espressif Systems
Microprocesseur	Xtensa LX6 dual-core — 240 MHz
Mémoire Flash	4 MB
SRAM	520 KB
Wi-Fi	802.11 b/g/n — 2,4 GHz
Bluetooth	BT Classic 4.2 + BLE
GPIO	34 broches programmables
ADC	12 bits — 18 canaux

Paramètre	Valeur / Spécification
DAC	8 bits — 2 canaux
Protocoles série	SPI (×4), I ² C (×2), UART (×3), CAN, I ² S
PWM	16 canaux
Tension d'alimentation	3,0 – 3,6 V (typique 3,3 V)
Consommation active	160 – 260 mA
Consommation deep sleep	~10 µA
Température de fonctionnement	–40°C à +85°C
Dimensions (WROOM-32)	18 × 25,5 mm

Annexe C

Fiche technique du DHT 22 :

Paramètre	Valeur / Spécification
Fabricant	Aosong Electronics
Référence	DHT22 / AM2302
Grandeurs mesurées	Température de l'air + Humidité relative de l'air
Plage de température	–40°C à +80°C
Précision température	±0,5°C
Plage d'humidité	0% à 100% HR
Précision humidité	±2% HR
Résolution	0,1°C / 0,1% HR
Interface de communication	1-Wire (single bus numérique propriétaire)
Tension d'alimentation	3,3 – 5 V
Courant actif	1,5 mA
Courant en veille	50 µA
Fréquence d'échantillonnage	0,5 Hz (1 mesure / 2 secondes maximum)
Temps de réponse	≤ 2 secondes
Résistance pull-up requise	10 kΩ vers VCC
Dimensions	15,1 × 25 × 7,7 mm